

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет**

Кафедра машиностроения

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА

*Методические указания к самостоятельной работе
для студентов всех направлений бакалавриата и специальностей*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019**

УДК 531.8; 621.81 (073)

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА. Структурный анализ рычажного механизма: Методические указания к самостоятельной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *А.В. Большунов, А.Ю. Кузькин*. СПб, 2019. 26 с.

Рассмотрена методика проведения структурного анализа рычажного механизма. Приведены основные теоретические сведения, разобран пример выполнения домашнего задания и предложены варианты заданий для самостоятельной работы студентов.

Методические указания предназначены для студентов всех направлений подготовки бакалавриата и специалитета, а также могут быть использованы для самостоятельной работы студентов, изучающих дисциплины «Механика», «Техническая механика», «Теоретическая и прикладная механика».

Научный редактор проф. *В.Л. Трушко*

Рецензент проф. *А.А. Тихонов* (Санкт-Петербургский государственный университет)

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для самостоятельной работы студентов, обучающихся по всем направлениям подготовки бакалавриата и специалитета, и изучающих дисциплины «Прикладная механика», «Механика», «Техническая механика», «Теоретическая и прикладная механика».

Выполнение домашнего задания, позволяет студентам получить необходимые практические навыки по проведению структурного анализа рычажного механизма и закрепить теоретические знания, полученные на лекционных занятиях.

Домашнее задание выполняется по индивидуальному заданию, выданному преподавателем. Количество механизмов, рассматриваемых студентом, определяется преподавателем и зависит от объема курса, изучаемого студентом и от количества часов, отведенных на его самостоятельную работу. Студент оформляет отчет по выполненной работе, в котором указывает ее цель, основные теоретические положения, исходные данные и результаты проведенного структурного анализа механизма (механизмов). Оформление отчета должно соответствовать требованиям ЕСКД. Отчет сдается на проверку преподавателю. Проверенный и подписанный отчет подлежит защите.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Механизм – система твердых тел, предназначенная для преобразования заданного движения одного или нескольких тел в требуемые движения других тел. В теории механизмов и машин под твердыми телами понимают как абсолютно твердые, так и деформируемые и гибкие тела. Так, например, в гидравлическом механизме преобразование движения происходит посредством твердых и жидких тел, а в пневматическом – посредством твердых и газообразных тел.

Любой механизм состоит из звеньев, образующих между собой кинематические пары.

Звено механизма – твердое тело, входящее в состав механизма и обладающее подвижностью относительно других звеньев. Звено может состоять из нескольких деталей (отдельно изготовленных частей), жестко связанных между собой и совершающих совместно, как единое твердое тело, один вид движения. Различают подвижные и неподвижные звенья. Условные обозначения звеньев механизма приведены на рис. 1.1.

Стойка – единственное в механизме звено (рис. 1.1 а), условно принятое за неподвижное. Все остальные звенья механизма называются *подвижными* и их движение рассматривается относительно стойки. Стойка в механизме может быть только одна.

Кривошип – звено, вращающееся вокруг стойки (вокруг неподвижной оси) и совершающее при этом полный оборот (рис. 1.1 б). Угол поворота кривошипа $\varphi \geq 360^{\circ}$.

Коромысло (балансир) – звено, вращающееся вокруг стойки (неподвижной оси) и совершающее при этом неполный оборот, т.е. выполняющее возвратно-вращательное движение (рис. 1.1 в). Угол поворота коромысла $\varphi < 360^{\circ}$.

Ползун – звено, совершающее прямолинейное возвратно-поступательное движение относительно стойки (неподвижной направляющей) (рис. 1.1 г).

Шатун – звено, кинематически не связанное со стойкой, а с другими звеньями связанное только вращательными кинематическими парами. Шатун при работе механизма совершает плоскопараллельное (сложное) движение (рис. 1.1 д).

Кулиса – звено, кинематически связанное со стойкой и образующее с другим подвижным звеном, которое называется **камень**, поступательную кинематическую пару (рис. 1.1 е).

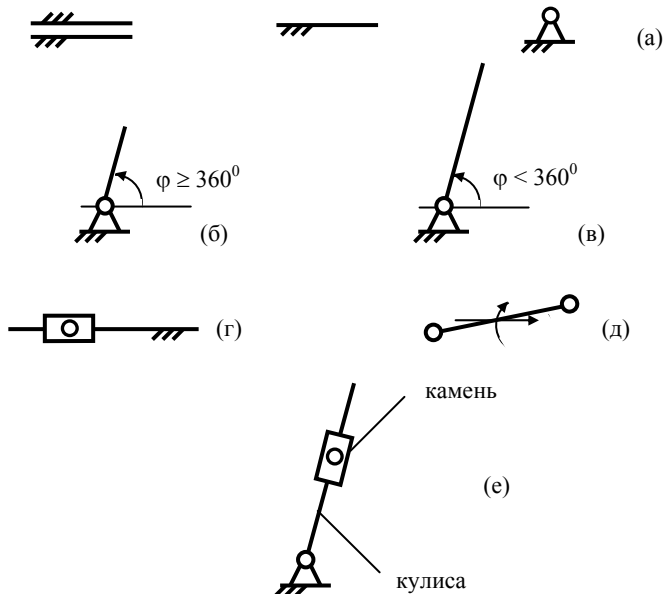


Рис. 1.1. Условные обозначения некоторых звеньев механизма на кинематической схеме

Входным (ведущим) называется звено, движение которому задается (например, другим механизмом, двигателем или человеком).

