

## **ОПД.Ф.02.03 ТЕОРИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**

Конспект лекций

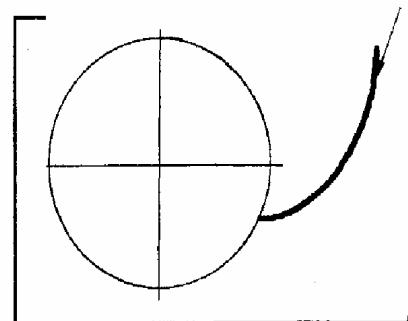
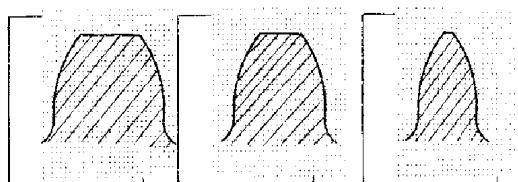
В конспекте лекций рассмотрены основные разделы курса, приведены рисунки, схемы, формулы, алгоритмы и основные определения. В конце каждой темы даны вопросы для самопроверки с ответами и задачи для самостоятельного решения. Предназначен для студентов механических специальностей всех форм обучения при изучении теоретической части курса и выполнении курсового проекта по теории механизмов и машин.

# ТЕМА 1: СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ

1. История развития ТММ. Основные понятия (машина, механизм, звено, кинематическая пара).

Леонардо Да Винчи (1452 – 1519 )

Леонард Эйлер (1707 – 1783)



Эвольвента

Чебышев Пафнутий Львович (1821 – 1894)

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

Сомов П.О. (1852- 1919) и Малышев А.П. (1879-1962)

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1$$

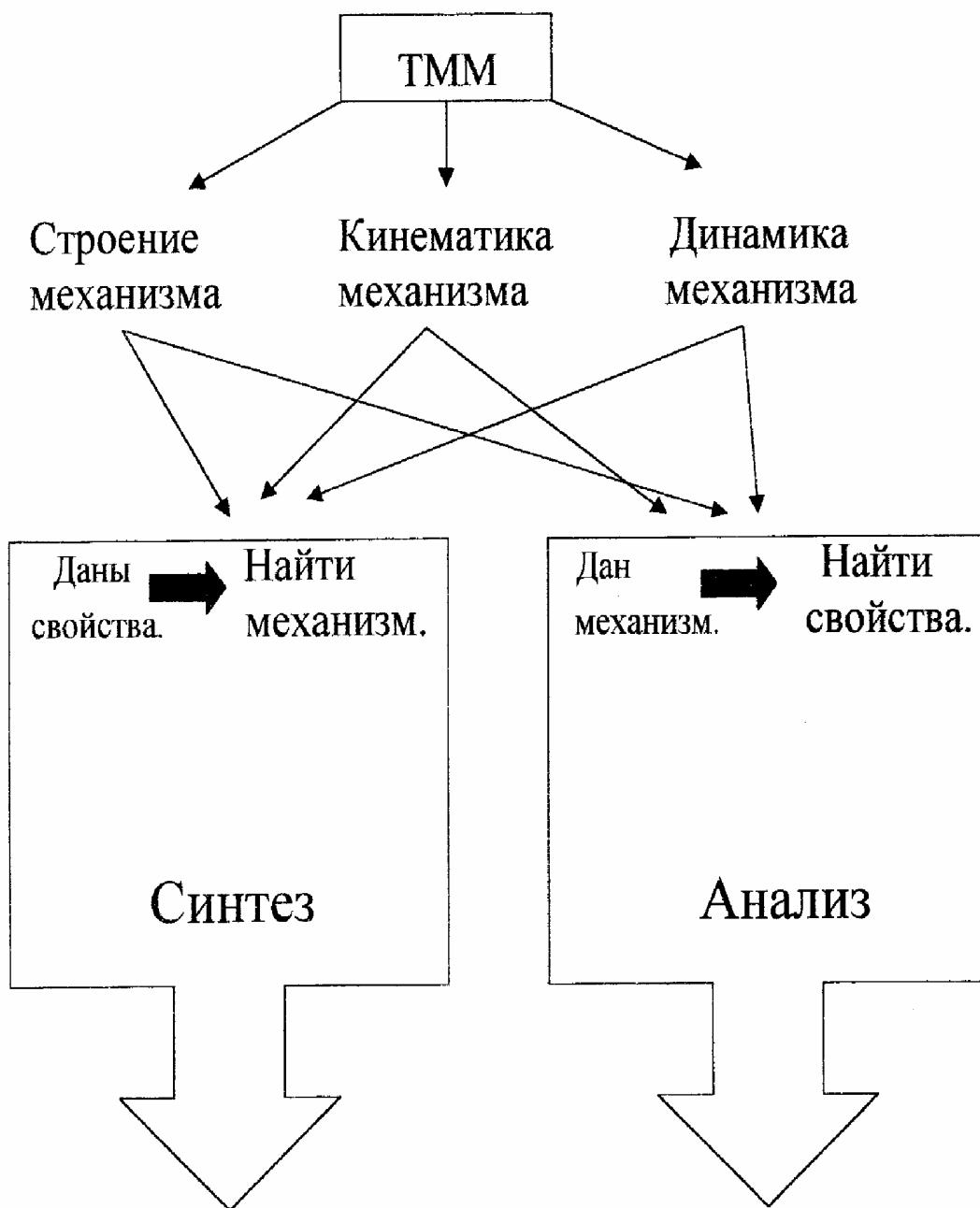
Р. Виллис (1800 – 1875)

$$\begin{matrix} (j) & (H) \\ U_{iH} = 1 - U_{ij} \end{matrix}$$

i –подвижное колесо, j – неподвижное колесо, H - водило

Ассур Л.В. (1878 – 1920)

Вопросы, которые изучает наука «ТММ».



## Основные понятия.

Машина – это устройство, предназначенного для преобразования:

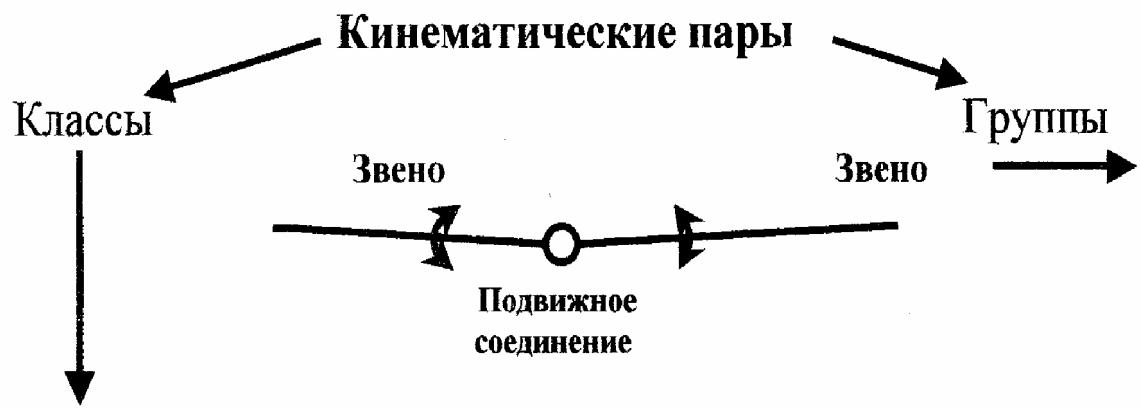
- энергии (двигатель внутреннего сгорания, турбина ),
- информации (ЭВМ),
- материалов (токарный станок, пилорама, пресс, кран).

Каждая машина состоит чаще всего из нескольких механизмов.

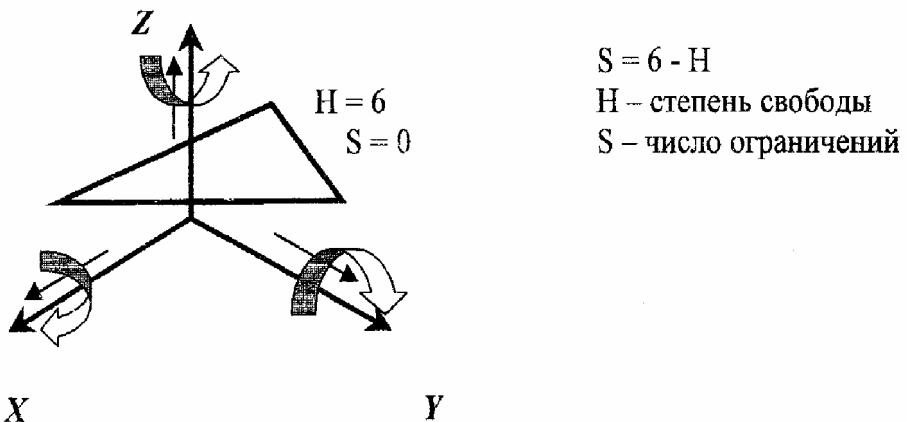
Механизм- это система тел, предназначенных для преобразования одного вида движения в другой вид движения. Механизм состоит из звеньев:

- ползун – совершает возвратно-поступательное движение,
- кривошип – совершает вращательное движение,
- шатун – совершает сложное плоско-параллельное движение,
- коромысло (качающееся звено) – совершает неполный оборот вокруг оси,
- кулиса – звено совершающее поступательное, вращательное или качательное движение, по которому перемещается ползун,
- стойка – неподвижное звено любого механизма.

