

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**СОСТАВЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ И  
СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ**

*Методические указания к лабораторным работам*

ПЕНЗА 2007

УДК 621.833

Даны определения основных понятий структуры механизмов, изложена методика составления кинематических схем механизмов и проведения структурного анализа.

Описание подготовлено на кафедре «Транспортно-технологические машины и оборудование» и предназначено для студентов механических специальностей всех форм обучения.

Ил. 15, библиограф. 4 назв., приложение 4.

Составители: Н.Е.Курносков, Л.П.Корнилаева, Ю.К. Измайлов,  
А.Г.Елистратова

Рецензент:

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержат учебно-методический материал для выполнения лабораторной работы по структурному анализу механизмов.

Работа выполняется на лабораторных установках – моделях механизмов.

**Цель работы:** наглядное ознакомление с основными структурными составляющими механизмов и их условным изображением; изучение методики составления структурных схем механизмов и проведения структурного анализа.

### 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Механизм является системой твердых тел, подвижно соединенных между собой, способных передавать и преобразовывать движение и силы. Поэтому механизмы имеют как весьма простое, так и достаточно сложное и разнообразное строение (структуру). Строением механизма определяются такие его важнейшие характеристики, как виды осуществляемых движений, способы их преобразования, число степеней свободы. Формирование механизма, т.е. соединение отдельных его частей в единую систему, сопровождается наложением связей. Правильное их распределение в строении механизма в значительной степени предопределяет его надежную эксплуатацию. Поэтому при проектировании нужно из множества разнообразных механизмов выбрать самый подходящий и правильно подобрать его основные структурные элементы. А для этого, прежде всего надо знать основные виды современных механизмов, их структурные характеристики, закономерности их строения.

#### 1.1 ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Звено** - деталь или несколько деталей, скрепленных между собой жестко.

**Стойка** - неподвижное звено механизма, или звено, условно принимаемое в механизме за неподвижное.

**Кинематическая пара** - подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев, ограничивающее их относительное движение.

**Элементы кинематической пары** - поверхности, линии, точки звена, по которым оно может соприкасаться с другим звеном, образуя кинематическую пару.

## 1.2 КЛАССИФИКАЦИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР

Кинематическая пара, в которой ее элементы соприкасаются в точке или по линии, является **высшей**, а кинематическая пара, в которой её элементы соприкасаются по поверхности, - **низшей**.

Звено в пространстве обладает шестью степенями свободы, т.е. шестью независимыми друг от друга движениями (рисунок 1): тремя вращательными вокруг трех осей и тремя поступательными вдоль осей. Звенья, образуя кинематическую пару, часть степеней свободы теряют. Иначе говоря, кинематическая пара накладывает на относительное движение образующих её звеньев ограничения – связи. Число налагаемых связей  $S$  определяется формулой  $S=6-N$ , где  $N$  - число допускаемых парой движений.

В зависимости от числа связей  $S$  кинематические пары подразделяются на пять **классов**, а в зависимости от числа допускаемых движений  $N$  - на одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиподвижные.

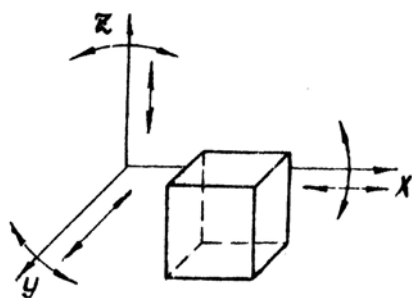


Рисунок 1

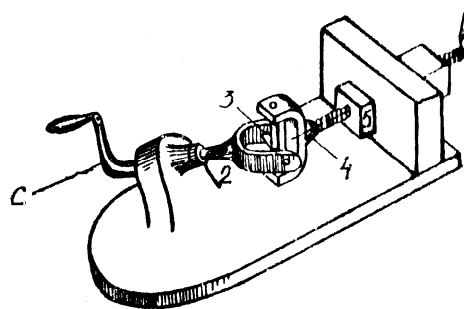


Рисунок 2

Одноподвижные пары по характеру допускаемого ими движения разделяются, на вращательные, поступательные и винтовые (см. приложение Б). Кинематические пары, допускающие лишь вращательные движения, называются шарнирами.