Выходным называется звено, совершающее движение, для выполнения которого предназначен механизм.

У механизма может быть несколько входных или выходных звеньев.

Обобщенной координатой механизма называется угловая или линейная координата, определяющая положение ведущего (или другого) звена механизма относительно стойки. Она однозначно определяет соответствующие ей положения всех остальных звеньев механизма.

Кинематическая пара – соединение двух соприкасающихся звеньев, допускающее их относительное движение. Кинематические

пары бывают **высшими**, элементы звеньев которых соприкасаются (теоретически) в точке или по линии (рис. 1.2 а), или **низшими**, элементы звеньев которых соприкасаются по поверхности (рис. 1.2 б). Кинематические пары классифицируются по числу связей (S), наложенных на относительные движения звеньев, образующих кинематическую пару.

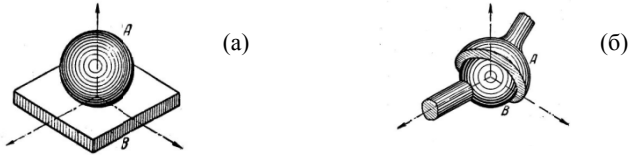


Рис. 1.2. Кинематические пары: высшие (а), низшие (б)

Существует пять классов кинематических пар (рис. 1.3.).

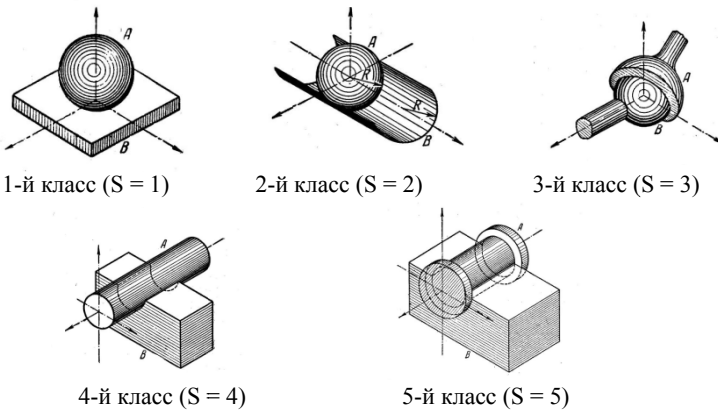
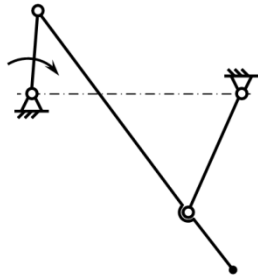


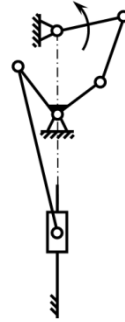
Рис. 1.3. Классы кинематических пар

Система звеньев, связанных между собой кинематическими парами, образует **кинематическую цепь**. Кинематические цепи бывают: простые и сложные; замкнутые и незамкнутые; плоские и пространственные; определенные и неопределенные.

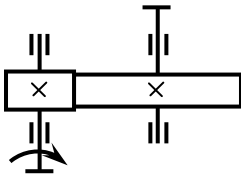
Простой кинематической цепью называется цепь, звенья которой входят в состав не более чем двух кинематических пар (рис. 1.4 а, в, г, д), в **сложной** цепи, хотя бы одно звено входит в состав более чем двух кинематических пар (рис. 1.4 б).



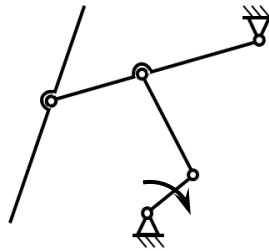
(a)



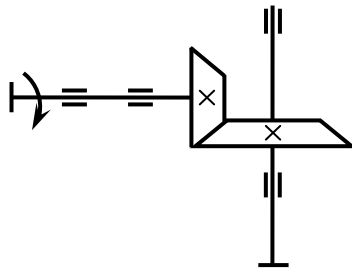
(б)



(в)



(г)



(д)

Рис. 1.4. Кинематические цепи

Замкнутой кинематической цепью называется цепь, каждое звено которой входит как минимум в две кинематические пары (рис. 1.4 а, б, в, д), в **незамкнутой** цепи есть хотя бы одно звено, входящее только в одну кинематическую пару (рис. 1.4 г).

Плоской кинематической цепью называется цепь, звенья которой движутся в одной или в параллельных плоскостях (рис. 1.4 а, б, в, г), в **пространственной** цепи звенья движутся в пересекающихся плоскостях (рис. 1.4 д).