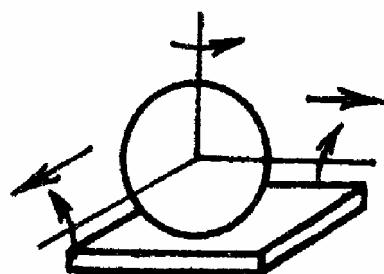
Звенья в механизме соединяются между собой подвижным соединением. Это соединение звеньев называется кинематической парой. Если соединяются два звена, то будет одна кинематическая пара. Если соединяются три звена, то будет две кинематических пары. Если соединяются  $N$  звеньев, то будет  $N-1$  кинематическая пара (сложный шарнир).



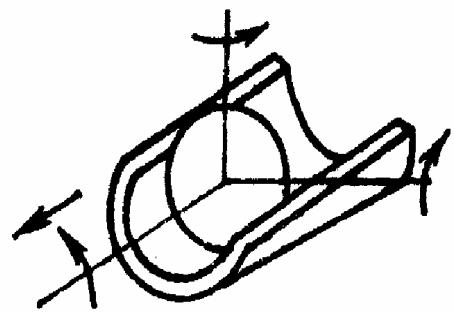
Класс кинематической пары =  $S$  (числу ограничений).



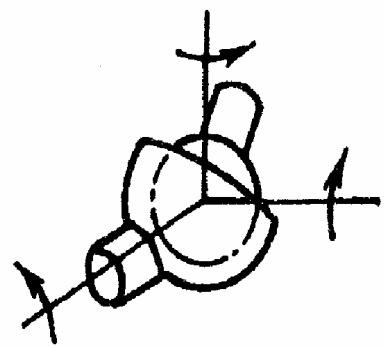
1. Шар – плоскость:       $H = 5; S = 1$ ; класс 1.



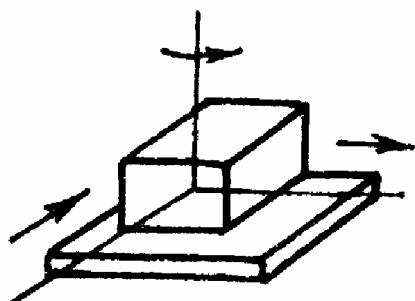
2. Шар – цилиндр:  $H = 4$ ;  $S = 2$ ; класс 2.



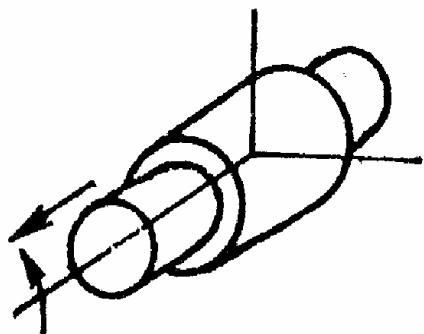
3. Сферическая:  $H = 3$ ;  $S = 3$ ; класс 3.



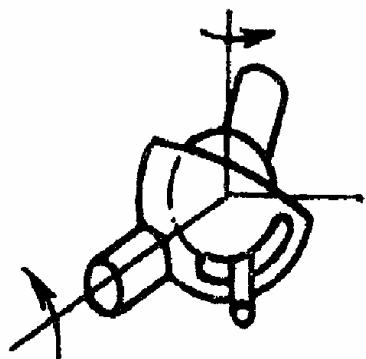
4. Плоскостная:  $H = 3$ ;  $S = 3$ ; класс 3.



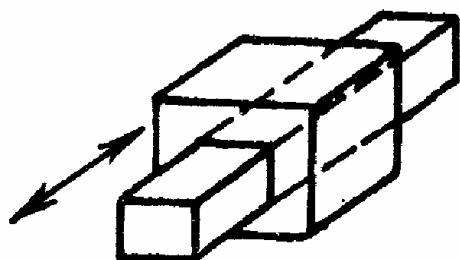
5. Цилиндрическая:  $H = 2$ ;  $S = 4$ ; класс 4.



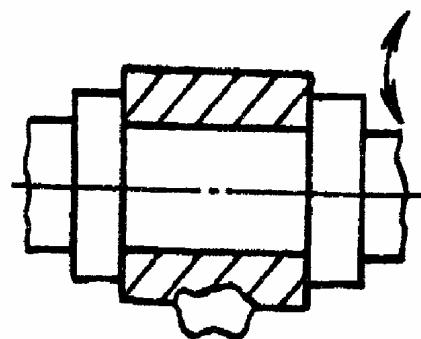
6. Сферическая с пальцем:  $H = 2$ ;  $S = 4$ ; класс 4.



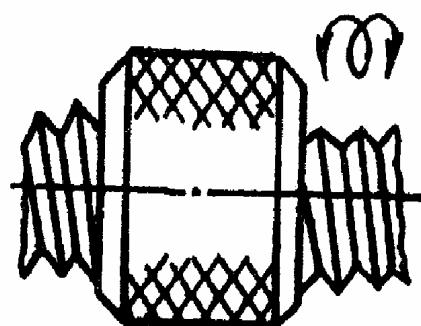
7. Поступательная:  $H = 1$ ;  $S = 5$ ; класс 5.



8. Вращательная :  $H = 1$ ;  $S = 5$ ; класс 5.



9. Винтовая:  $H = 1$ ;  $S = 5$ ; класс 5.



### Группы кинематических пар

Высшие кинематические пары – контакт между звёнями происходит по линии или в точке.

Низшие кинематические пары- контакт между звеньями происходит по поверхности.

## 2. Степень подвижности плоских и пространственных механизмов.

### Плоский механизм

1869 год. П.Л. Чебышев

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

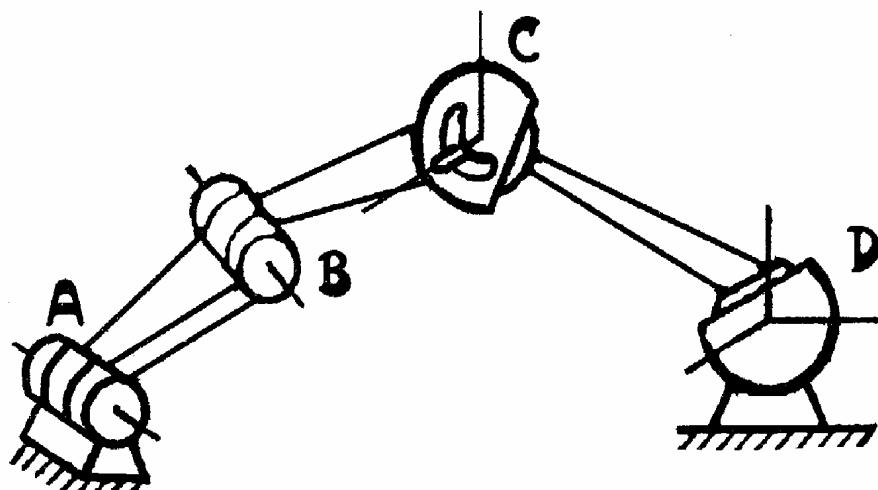
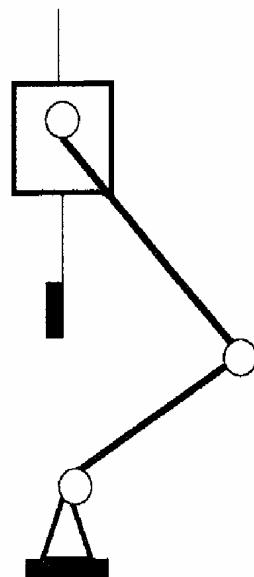
$n$  – число подвижных звеньев,

$p_5$  – число кинематических пар 5-го класса,

$p_4$  - число кинематических

пар 4-ого класса,

$W$  = степень подвижности механизма.