**Кинематической цепью** называется система звеньев, соединенных кинематическими парами.

Кинематические цепи бывают пространственные (рисунок 2) и плоские (рисунок 3а, 3б); замкнутые (рисунок 3а) и незамкнутые (рисунок 3б)

**Кинематическая схема механизма** - это его условное изображение с соблюдением размеров и формы звеньев и кинематических пар, которые определяют геометрию движения. Так, например, звено, входящее в две вращательные пары А и В (рисунок 4а), изображается на кинематической схеме отрезком АВ (рисунок 4б), длина которого равна расстоянию между центрами шарниров А и В. Звено с тремя вращательными парами А, В, С (рисунок 5а) изображаются треугольником АВС (рисунок 5б, 5в). Если все

три вращательные пары звена расположены на одной линии (рисунок 5а), то звено изображается так, как показано на (рисунок 6б).

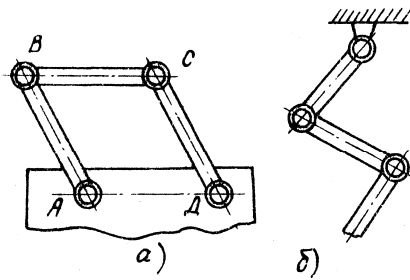


Рисунок 3

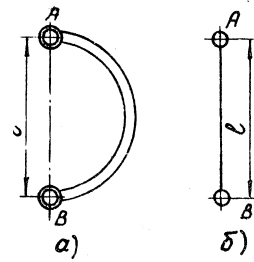


Рисунок 4

Условное изображение звеньев кинематических пар установлены ГОСТ 2.770-68 (см. приложение В)

На рисунке 7а изображена конструктивная схема механизма дизеля, а на рисунке 7б – его кинематическая схема.

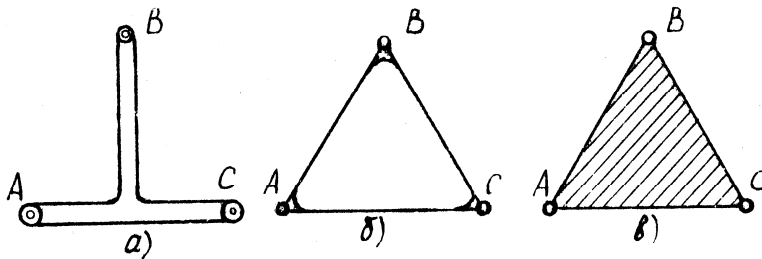


Рисунок 5

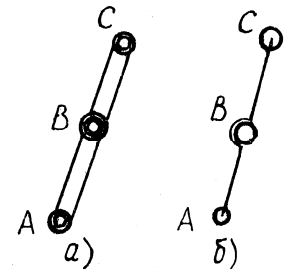


Рисунок 6

На кинематической схеме проставляются размеры между его неподвижными точками и линиями, вычислительный масштаб длины  $k_l$ , а также приводится таблица действительных значений параметров, определяющих геометрию движения механизма (см. рисунок 7б).

Вычислительный масштаб длины есть отношение действительной длины, например,

$L_{AO}$ , к длине изображающего её на схеме отрезка АО (в мм), т.е

$$k_l = \frac{l_{OA}}{OA} \left( \frac{м}{мм} \right)$$

Механизмы в зависимости от характера совершаемого ими движения имеют следующие звенья:

- **кривошип** – подвижное звено, которое может совершать вокруг своей неподвижной оси полный оборот;

- **коромысло** – подвижное звено, совершающее вокруг неподвижной оси возвратно-вращательное (качательное) движение;

- **шатун** - звено со сложным движением (шатун не имеет непосредственного соединения со стойкой);

- **ползун** – подвижное звено, которое совершает возвратно-поступательное движение по другому звену;

- **кулиса** – подвижное звено, вращающееся вокруг неподвижной оси и образующее с другим подвижным звеном поступательную кинематическую пару.

Кулисы могут быть вращающимися, т.е. делать полный оборот вокруг своей оси, и качающимися, т.е. коромыслами.

В механизме (см. рисунок 7а, 7б) звено 1 – кривошип; звенья 2, 4, 6 – шатуны; звенья 3 и 7 – ползуны, а звено 5 – коромысло.

Механизмы, в составе которых есть кулисы, – кулисные. Так, в механизмах на рисунке 8 кулисами будут звенья 3.