Определенной кинематической цепью называется цепь, движения звеньев которой носят вынужденный, строго определенный характер, подчиненный закону движения входного звена (входных звеньев) (рис. 1.4 а, б, в, д), а **неопределенной** – цепь, движения звеньев которой имеют хаотичный, неопределенный характер (рис. 1.4 г).

Структурная схема механизма – схема, дающая представление о взаимосвязи между отдельными звеньями механизма. Она может быть представлена графическим изображением с применением условных обозначений звеньев и кинематических пар или аналитической записью, при этом абсолютные размеры звеньев не учитываются.

Кинематическая схема механизма – это его структурная схема, выполненная с учетом размеров механизма, влияющих на закон движения звеньев. Кинематическая схема не отражает внешних конструктивных форм механизма, но дает полное представление о характере движения звеньев и способе их соединения между собой.

На структурных и кинематических схемах звенья обозначают арабскими цифрами, начиная с входного (на модели оно определяется наличием рукоятки), стойку обозначают цифрой «0». Кинематические пары обозначают прописными латинскими буквами. Вращательную кинематическую пару, образованную подвижным звеном со стойкой, обозначают буквой «O» с нижним индексом, соответствующим номеру подвижного звена.

Степень подвижности механизма – число независимых обобщенных координат механизма. Для механизмов с независимыми от времени (стационарными) связями степень подвижности равна

числу обобщенных координат, или числу простых движений, поданных на входное звено (входные звенья).

Для плоских рычажных механизмов степень подвижности определяется по формуле П.Л. Чебышева

$$W = 3n - 2p_5 - p_4,$$

где n – число подвижных звеньев механизма; p_5 – число кинематических пар 5-го класса в механизме; p_4 – число пар 4-го класса в механизме.

При использовании формулы П.Л. Чебышева следует исключать пассивные, избыточные связи и лишние степени свободы.

Задачи структурного анализа механизма:

1. Определение количества, класса, порядка и вида структурных групп Ассур, входящих в состав механизма, и последовательности их соединения.
2. Определение количества начальных механизмов.
3. Составление структурной формулы механизма.
4. Определение класса механизма.

Механизм любой сложности может быть представлен в виде начального механизма (состоящего из стойки и входного звена) и присоединенных к нему структурных групп Ассур.

Структурная группа – это плоская элементарная кинематическая цепь, содержащая только низшие кинематические пары и имеющая нулевую подвижность по отношению к системе, к которой она присоединяется ($W_{zp} = 0$ в присоединенном состоянии).

Соотношение между числом подвижных звеньев n и числом низших кинематических пар в структурной группе p_5 определяется следующей зависимостью:

$$p_5 = \frac{3n}{2},$$

n – целое и четное;

p_5 – целое.

n	2	4	6	8	...
p_5	3	6	9	12	...

Начальный механизм – это плоская одноподвижная кинематическая цепь, состоящая из одного неподвижного звена (стойки) и одного подвижного звена ($n = 1$) соединенных между собой низшей кинематической парой пятого класса ($p_5 = 1$).

Класс группы определяется наибольшим числом кинематических пар, которые входят в состав группы и образуют замкнутый контур (рис. 1.5., табл. 1.1).

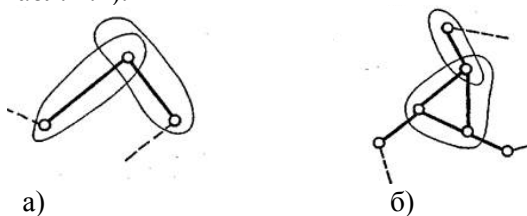


Рис. 1.5. Примеры структурных групп: а — II класса; б — III класса

Для определения порядка структурной группы необходимо различать **внутренние** и **внешние** кинематические пары. К внутренним кинематическим парам структурной группы относят такие, которыми звенья группы соединяются между собой. К внешним относят пары, которыми группа присоединяется к оставшейся части механизма.

Порядок структурной группы определяется количеством внешних кинематических пар (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Классы и порядок структурных групп

Схема группы	Замкнутый контур	Класс контура	Класс группы	Порядок группы
		2	2	2
		2	2	2

		2	3	3
	3			
		2	3	3
	3			
		3	4	2
	2			
	4			

Структурные группы 2-го класса делятся на виды.

Вид структурной группы 2-го класса определяется взаимным расположением вращательных и поступательных пар в группе (рис. 1.6).