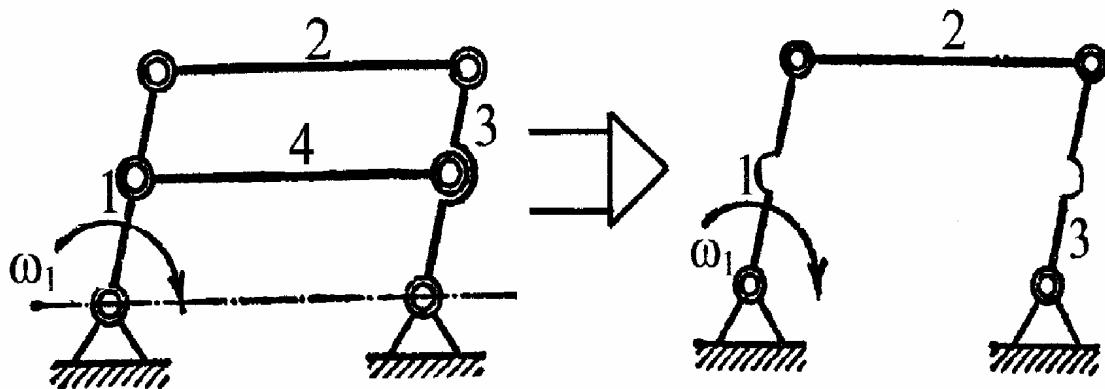


### Пространственный механизм

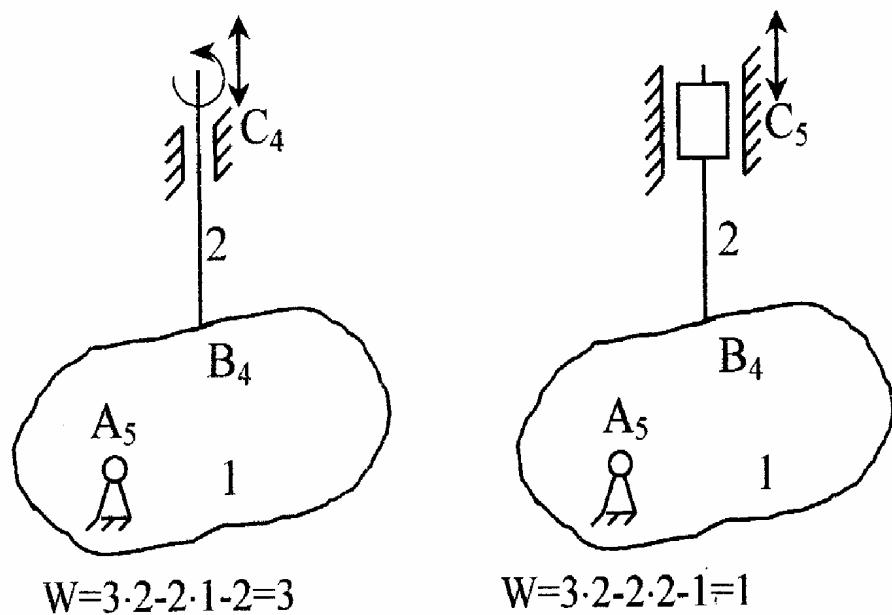
Сомов П.О., Малышев А.П.

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1$$

### 3. Пассивные связи. Лишние степени свободы.

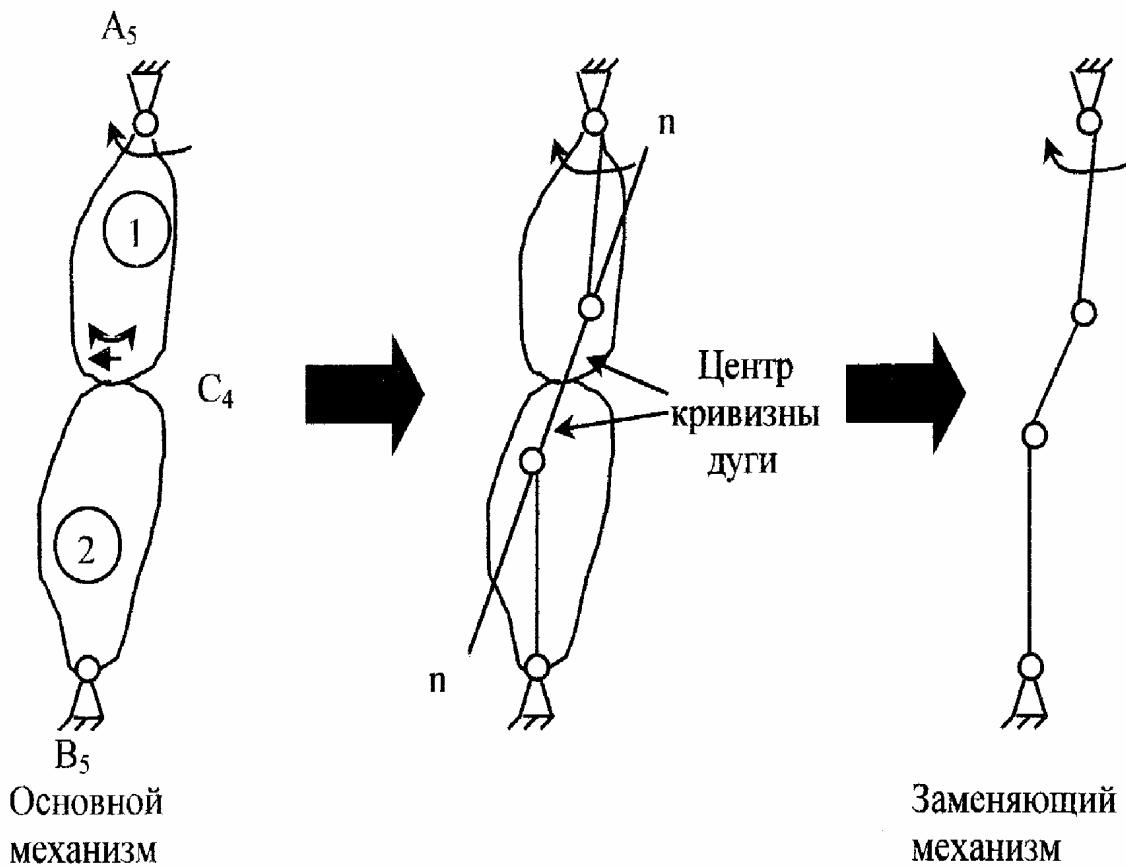


Звено 4 – пассивная связь. Его удаление не влияет на характер движения механизма.



Вращение звена 2 в кинематической паре  $C_4$  – лишняя степень свободы.

#### 4. Замена высших кинематических пар низшими кинематическими парами.

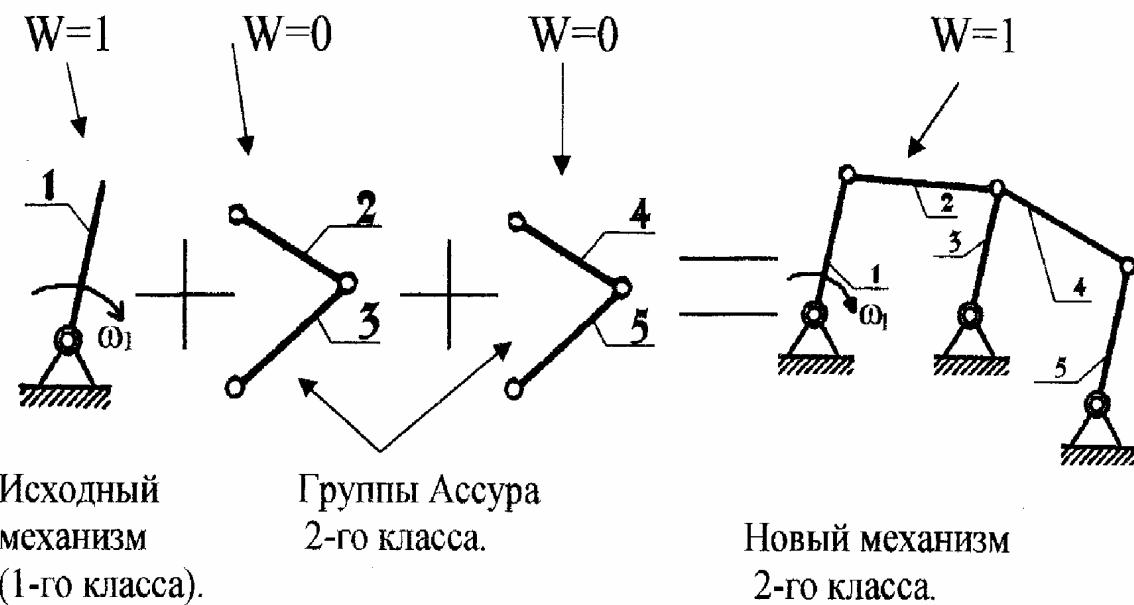


#### Алгоритм замены высших кинематических пар на низшие:

1. Через точку касания высшей кинематической пары провести нормаль.
2. На нормали в центре кривизны кривых поставить низшие кинематические пары и соединить их звеном.
3. Полученные низшие кинематические пары соединить звеньями с имеющимися низшими кинематическими парами.
4. В заменяющем механизме степень подвижности должна быть такой же как и в основном механизме.

## 5. Принцип образования плоских механизмов.

(Ассур Л.В., Артоболевский И.И.)



Класс механизма = наивысшему классу группы Ассура, входящей в состав механизма.

Цель структурного анализа механизма - определить класс механизма: разложить его на исходный механизм и группы Ассура, определив их класс.

Группа Ассура – кинематическая цепь с нулевой степенью подвижности, которая не распадается на более простые кинематические цепи, также обладающие нулевой степенью подвижности.

## 6. Классификация групп Ассура.

Класс	Признак	Схемы групп Ассура					Порядок
II		1	2	3	4	5	2
		Виды групп					
III							3
IV							2

Группы Ассура бывают: 2-го, 3-его и 4-го классов.

Порядок группы Ассура определяется числом элементов, которыми она присоединяется.