Кроме того, в механизмах различаются входные, выходные и соединительные, или промежуточные звенья. **Входному звену** сообщается движение, преобразуемое механизмом в требуемое движение других звеньев. **Выходное звено** совершает движение в зависимости от характера движения входного звена. **Промежуточными или соединительными** являются звенья, связывающие входные и выходные звенья механизма.

$$K_l = [м/мм]$$

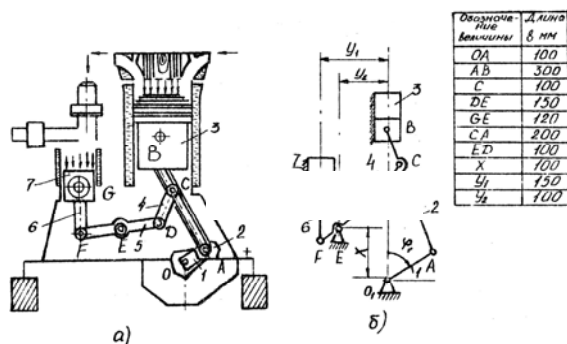


Рисунок 7

Так, к примеру, в кривошипно-ползунном механизме (рисунок 9) двигателя внутреннего сгорания входным звеном является поршень 3, а выходным – коленчатый вал (кривошип 1). В том же механизме компрессора, наоборот, входным звеном будет коленчатый вал, а выходным – поршень.

Структурный анализ механизмов состоит в определении числа его звеньев, числа кинематических пар и их класса, степени свободы, числа структурных групп, входящих в механизм. **Степень свободы механизма W** (число обобщенных координат механизма) равна разности числа степе-

ней свободы его подвижных звеньев до соединения их кинематическими парами, и числа связей, налагаемых на звенья кинематическими парами.

Механизмы, как и кинематические цепи, бывают пространственные и плоские. В первых звенья движутся в непараллельных плоскостях, а во вторых - в одной или параллельных плоскостях.

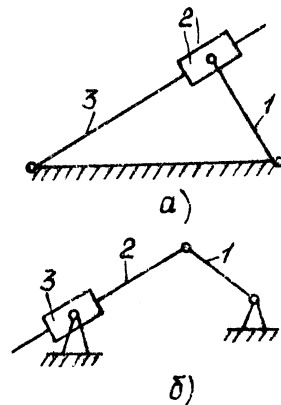


Рисунок 8

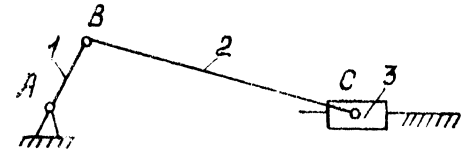


Рисунок 9

В пространственных механизмах число степеней подвижности подсчитывается по формуле Сомова-Малышева:

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

а в плоских - по формуле Чебышева:

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 \quad (2)$$

где  $n$  - число подвижных звеньев,

$p_5, p_4, p_3, p_2, p_1$  - число кинематических пар I, II, III, IV, V классов соответственно. В плоских механизмах пары IV класса являются высшими, двухподвижными, пары V класса - низшими, одноподвижными.

Так, в пространственном механизме (рисунок 10)

$$n = 4,$$

$$p_5 = 4(A, B, C, E),$$

$$p_4 = 0, p_3 = 1(D),$$

$$p_2 = 0,$$

$$p_1 = 1.$$

Подставляя эти данные в формулу Сомова-Малышева, находим:

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

В плоском механизме (см. рисунок 7б)  $n = 7, p_5 = 10, p_4 = 0$ . Степень подвижности последнего механизма по формуле Чебышева равна

$$W = 3 \cdot 7 - 2 \cdot 10 - 0 = 1.$$

Таким образом, в каждом из рассмотренных механизмов для получения определенности положения их подвижных звеньев достаточно задаться одной обобщенной координатой - углом  $\varphi_1$ .

Звено механизма, которому приписывается обобщенная координата, является *начальным или ведущим*. Число ведущих звеньев в механизме равно его числу степеней подвижности.

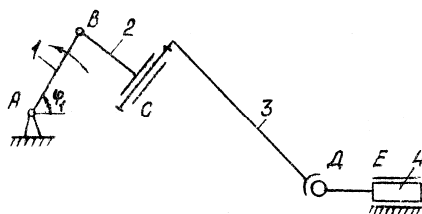


Рисунок 10

Хотя число начальных звеньев механизма и равно числу его входных звеньев, но они необязательно должны совпадать. За начальное звено (начальные звенья, если  $W > 1$ ) можно принять любое звено механизма, тогда как входное звено в каждом механизме вполне определенное. Звенья механизма, принятые за начальные, на схемах обозначаются стрелкой, указывающей направление движения.

### 1.3 ПАССИВНЫЕ СВЯЗИ И СТЕПЕНИ СВОБОДЫ

В практике находят применение механизмы, в которых есть звенья, обладающие пассивными (местными) степенями свободы и звенья с кинематическими парами, накладывающими пассивные связи. Они не определяют движение выходного звена механизма. При определении числа степеней подвижности механизма эти звенья и кинематические пары, в которые они входят, из подсчета исключаются.