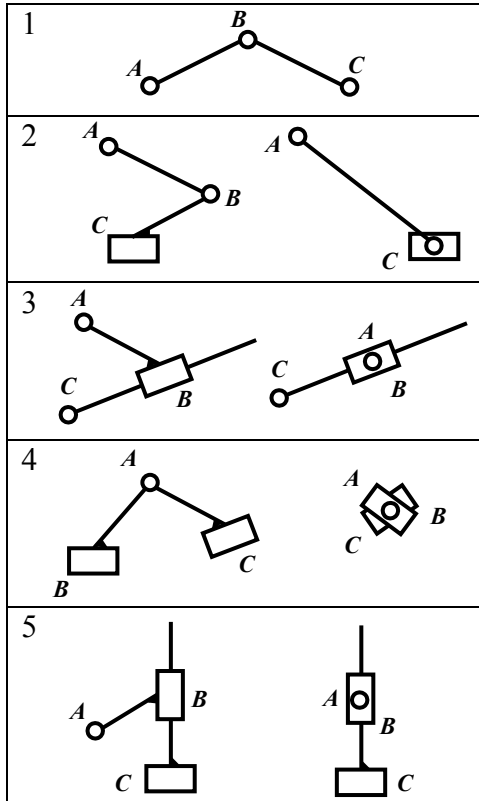


Рис 1.6. Виды структурных групп 2-ого класса:
 1 – 1-й вид (ВВВ); 2 – 2-й вид (ПВВ/ВВП); 3 – 3-й вид (ВПВ);
 4 – 4-й вид (ПВП); 5 – 5-й вид (ППВ/ВПП)

Класс механизма определяют по наивысшему классу входящей в его состав структурной группы.

Порядок проведения структурного анализа

1. На структурной схеме механизма обозначаются звенья и кинематические пары.

2. Определяется степень подвижности механизма и сравнивается с числом простых движений, выполняемых входными звеньями. Если входные звенья выполняют только по одному простому движению должно выполняться условие $W = n_{вх}$. Если оно не выполняется, то это свидетельствует о наличии в механизме пассивных звеньев или лишних кинематических связей. Такие звенья и связи не учитываются при определении степени подвижности механизма, поэтому схема механизма от них освобождается.

3. Выделяется структурная группа наиболее удаленная от начального механизма. При этом выделенная структурная группа должна быть наименьшего класса.

4. Проверяется соответствие структурной группы следующим условиям:

- степень подвижности структурной группы равняется нулю ($W_{zp} = 0$);
- число подвижных звеньев четное ($n - \text{четное}$);
- соблюдается соотношение $p_5 = \frac{3n}{2}$;
- степень подвижности оставшейся части механизма после отделения группы не изменяется ($W = \text{const}$).

Если перечисленные условия выполняются, то определяются класс, порядок и вид структурной группы. Если хотя бы одно из условий не выполняется, то осуществляется попытка отделить другую группу или переход к выделению структурной группы более высокого класса.

5. В результате проведения структурного анализа в рассматриваемом механизме определяется количество структурных групп и начальных механизмов.

6. Составляется структурная формула механизма и определяется его класс.

ПРИМЕР СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Структурная схема механизма конвейера с учетом условных обозначений звеньев и кинематических пар представлена на рис. 1.6.

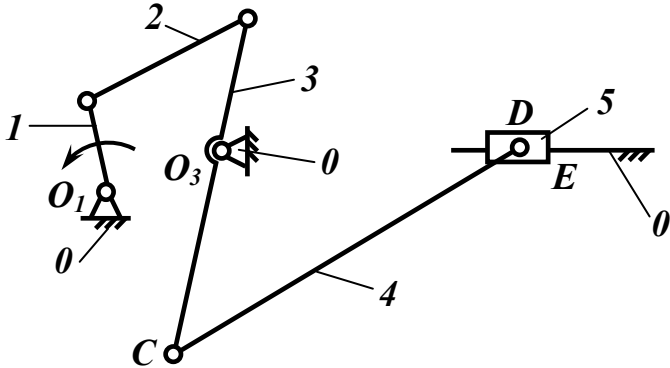


Рис. 1.6. Механизм конвейера

Для механизма, представленного на рис. 1.6, кинематические пары O_1, A, B, D, O_3 – вращательные, т.е. цилиндрические шарниры, а кинематические пары C, E – поступательные. Траектории подвижных осей шарниров: A – окружность; B – дуга окружности; D – горизонтальная прямая.

Основные характеристики механизма сведены в таблицы 1.2, 1.3 и 1.4.

Таблица 1.2

Подвижные звенья механизма

Звенья	1	2	3	4	5
Характер движения	Вращательное	Сложное плоское	Возвратно-вращательное	Сложное плоское	Возвратно-поступательное

Таблица 1.3

Кинематические пары в механизме

Обозначение пары	Звенья кинематической пары	Вид кинематической пары	Особые свойства
O_1	1, 0	В	-
A	1, 2	В	-
B	2, 3	В	-
C	3, 4	В	-
D	4, 5	В	-
E	5, 0	П	-
O_3	3, 0	В	-

Примечание. В - вращательная, П – поступательная; в столбце «особые свойства» следует указывать кулисные пары и двойные шарниры (вокруг оси шарнира вращается более двух звеньев)

Таблица 1.4

Шарниры с подвижными осями

Обозначение шарнира	A	B	C	D
Вид траектории оси	Окружность	Дуга окружности	Дуга окружности	Горизонтальная прямая

Определяется степень подвижности механизма. В механизме, представленном на рис 1.6: $n = 5$; $p_5 = 7$; $p_4 = 0$ (нет высших пар):

$$W = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 - 0 = 1; \quad W = n_{\text{ex}} = 1.$$

Следовательно, достаточно задать закон движения только одному звену для определенности движения относительно стойки всех остальных подвижных звеньев механизма.