Группа Ассура 2-го класса состоит из двух звеньев,  
3-его и 4-го классов – из четырех звеньев.

## 7. Алгоритм проведения структурного анализа:

1. Начертить кинематическую схему механизма.
2. Обозначить все подвижные звенья механизма.
3. Заглавными буквами латинского алфавита обозначить все кинематические пары и класс кинематической пары.
4. Определить степень подвижности механизма.
5. Удалить лишние степени свободы (если они есть).
6. Удалить пассивные связи (если они есть).
7. Заменить высшие кинематические пары на низшие.
8. Отсоединить от механизма группу Ассура 2-го класса (два звена), так чтобы: оставшийся механизм продолжал работать, а степень его подвижности ( $W$ ) не менялась (оставалась прежней).
9. Если нельзя отсоединить группу Ассура 2-го класса, то отсоединить группу Ассура 3-го класса (четыре звена) так, чтобы: оставшийся механизм продолжал работать, а  $W$  не менялась.
10. Если нельзя отсоединить группу Ассура 3-го класса, то отсоединить группу Ассура 4-го класса, так, чтобы: оставшийся механизм продолжал работать, а  $W$  механизма не менялась.
11. Класс механизма определяем по наивысшему классу группы Ассура, входящей в состав механизма.

## 8. Вопросы для самопроверки.

1. Кто из выдающихся деятелей культуры эпохи Возрождения разработал проекты конструкций механизмов ткацких станков, печатных машин ?  
Ответ: Леонардо да Винчи (1452-1519).
2. Действительный член Петербургской Академии наук XVIII века, автор 850 научных трудов, в том числе: «О машинах вообще» (1753 г) и «Принципы теории машин»?  
Ответ: Леонард Эйлер (1707-1783).
3. Какой русский механик впервые разработал проект двухцилиндрового парового двигателя и осуществил в 1765 году его испытание?  
Ответ: Ползунов Иван Иванович.
4. Именем какого русского ученого названа структурная формула плоских механизмов?  
Ответ: Чебышев Пафнутий Львович.
5. “Отец русской авиации”, который был не только основоположником современной аэродинамики, но и автор целого ряда работ по прикладной механике и теории регулирования хода машин?  
Ответ: Жуковский Николай Егорович.
6. Автор учебников, академик, организатор советской школы теории механизмов и машин, зав. кафедрой ТММ в МАИ ?  
Ответ: Артоболевский Иван Иванович.
7. Что такое звено механизма? Ответ: твёрдое тело, состоящее из одной или нескольких деталей.
8. Что такое анализ механизма? Ответ: исследование структурных, кинематических или динамических свойств механизма.
9. Из чего состоит механизм?  
Ответ: из отдельных звеньев.
10. Как называется каждая подвижная деталь или группа деталей, образующих одну жесткую систему тел в механизме?  
Ответ: подвижное звено механизма.
11. Как называются неподвижные детали, которые образуют одну жесткую неподвижную систему тел в механизме?  
Ответ: неподвижное звено (стойка).

12. Сколько неподвижных звеньев в механизме?  
Ответ: 1.
13. Чем отличается механизм от кинематической цепи?  
Ответ: наличием стойки.
14. Как называется соединение двух соприкасающихся звеньев, допускающее их относительное движение?  
Ответ: кинематическая пара.
15. Как называется система звеньев, связанных между собой кинематическими парами?  
Ответ: кинематическая цепь.
16. Чему равен максимальный класс кинематической пары?  
Ответ: 5.
17. Чему равно число условий связи, если число степеней свободы звеньев кинематической пары равно 5?  
Ответ:  $S = 6 - H = 6 - 5 = 1$
18. Чему равно число условий связи, если число степеней свободы звеньев кинематической пары равно 4?  
Ответ:  $S = 2$
19. Чему равно число условий связи, если число степеней свободы звеньев кинематической пары равно 3?  
Ответ:  $S = 3$ .
20. Чему равно число условий связи, если число степеней свободы звеньев кинематической пары равно 1?  
Ответ:  $S = 5$ .
21. Назовите максимальное число условий связи?  
Ответ:  $S=5$ .
22. Назовите максимальное число степеней свободы звена кинематической пары в относительном движении?  
Ответ:  $H = 5$ .
23. Чему равно число степеней свободы, если число условий связи равно 1?  
Ответ:  $H = 5$ , так как  $H = 6 - S$ .
24. Чему равно число степеней свободы, если число условий связи равно 2?  
Ответ:  $H = 4$ .

25. Чему равно число степеней свободы, если число условий связи равно 4?

Ответ:  $H = 2$ .

26. Чему равно число степеней свободы, если число условий связи равно 5?

Ответ:  $H = 1$ .

27. Как называется кинематическая пара, если её звенья соприкасаются по поверхности?

Ответ: низшая кинематическая пара.

28. Как называется кинематическая пара, если её звенья соприкасаются по линии или в точке?

Ответ: высшая кинематическая пара.

29. Напишите формулу Чебышева П. Л.

Ответ:  $W = 3n - 2p_5 - p_4$ .

30. Как называется кинематическая цепь, степень свободы которой равна нулю?

Ответ: ферма.

31. Как влияют лишние степени свободы на закон движения ведомого звена и однозначность его перемещения?

Ответ: никак.

32. Напишите название кинематической пары, которая представляет собой шар, перекатывающийся со скольжением по плоскости

Ответ: шар – плоскость.

33. Напишите класс кинематической пары, которая представляет собой шар, перекатывающийся со скольжением по плоскости.

Ответ: 1 класс.

34. Как называется кинематическая пара, представляющая собой цилиндр, лежащий на плоскости?

Ответ: высшая кинематическая пара 2-го класса.

35. Напишите формулу Сомова-Малышева.

Ответ:  $W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1$ .

36. Начертите условное изображение пары:  
шар-плоскость.

37. Начертите условное изображение пары:  
сферическая (шаровая).

38. Начертите условное изображение пары:  
плоскостная.
39. Начертите условное изображение пары:  
цилиндрическая.
40. Начертите условное изображение пары:  
сферическая с пальцем.
41. Начертите условное изображение пары:  
поступательная.
42. Начертите условное изображение пары:  
вращательная.
43. Начертите условное изображение пары:  
винтовая.
44. Как классифицируют кинематические пары?  
Ответ: по числу S (условий связи).  $S = 6 - H$ .
45. Название пары, допускающей относительное вращательное  
движение звеньев вокруг оси?  
Ответ: вращательная пара.
46. Название пары, допускающей лишь прямолинейное  
поступательное относительное движение звеньев?  
Ответ: поступательная пара.
47. Название пары, допускающей независимые вращательное и  
поступательное относительные движения звеньев?  
Ответ: цилиндрическая пара.
48. Название пары, допускающей три независимых относительных  
вращения звеньев, вокруг осей x, y, z.  
Ответ: сферическая пара.

49. Как называется механизм, все подвижные звенья которого движутся в параллельных плоскостях?

Ответ: плоский механизм.

50. Как называется механизм, подвижные звенья которого описывают траектории, лежащие в пересекающихся плоскостях?

Ответ: пространственный механизм.

51. Что произойдет, если  $S=6$ ?

Ответ: кинематическая пара становится жестким соединением деталей, т.е. одним звеном.

52. Что произойдет, если  $S=0$ ?

Ответ: пары не существует, а имеются 2 тела, движущихся независимо друг от друга.

53. Что представляет собой механизм 1-го класса?

Ответ: это механизм, состоящий из подвижного звена и стойки.

54. Чему равно число механизмов 1-го класса в механизме?

Ответ: число механизмов 1-го класса равно числу степеней свободы механизма.

55. Как называется звено, совершающее полный оборот вокруг неподвижной оси?

Ответ: кривошип.

56. Как называется подвижное звено (вращающееся, качающееся или движущееся возвратно-поступательно), которое является направляющей ползуна?

Ответ: кулиса.

57. Что такое группа Ассура?

Ответ: это кинематическая цепь с нулевой степенью подвижности, которая не распадается на более простые кинематические цепи, также обладающие нулевой степенью подвижности.

58. Какое число звеньев должно быть в группе Ассура?

Ответ: чётное (2 или 4).

59. На что подразделяются группы Ассура?

Ответ: на классы, порядки и виды

60. Чем определяется порядок групп Ассура?

Ответ: числом элементов, которыми она присоединяется.

61. В каком году Ассур сформулировал принцип образования плоских механизмов?

Ответ: 1914г.