Так, в механизме на рисунке 11 вращение цилиндрического ролика вокруг своей оси не влияет на движение коромысла ВД. Ничего не изменится в движении последнего, если соединить с ним ролик жестко. Поэтому при определении числа степеней подвижности надо считать, что в этом механизме  $n = 2$  (1, 2),  $p_5 = 2$  (О, Д) и  $p_4 = 1$  (А).

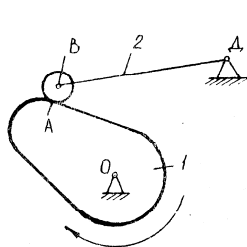


Рисунок 11

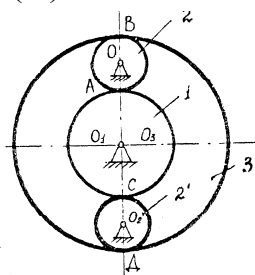


Рисунок 12



В зубчатом механизме (*рисунок 12*) при задании движения колесу 1 другие колеса получают вполне определенные движения. Однако ничего не изменится в движении выходного колеса 3, если колесо 2 или 2' удалить из механизма, следовательно, кинематические пары одного из этих колес (любого) накладывают пассивные связи. При определении его числа степеней подвижности надо считать, что в механизме  $n = 3$  (1, 2, 3),  $p_5 = 3(0_1, 0_2, 0_3)$  и  $p_4 = 2$  (А и В).

Пассивные или, что одно и то же, избыточные связи в механизме нежелательны, ибо это требует более высокой точности изготовления звеньев.

Если степень подвижности механизма известна (её можно определить не только по формулам (1) и (2), но и путем внешнего осмотра механизма или его схемы), то число его избыточных связей определяется по формулам:

в пространственных механизмах

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

в плоских и сферических механизмах

$$q = W + 2p_5 + p_4 - 3n. \quad (4)$$

Механизмы без избыточных связей называются **рациональными**.

#### 1.4 СТРУКТУРНЫЕ ГРУППЫ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ ПО АРТОБОЛЕВСКОМУ

Согласно теории Ассур А.В. и Артоболевского И.И., любой плоский механизм с низшими (вращательными и поступательными) кинематическими парами состоит из механизма I класса и структурных групп.

Механизмом I класса (**начальным механизмом**) является начальное звено, соединенное со стойкой кинематической парой V класса (*рисунок 13*). Число начальных механизмов в плоском механизме равно его числу степеней подвижности.

**Структурной группой, или группой Ассур**, является кинематическая цепь с нулевой степенью подвижности. Структурная группа Ассур не делится на более простые цепи.

Согласно формуле (2) в структурной группе плоского механизма с низшими парами должно выполняться условие