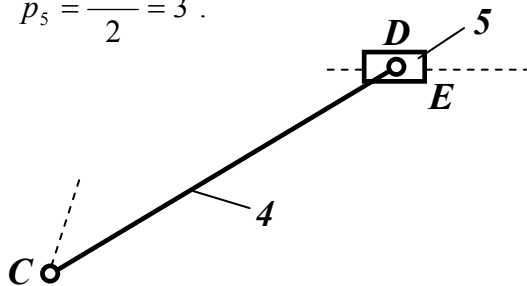
Выделяется структурная группа, наиболее удаленная от начального механизма. В данном механизме такой группой является группа, в состав которой входят звенья 5 и 4. В группе: $n = 2$; $p_5 = 3$.

Данная группа соответствует всем четырем признакам группы Ассура.

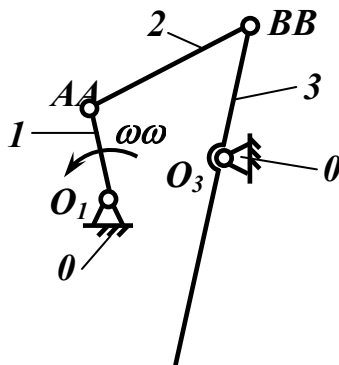
$$1. \quad W_{zp} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0.$$

$$2. \quad n = 2 - \text{четное.}$$

$$3. \quad p_5 = \frac{3 \cdot 2}{2} = 3.$$



4. Рассматривается оставшаяся часть механизма и определяется ее степень подвижности: $n_{ex} = 1$; $n = 3$; $p_5 = 4$; $p_4 = 0$ (нет высших пар).



$$W = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1.$$

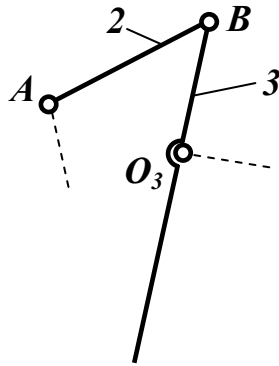
Подвижность оставшейся части механизма не изменилась, поэтому рассматриваемая группа является группой Ассур, в нашем случае она II-ого класса, 2-ого порядка и 2-ого вида (ВВП).

От оставшейся части механизма отсоединяется следующая структурная группа, состоящая из 3 и 2 звеньев. В группе: $n = 2$; $p_5 = 3$.

$$W_{ep} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0.$$

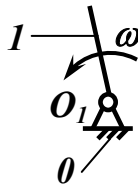
$n = 2$ – четное.

$$p_5 = \frac{3 \cdot 2}{2} = 3.$$



Рассматриваемая группа является группой II-ого класса, 2-ого порядка и I-ого вида (ВВВ).

Рассматривается оставшаяся часть механизма и определяется ее степень подвижности: $n_{ex} = 1$; $n = 1$; $p_5 = 1$; $p_4 = 0$ (нет высших пар).



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

Звенья 0 и 1 образуют начальный механизм I-го класса, I-го порядка.

Таким образом анализ показал, что в состав механизма входят две структурные группы второго класса и один начальный механизм. Наивысший класс групп 2-й, следовательно, механизм относится ко 2-му классу.

6. Структурная формула рассматриваемого механизма имеет вид: $I \rightarrow II_{21} \rightarrow II_{22}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие звенья наиболее характерны для плоских рычажных механизмов?
2. Каковы признаки рычажного механизма?
3. Какое звено механизма называют входным?
4. Какое звено называют кулисой?
5. Какую кинематическую пару называют кулисной?
6. Укажите кулису в рассматриваемом механизме.
7. Чем отличается кулисный камень от ползуна?
8. Назовите звенья кинематически не связанные со стойкой?
9. Каковы характерные признаки низших кинематических пар?
10. Каковы характерные признаки высших кинематических пар?
11. Критерий определения класса кинематической пары?
12. Могут ли в плоском рычажном механизме присутствовать высшие кинематические пары?
13. Как определить кратность шарнира в плоском механизме?
14. Что называют кинематической цепью?
15. Какую кинематическую цепь называют механизмом?
16. Что называют степенью подвижности механизма?
17. Какие звенья в механизме называют пассивными?
18. Какие связи в механизме называют лишними?
19. Как определить, есть ли в составе механизма пассивные звенья или лишние связи.
20. К какому классу относится кинематическая пара винт-гайка?
21. Что называют структурной схемой механизма?
22. В чем отличие кинематической схемы от структурной?
23. Каковы задачи структурного анализа?
24. Какие кинематические цепи называют структурными группами (группами Л.В. Ассура)?
25. В каком соотношении находятся число звеньев и кинематических пар в структурной группе?
26. Назовите минимальное количество звеньев, к которым может быть присоединена структурная группа?
27. Как определяются класс и порядок структурной группы?
28. По какому признаку определяется вид структурной группы второго класса?
29. Каков порядок структурного анализа механизма?