62. Для каких механизмов подходит формула Чебышева для подсчёта степени подвижности?
- Ответ: для плоских.
63. Что можно определить при помощи следующей формулы:  
 $W = 3n - 2p_5 - p_4$ ?
- Ответ: степень подвижности плоского механизма.
64. В каких механизмах все звенья перемещаются в одной или параллельных плоскостях?
- Ответ: в плоских.
65. В каких механизмах звенья перемещаются в пересекающихся плоскостях?
- Ответ: в пространственных.
66. Что в формуле Чебышева обозначается как  $p_4$ ?
- Ответ: число кинематических пар 4-го класса.
67. Что в формуле Чебышева обозначается как  $p_5$ ?
- Ответ: число кинематических пар 5-го класса.
68. Что определяет формула Сомова-Малышева?
- Ответ: степень подвижности пространственного механизма.
69. Как определить число кинематических пар в сложном шарнире?
- Ответ: подсчитать число соединяемых звеньев (подвижных и неподвижных) и вычесть единицу.
70. Что изучает ТММ?
- Ответ: строение, кинематику и динамику машин и механизмов при их анализе и синтезе.
71. Что такое машина?
- Ответ: устройство для преобразования энергии, информации и материала.
72. Что такое механизм?
- Ответ: система звеньев, которая предназначена для преобразования одного движения в другое.
73. Какое звено называется шатун?
- Ответ: звено, совершающее сложное плоско параллельное движение.
74. Какое звено называется ползун?
- Ответ: звено, совершающее поступательное прямолинейное движение.
75. Какое звено называется коромысло?

Ответ: звено, которое совершает неполный оборот вокруг оси, связанной со стойкой.

76. Чем отличается звено механизма от детали механизма?

Ответ: звено механизма состоит из одной или нескольких деталей.

77. Какое звено называется стойкой?

Ответ: неподвижные детали, которые образуют одну жесткую неподвижную систему тел в механизме

78. Что такое кинематическая цепь?

Ответ: система звеньев, связанных между собой кинематическими парами.

79. Что такое кинематическая пара?

Ответ: подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев.

80. Сколько классов кинематических пар Вы знаете?

Ответ: пять классов.

81. Напишите алгоритм определения класса кинематической пары.

Ответ: подсчитать число простейших движений, которыми обладает звено кинематической пары в относительном движении; вычесть полученное число из шести, получив при этом число связей, налагаемых данной кинематической парой на относительное движение её звеньев, и этим определим класс пары.

82. Определите класс кинематической пары, образованной звеньями:  
шар – плоскость.

Ответ:  $S = 6 - H = 6 - 5 = 1$ , 1 класс.

83. Определите класс кинематической пары, образованной звеньями:  
плоскость – цилиндр.

Ответ:  $S = 6 - H = 6 - 4 = 2$ , 2 класс.

84. Алгоритм замены высшей кинематической пары на низшую.

Ответ: проводим нормаль через точку касания кривых и отмечаем на ней центры кривизны кривых, образующих вращательные пары, в которых соединяются условные звенья.

85. С какой целью удаляют из механизма пассивные связи?

Ответ: чтобы упростить механизм, так как пассивные связи не оказывают никакого влияния на характер движения механизма.

86. С какой целью удаляют из механизма лишние степени свободы?

Ответ: чтобы упростить механизм.

87. С какой целью конструктора применяют в механизмах пассивные связи?

Ответ: для повышения его жесткости или для устранения неопределенности движения звеньев в некоторых положениях.

88. С какой целью конструктора применяют в механизмах лишние степени свободы?

Ответ: для уменьшения сил трения и износа звеньев.

89. Принцип образования плоских механизмов.

Ответ: последовательное присоединение кинематических цепей, являющимися группами Ассура.

90. Что такое механизм первого класса?

Ответ: это механизм с одной степенью свободы, состоящий из стойки и подвижного звена.

91. Алгоритм структурного анализа механизма.

Ответ: Построить кинематическую схему механизма. Обозначить все подвижные звенья механизма. Заглавными буквами латинского алфавита обозначить все кинематические пары и класс кинематической пары. Удалить лишние степени свободы (если они есть). Удалить пассивные связи (если они есть). Определить степень подвижности механизма. Заменить высшие кинематические пары на низшие. Отсоединить от механизма группу Ассура 2-го класса (два звена) так, чтобы: оставшийся механизм продолжал работать, а W не менялась. Если нельзя отсоединить группу Ассура 2-го класса, то отсоединить группу Ассура 3-го класса (четыре звена) так, чтобы: оставшийся механизм продолжал работать, а W не менялась. Если нельзя отсоединить группу Ассура 3-го класса, то отсоединить группу Ассура 4-го класса, так, чтобы: оставшийся механизм продолжал работать, а W механизма не менялась.

92. Цель структурного анализа механизма.

Ответ: определить класс механизма

93. Алгоритм определения степени подвижности плоского механизма по формуле Чебышева.

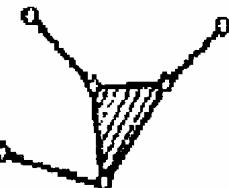
Ответ: определить число подвижных звеньев, определить число кинематических пар, определить среди них высшие и низшие, посчитать по формуле Чебышева степень подвижности.

94. Нарисуйте группу Ассура 4<sup>го</sup> класса.



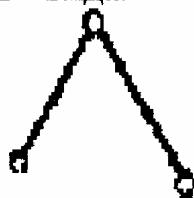
Ответ:

95. Нарисуйте группу Ассура 3<sup>го</sup> класса.



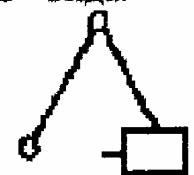
Ответ:

96. Нарисуйте группу Ассура 2<sup>го</sup> класса, 1<sup>го</sup> вида.



Ответ:

97. Нарисуйте группу Ассура 2<sup>го</sup> класса, 2<sup>го</sup> вида.



Ответ:

98. Нарисуйте группу Ассура 2<sup>го</sup> класса, 3<sup>го</sup> вида.



Ответ:

99. Нарисуйте группу Ассура 2<sup>го</sup> класса, 4<sup>го</sup> вида.



Ответ:

100. Нарисуйте группу Ассура 2<sup>го</sup> класса, 5<sup>го</sup> вида.



Ответ:

101. Как определяется класс механизма.

Ответ: по максимальному классу группы Ассура, входящей в механизм.

102. Назовите машины, с которыми Вы столкнетесь, работая по выбранной Вами специальности.

Ответ: двигатели внутреннего сгорания, гидротурбины и т.д.

103. Что это значит, если по формуле Чебышева Вы определили степень подвижности, и она равна 0.

Ответ: это значит, что ни одно звено не может двигаться относительно неподвижного звена, и кинематическая цепь превращается в ферму.

104. Что это значит, если по формуле Чебышева Вы определили степень подвижности, и она равна +2.

Ответ: это значит, что у механизма два ведущих звена.

105. Что это значит, если по формуле Чебышева Вы определили степень подвижности, и она равна -2.

Ответ:

106. Из скольких звеньев состоит группа Ассура 2<sup>го</sup> класса?

Ответ: 2.

107. Из скольких звеньев состоит группа Ассура 3<sup>го</sup> класса?

Ответ: 4.

108. Из скольких звеньев состоит группа Ассура 4<sup>го</sup> класса?

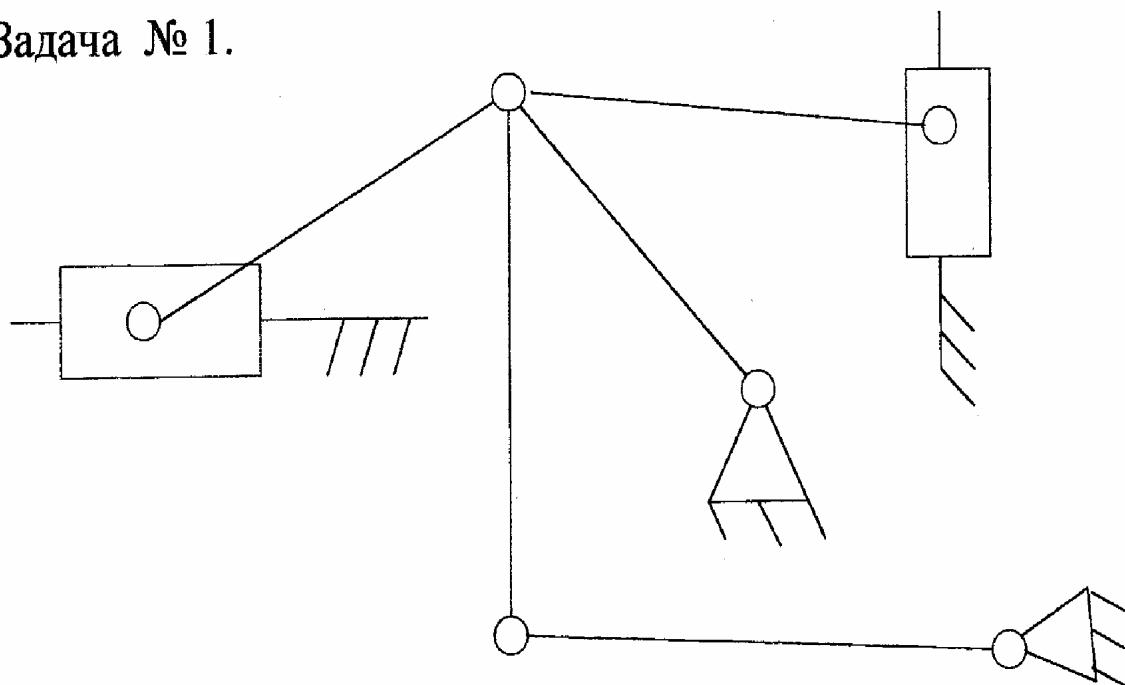
Ответ: 4.