$$3n - 2p_5 = 0 \quad (5)$$

или 
$$p_5 = \frac{3n}{2}.$$

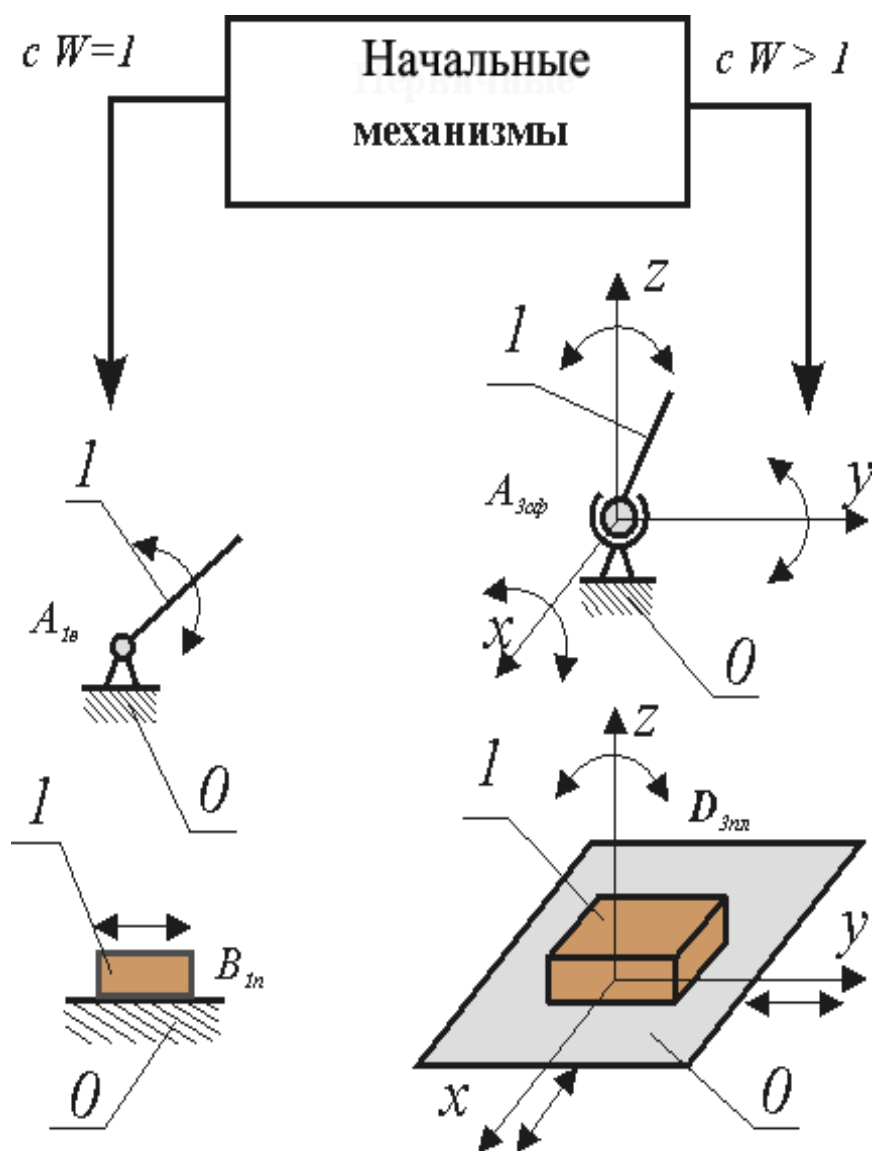


Рисунок 13

Так как число кинематических пар  $V$  класса  $p_5$  в структурной группе может быть только целым, то число звеньев ( $n$ ) в группе может быть только четным 2, 4, 6 и т.д.

Артоболевский И.И. разделил группы Ассур на классы, а внутри класса на порядки. **Номер класса группы** равен числу внутренних кинематических пар, образующих в ней наиболее сложный замкнутый контур, а **порядок** - числу свободных кинематических пар, т.е. пар, которыми группа присоединяется к механизму. Исключением является структурная группа II класса, в которой общее число кинематических пар равно трем, в том числе одна из них внутренняя.

Кинематическая цепь (рисунок 14) отвечает условию (5), следовательно, является группой Ассура. Группа состоит из двух подвижных звеньев и трех кинематических пар. Её пары А и С являются свободными, ими группа присоединяется к механизму. Таким образом, эта группа может быть отнесена ко II классу, 2-го порядку.

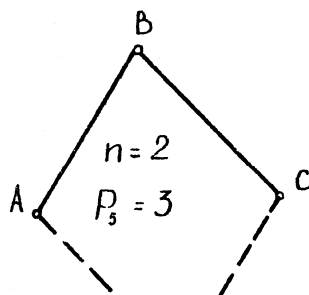


Рисунок 14

Группы II класса 2-го порядка (они все 2-го порядка), в зависимости от сочетания в них вращательных и поступательных пар и последовательности их расположения, делятся на пять видов. Группы II класса всех пяти видов, а также группы III класса, приведены в приложении Г.

### 1.5 ВЫДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ГРУПП В МЕХАНИЗМЕ

В состав механизма может войти одна или несколько структурных групп одного или разных классов. Поскольку число степеней подвижности структурной группы равно нулю, то отделение их от механизма не меняет его подвижности.

При разложении ведомой части плоского механизма на структурные группы вначале полагают, что последней группой в механизме является группа II класса. Поскольку группы II класса - это кинематические цепи из двух звеньев и трех кинематических пар, то делают попытку отделить такую цепь, образованную самыми удаленными от начального звена механизма звеньями. Если после отделения этой цепи оставшаяся часть механизма будет иметь ту же подвижность, что и первоначальный механизм, то отсоединенная цепь обладает нулевой подвижностью и, следовательно, будет структурной группой II класса.

Когда не удастся выделить кинематическую цепь из двух звеньев и трех кинематических пар с нулевой подвижностью, то делают попытку выделить структурную группу более высокого класса, т.е. кинематическую цепь из четырех звеньев и шести кинематических пар и т.д.

Если в состав механизма входит несколько структурных групп, то выделение каждой новой группы проводится в указанном выше порядке.