30. Может ли одна кинематическая пара в механизме принадлежать двум структурным группам?

31. Может ли плоский рычажный механизм иметь нечетное число звеньев?

32. Для чего нужны пассивные звенья в механизмах?

33. Как выполняют структурный анализ механизма, в составе которого есть пассивные звенья?

34. В каком соотношении находится число степеней свободы механизма и число простых движений, подаваемых на его входные звенья?

35. Чем отличаются высшие кинематические пары от низших?

36. Структурные группы какого класса называют диадными?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чмиль, В.П. Теория механизмов и машин [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / В.П. Чмиль. – Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. – 280 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/91896>.

2. Бардовский, А.Д. Прикладная механика : теория механизмов и машин [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.Д. Бардовский, Б.В. Воронин, П.Я. Бибииков, М.Н. Вьюшина. – Электрон. дан. – Москва: МИСИС, 2015. – 96 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/93621>.

3. Теория механизмов и машин. Сборник задач [Электронный ресурс]: учебное пособие / под ред. Чернышевой И.Н. – Электрон. дан. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 63 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/58502>.

ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

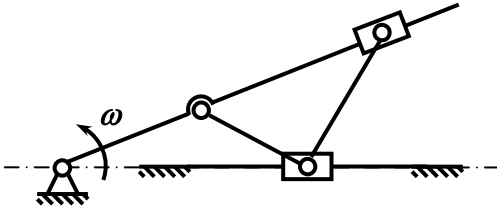


Рис. П1. Механизм трисектора

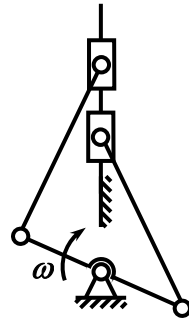


Рис. П2. Механизм двухцилиндрового рядного четырехтактного двигателя внутреннего сгорания

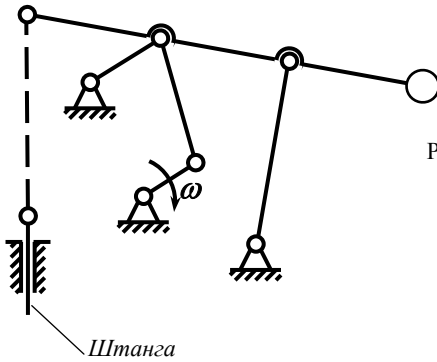


Рис. П3. Механизм привода глубинного насоса

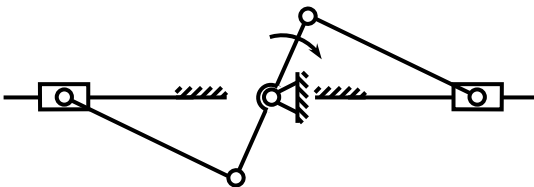
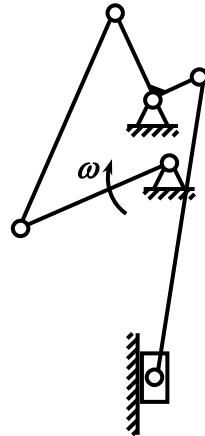


Рис. П4. Механизм двухцилиндрового оппозитного четырехтактного двигателя внутреннего сгорания