109. Как определяется порядок группы Ассура?

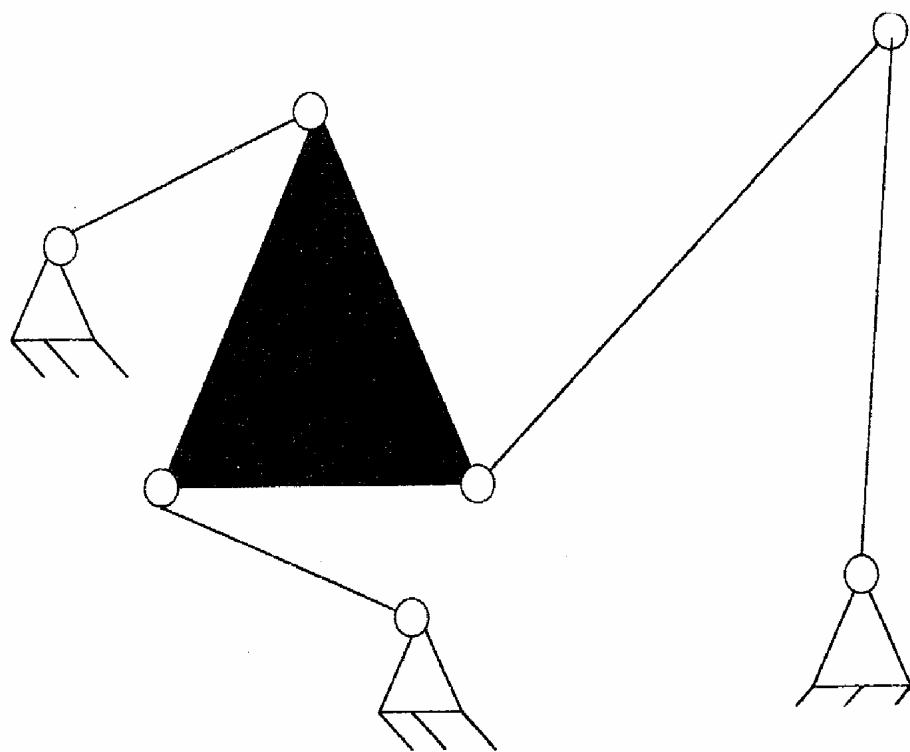
Ответ: порядок равен числу поводков, которыми группа Ассура присоединяется.

## 9. Задачи для самостоятельного решения.

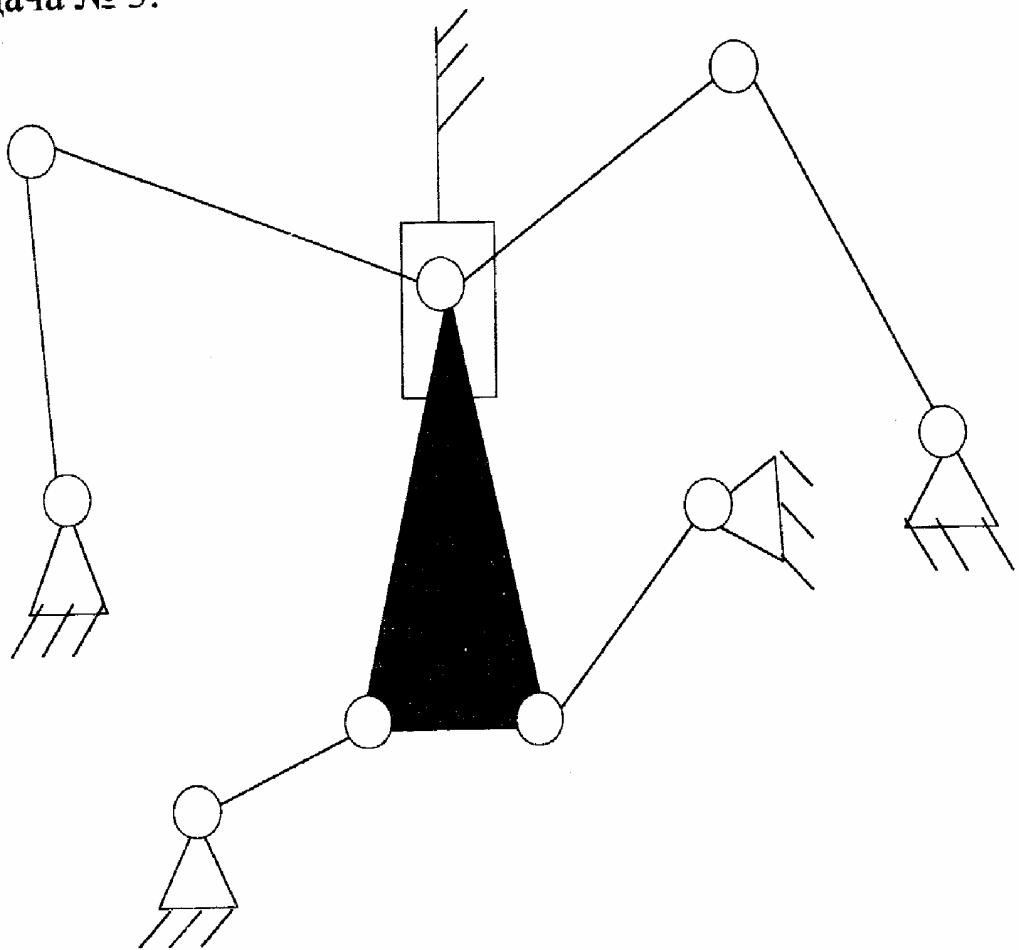
Задача № 1.



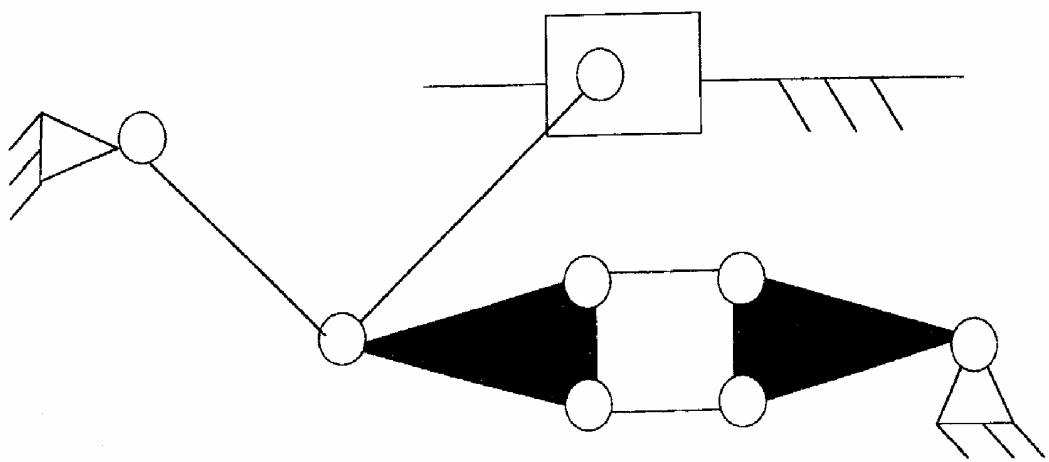
Задача № 2.