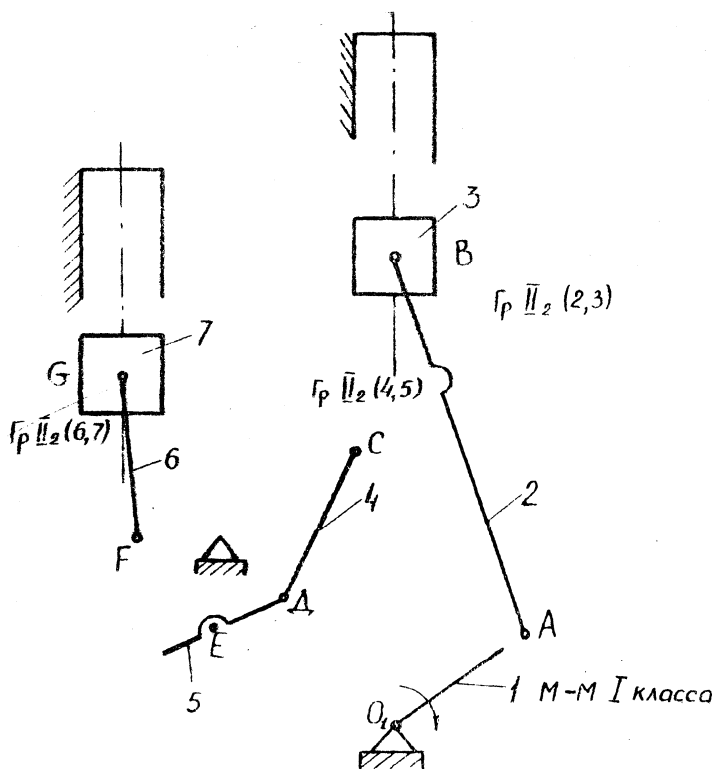


Рисунок 15

Придерживаясь этой методики, легко установить, что механизм (см. рисунок 7а, 7б) состоит из механизма I класса и трех последовательно присоединенных к нему структурных групп II класса 2-го порядка (рисунок 15). Это можно записать в виде формулы

$$I(0,1) \rightarrow II_2^2(2,3) \rightarrow II_2^1(4,5) \rightarrow II_2^2(6,7),$$

которая называется формулой строения механизма и читается так: к механизму 1-го класса, образованному звеньями (0, 1), присоединена группа II класса 2-го порядка 2-го вида, образованная звеньями (2, 3), к группе (2, 3) присоединена группа II класса 2-го порядка 1-го вида, образованная из звеньев (4, 5), к группе (4, 5) присоединена группа II класса 2-го порядка 2-го вида. Здесь цифрой "0" обозначена стойка механизма.

Механизму в целом приписывается класс той его группы, которая имеет наиболее высокий класс, т.е. данный механизм является механизмом II класса.

Принцип образования механизмов путем присоединения структурных групп, рассмотренный применительно к плоским механизмам с низшими парами, распространяется как на плоские механизмы с высшими па-

рами, так и на пространственные механизмы, составленные из одних твердых тел.

При этом структурные группы плоских механизмов с одно- и двух-подвижными (высшими) парами на основании формулы (2) должны удовлетворять условию

$$3n - 2p_5 - p_4 = 0 \quad (6)$$

Оно выполняется, когда  $n=1, p_5=1, p_4=1$ .

Таким образом, звено плоского механизма, входящее в одну низшую и одну высшую кинематические пары, отвечает требованиям структурной группы.

На основании формулы (1) структурные группы пространственных механизмов в общем случае должны удовлетворять условию

$$6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 0 \quad (7)$$

Для пространственных механизмов, в составе которых пары V класса, условие (7) будет иметь вид

$$6n - 5p_5 = 0 \quad (7')$$

## 2 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Каждый студент должен составить и вычертить кинематическую схему механизма, произвести его структурный анализ и написать отчет о работе (приложение А).

## 3 ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

1. Механизмы или их модели.

## 4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Привести механизм (его модель) в движение. Определить число его подвижных звеньев, число кинематических пар и их класс.
2. Пользуясь таблицей условных обозначений звеньев и кинематических пар (см. приложения Б, В), изобразить структурную схему механизма.
3. Пронумеровать на схеме звенья механизма арабскими цифрами в порядке их присоединения к ведущему звену. Кинематические пары механизма обозначить прописными буквами из латинского алфавита в том же порядке, что и звенья.

4. По структурной схеме механизма определить его степень подвижности  $W$ . Проверить, равно ли найденное значение  $W$  действительной подвижности исследуемого механизма.
5. В соответствии с подвижностью механизма выбрать ведущее звено (ведущие звенья, если  $W > 1$ ) и обозначить его на схеме стрелкой.
6. Разложить ведомую часть механизма на структурные группы и определить их класс, порядок и вид (см. приложение Г).
7. Определить класс механизма.
8. Написать формулу строения механизма.
9. Результаты работы показать преподавателю. Если они правильны, то следует выполнять дальнейшие пункты работы.
10. Написать отчет о работе по прилагаемой форме (см. приложение А).