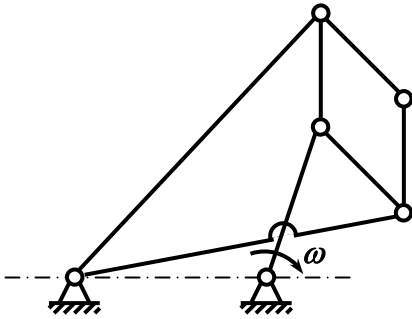


Рис. П6. Механизм Липкина

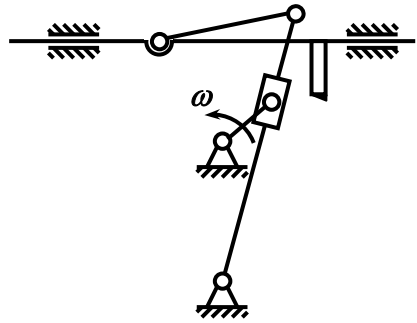


Рис. П7. Механизм поперечно-строгального станка

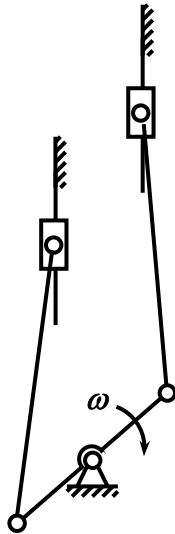


Рис. П8. Механизм двухступенчатого двухцилиндрового воздушного компрессора

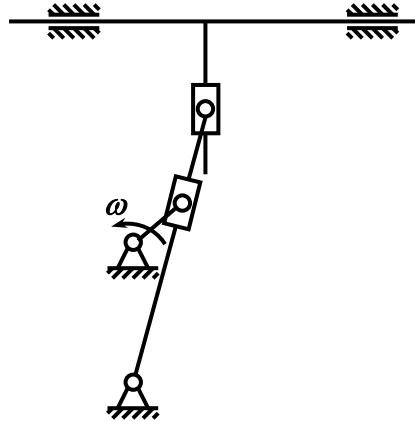


Рис. П9. Механизм поперечно-строгального станка

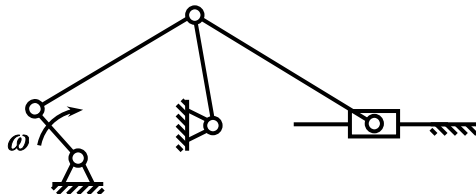


Рис. П10. Механизм качающегося конвейера

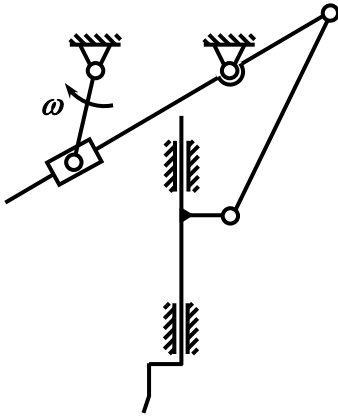


Рис. П11. Механизм долбежного станка

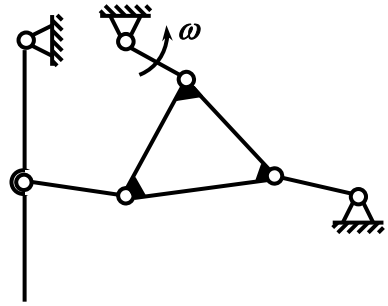


Рис. П12. Механизм дробилки

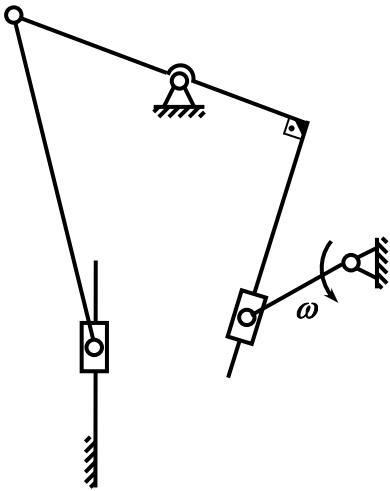


Рис. П13. Механизм водяного насоса

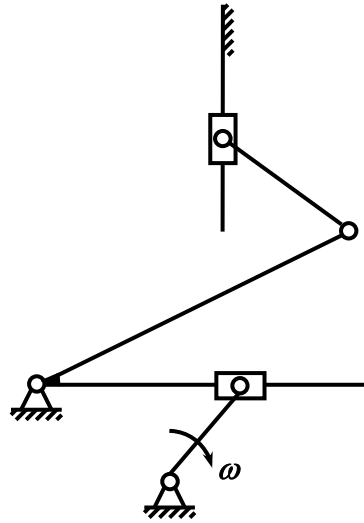


Рис. П14. Механизм перемещения долбяка



Рис. П15. Механизм перемещения резца

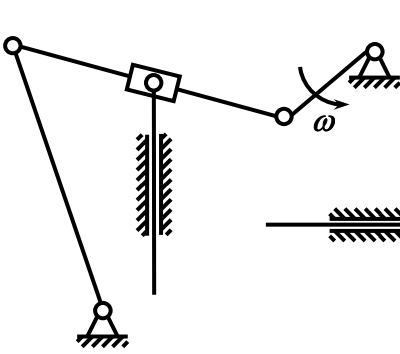


Рис. П16. Механизм плунжерного насоса

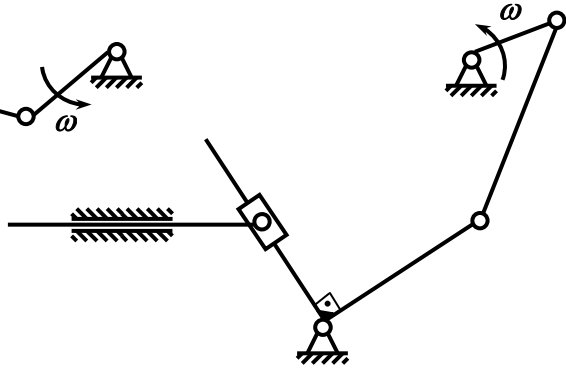


Рис. П17. Механизм подачи затвора

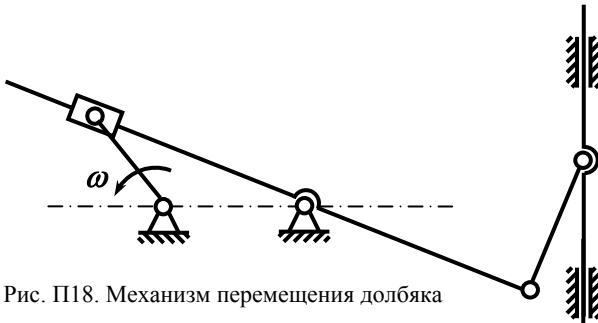


Рис. П18. Механизм перемещения долбняка

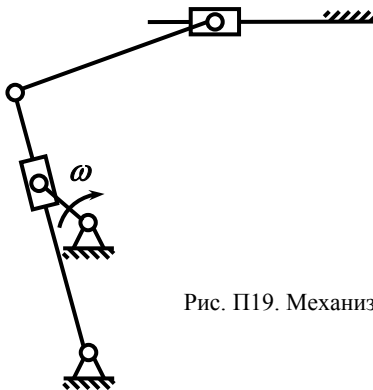


Рис. П19. Механизм перемещения резца

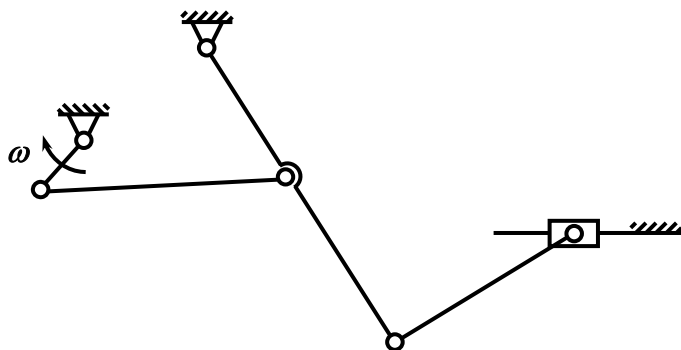


Рис. П20. Механизм перемещения желоба

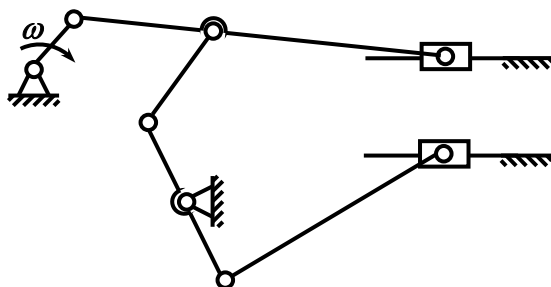