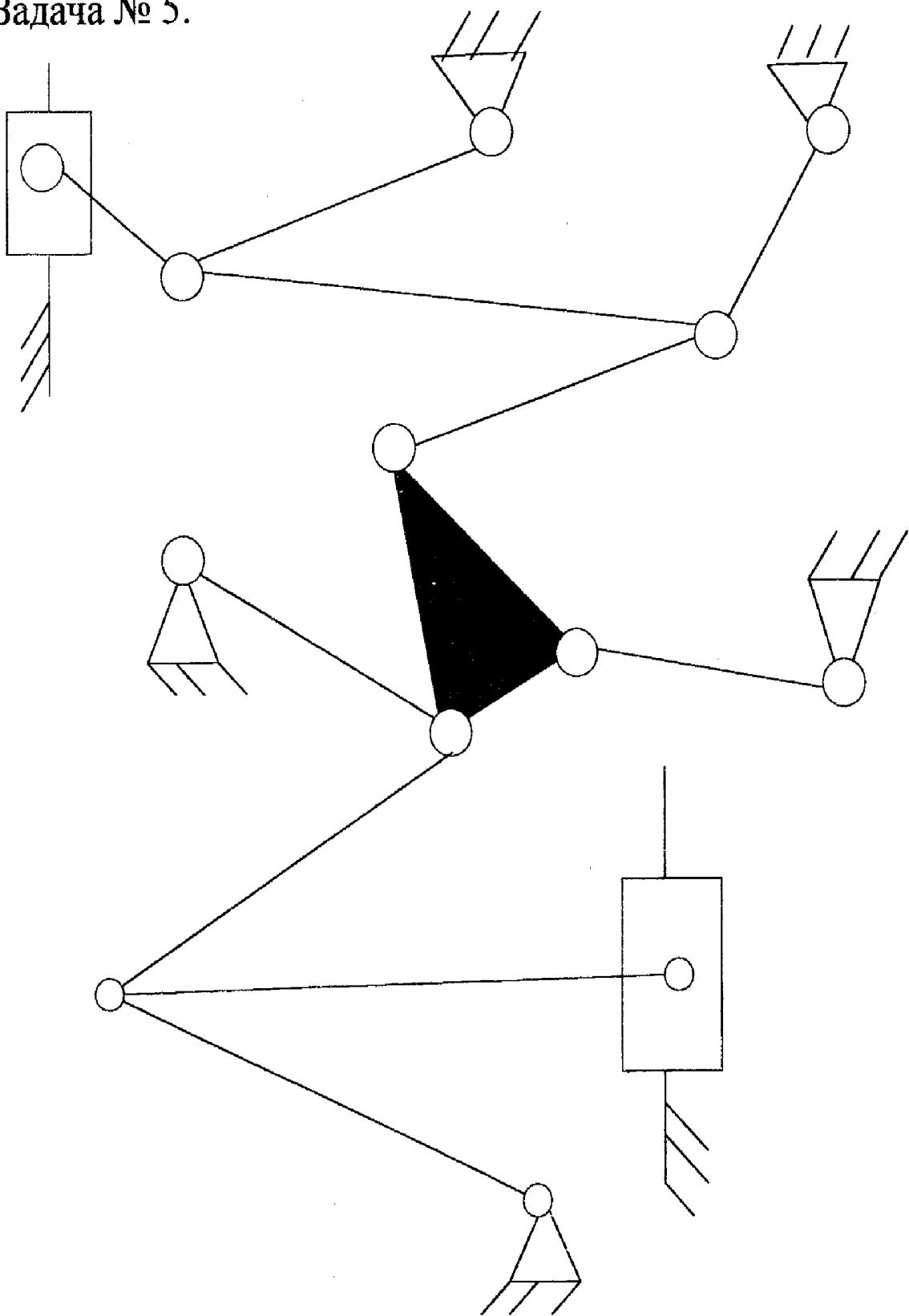
Задача № 3.



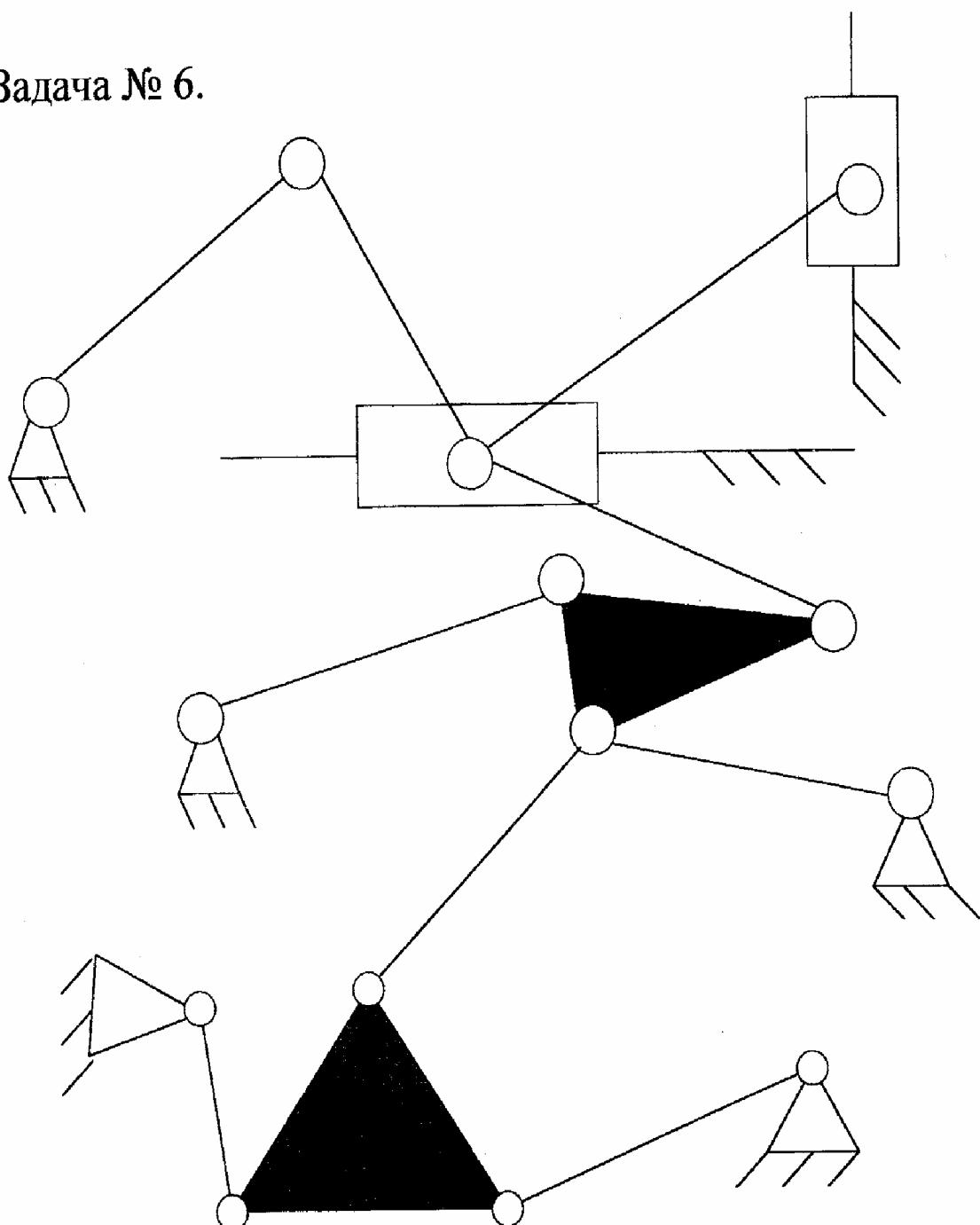
Задача № 4.



Задача № 5.



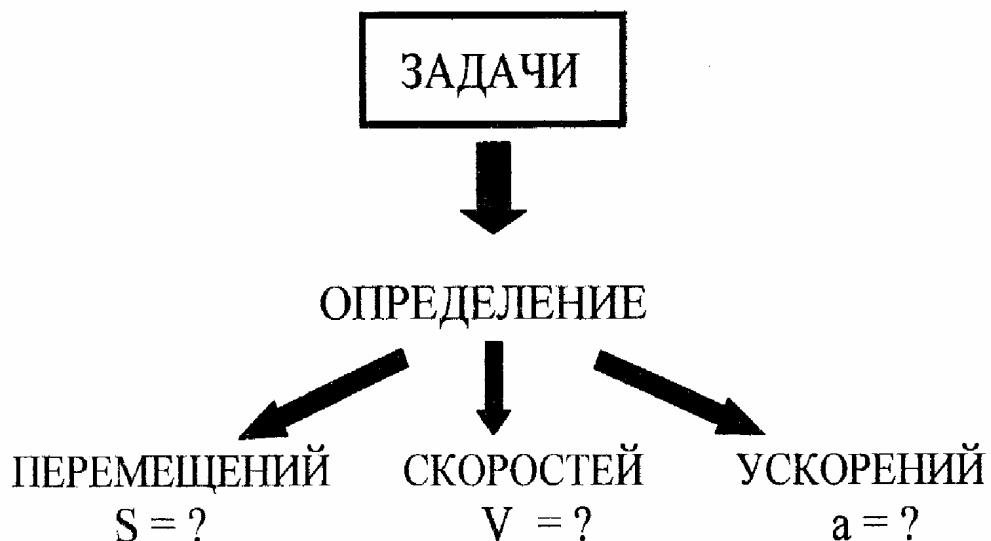
**Задача № 6.**



## ТЕМА 2: КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ

### 1. Цель и задачи кинематического анализа

Цель: изучить движение звеньев механизма без учета сил, вызывающих это движение.