## 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение механизма и машины.
2. Как классифицируют машины по назначению и характеру выполняемой работы?
3. Какие механизмы называют рычажными и как они классифицируются?
4. Объясните принцип работы наиболее распространенных рычажных механизмов.
5. Назовите особенности кулачковых механизмов.
6. Что такое фрикционный механизм и как он работает?
7. Какие механизмы имеют гибкие связи?
8. Перечислите конструктивные признаки зубчатых механизмов.
9. Дайте определение звену и кинематической паре.
10. По каким признакам классифицируются кинематические пары?
11. Приведите примеры кинематических пар различных классов.
12. Какие условные обозначения применяют для звеньев и кинематических пар?
13. Что называют кинематической цепью и по каким признакам классифицируют кинематические цепи?
14. Что называют числом степеней свободы разомкнутой кинематической цепи?

15. Как определяется число степеней свободы пространственного и плоского механизмов?
16. В чем заключается принцип структурной классификации механизмов по Л.В. Ассуру?
17. Что такое начальный механизм и какие признаки он имеет?
18. Дайте определение структурной группы Ассура.
19. Как определяют класс и порядок структурной группы Ассура?
20. Чем определяется класс механизма?
21. Дайте характеристику пяти видов структурных групп II класса.
22. Как записывается формула строения механизма?
23. Изложите порядок проведения структурного анализа механизма на примере его кинематической схемы.
24. В чем заключается принцип структурного синтеза механизмов?
25. Дайте определение структурной и кинематической схемам механизма.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. - М. : Наука, 1988. -638 с.
2. Левитская, О.Н. Курс теории механизмов и машин / О.Н.Левитская, Н.И. Левитский - М. : 1990. -279 с.
3. Теория механизмов и машин: Учебник для вузов/ К.В.Фролов, С.А.Попов, А.К.Мусатов и др.; под общ. ред. К.В. Фролова. - М. : Высшая школа, 1987.- 496 с.
4. Попов, С.А. Курсовое проектирование по теории механизмов и механике машин: Учебное пособие для вузов /С.А.Попов, Г.А. Тимофеев; Под ред. К.В.Фролова. – М. : Высшая школа, 1986. – 458 с.

Лаборатория теории механизмов и машин  
 Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

Лабораторная работа №1  
 Составление кинематических схем и структурный анализ плоских механизмов

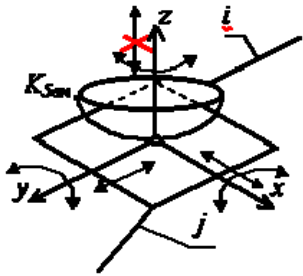

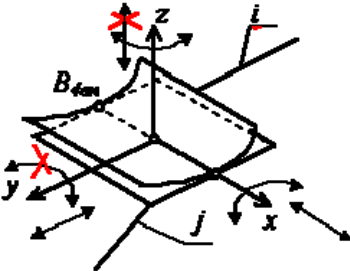
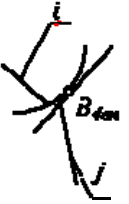
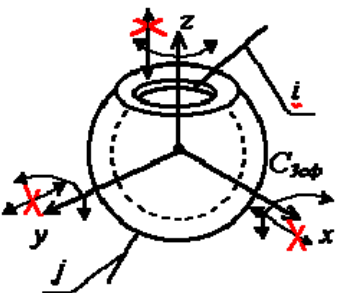

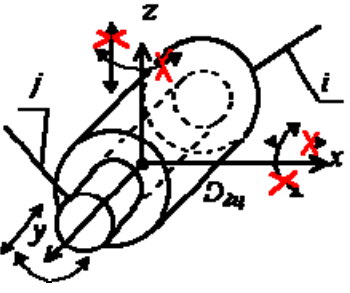

Название механизма \_\_\_\_\_

Структурная схема	Таблица кинематических пар			
	Обозначение КП	Звенья составл. КП	Наименование КП	Класс
<p>1 - Кривошип                  2 - Штун                  3 - Коромысло                  4 - Штун                  5 - Коромысло</p>	A	1 - 2	низшая вращательная	V
	B	2 - 3	низшая вращательная	V
	B'	2 - 4	низшая вращательная	V
	D	4 - 5	низшая вращательная	V
	O	0 - 1	низшая вращательная	V
	E	0 - 5	низшая вращательная	V
	C	0 - 3	низшая вращательная	V