Рис. П21. Механизм двигателя

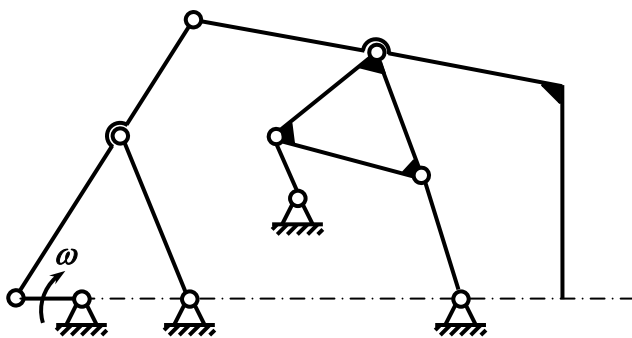


Рис. П22. Механизм Чебышева

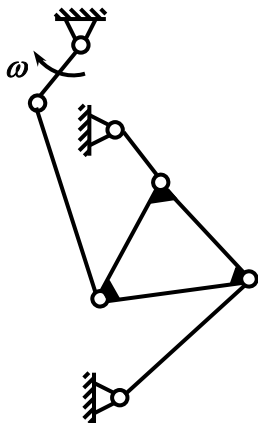


Рис. П23. Механизм Робертса

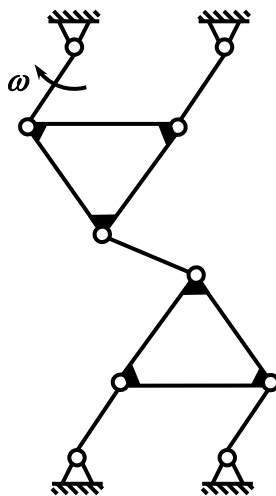


Рис. П24. Механизм привода электровоза

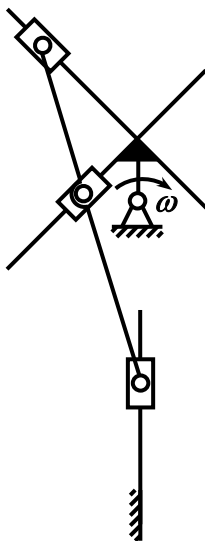


Рис. П25. Механизм привода иглы швейной машины

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Основные понятия и определения.....	4
Пример структурного анализа.....	14
Контрольные вопросы.....	18
Библиографический список.....	19
Приложение.....	20

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА
СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ
РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА

*Методические указания к самостоятельной работе
для студентов всех направлений бакалавриата и специальностей*

Сост.: *А.В. Большунов, А.Ю. Кузькин*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
машиностроения

Ответственный за выпуск *А.В. Большунов*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 02.12.2019. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,5. Усл.кр.-отт. 1,5. Уч.-изд.л. 1,2. Тираж 75 экз. Заказ 1013. С 326.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2