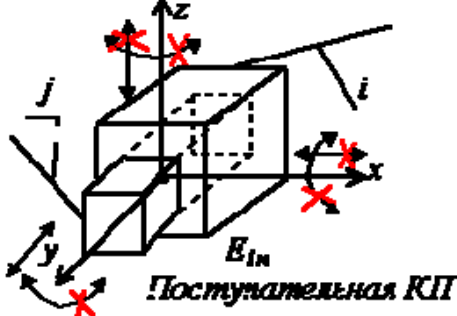
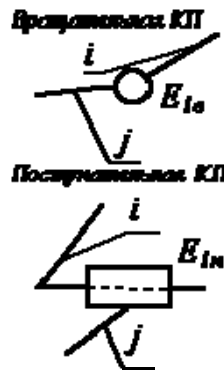
1	Кол-во подвижных звеньев	5
2	Кол-во низших КП	7
3	Кол-во высших КП	0
4	Степень подвижности механизма	$W = 3n - 2p_5 - p_4$ $W = 15 - 14 = 1$
5	Разложение механизма на группы	а) <u>BDE</u> : группа II класса 2 порядка 1 вида  б) <u>CBA</u> : группа II класса 2 порядка 1 вида  в) Начальный механизм 1 класса 
6	Формула строения механизма	$\Gamma(0-1) \rightarrow \Pi_2^{(1)}(2-3) \rightarrow \Pi_2^{(1)}(4-5)$



Таблица 1 - Классификация кинематических пар по числу связей и по подвижности

Класс пары	К	Число связей	П подвижность	Пространственная схема (пример)	Условные обозначения
I	I	1	5		
I	I	2	4		
II	I	3	3		
V	I	4	2		

Окончание таблицы 1

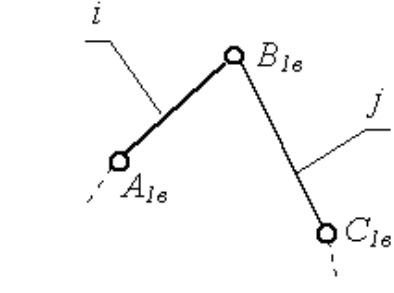
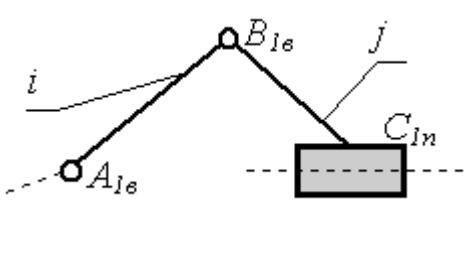
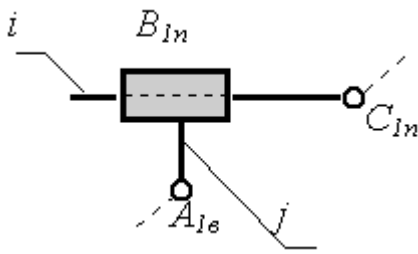
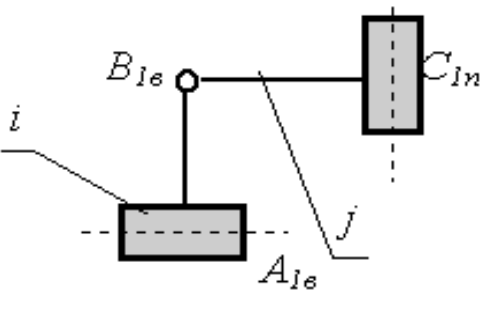
Класс пары	Число связей	Подвижность	Пространственная схема (пример)	Условные обозначения
V	5	2		

**Примечание:** Стрелки у координатных осей показывают возможные угловые и линейные относительные перемещения звеньев. Если стрелка перечеркнута, то данное движение в КП запрещено (т.е. на данное относительное движение наложена связь).

Таблица 2 – Условное обозначение звеньев и механизмов

Наименование	Обозначение
Опора для стержня:	
а) неподвижная	
б) подвижная	
Соединение стержней:	
а) жесткое	
б) шарнирное	
в) шаровым шарниром	
г) жесткое с шарнирным присоединением третьего стержня	
д) жесткое с шаровым шарнирным присоединением третьего стержня	
Соединение стержня с неподвижной опорой:	
а) шарнирное с движением в плоскости чертежа	
б) шаровым шарниром	
Цилиндр с поршнем:	
а) неподвижный с шатуном	
б) неподвижный со штоком	
в) качающийся	
Кулисные механизмы	
Кривошипно-кулисный механизм с вращающейся кулисой	
Кривошипно-кулисный механизм с качающейся кулисой	

Таблица 3 - Классификация структурных групп Ассура

Класс	Порядок	Вид	Схема	Число звеньев	Число пар V класса
II	2	1		2	3
		2			
		3			
		4			
		5	