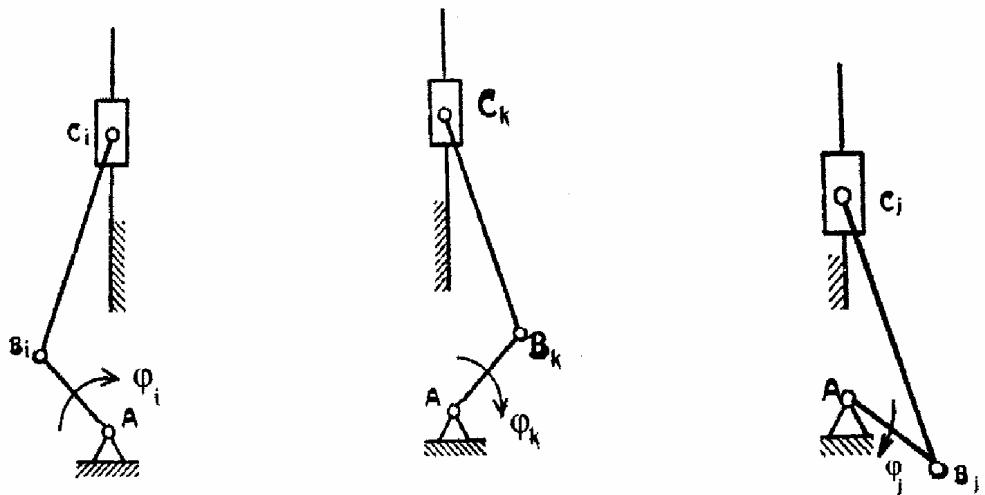


### 2. Масштабы в ТММ

$$\mu = \frac{\text{Действительная величина}}{\text{Отрезок в мм на чертеже}} = \frac{\text{м}}{\text{мм}}, \frac{\text{м/с}}{\text{мм}}, \frac{\text{м/с}^2}{\text{мм}}, \frac{\text{Н}}{\text{мм}}, \frac{\text{Нм}}{\text{мм}}$$

ГОСТ	1-й ряд	2-й ряд
1	0,0001 ... 1000	2,5
2	0,0002...	4
5	0,0005...500	

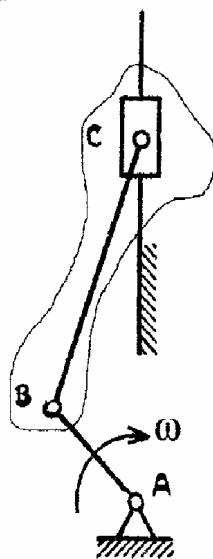
### 3. Определение перемещений: $S = ?$



### 4. Определение скоростей : $V = ?$

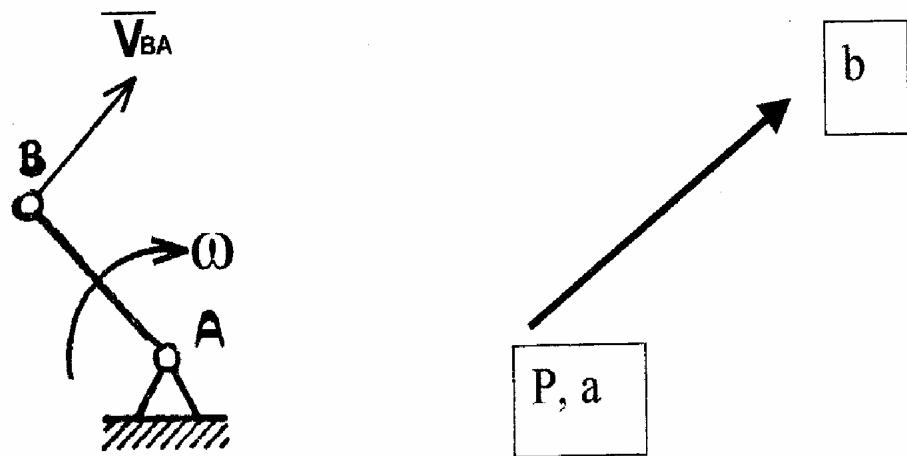
Алгоритм:

Шаг 1: провести структурный анализ



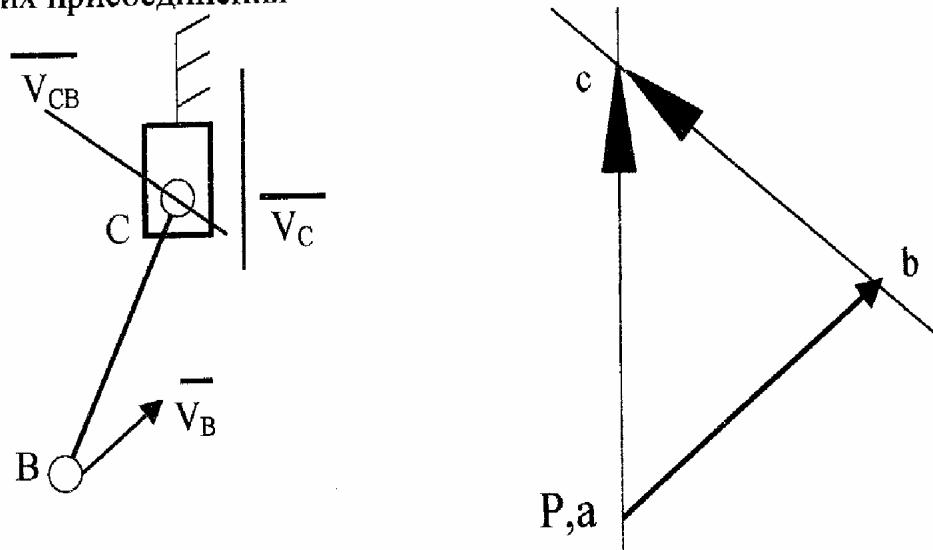
Шаг 2: определить скорости для ведущего звена механизма.

$$V_A = 0, \quad \overline{V_B} = \overline{V_A} + \overline{V_{BA}} = \overline{V_{BA}},$$



$$V_B = w \cdot L_{BA}$$

Шаг 3: определить скорости для каждой группы Ассура в порядке их присоединения

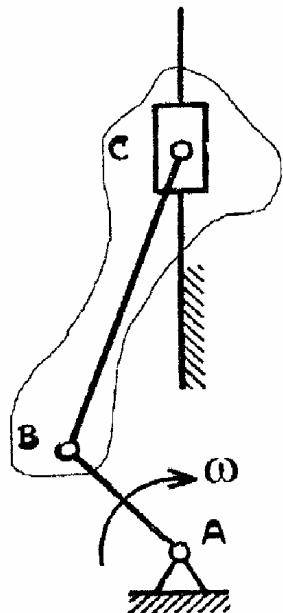


$$\overline{V_C} = \overline{V_B} + \overline{V_{CB}}$$

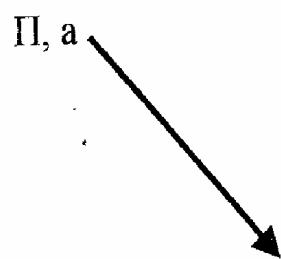
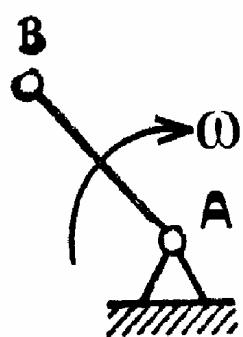
## 5. Определение ускорений: $a = ?$

Алгоритм:

Шаг 1: провести структурный анализ механизма



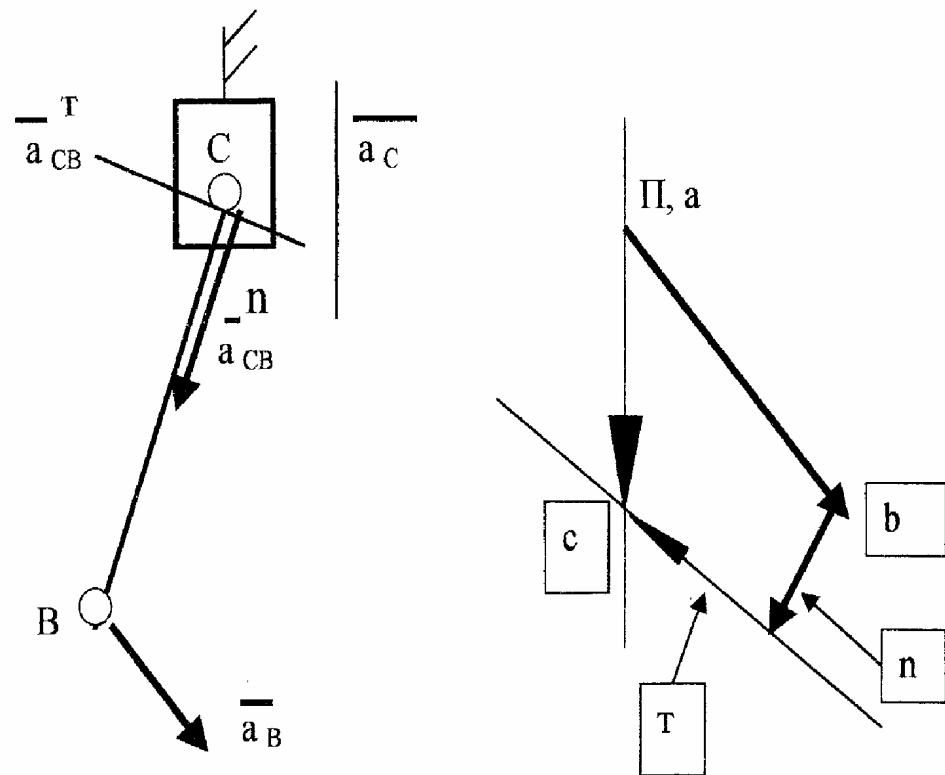
Шаг 2: определить ускорения для ведущего звена



$$\bar{a}_B = \bar{a}_A + \bar{a}_{BA} = \bar{a}_{BA}, \quad a_A = 0,$$

$$a_{BA}^n = w^2 \cdot L_{AB}, \quad a_{BA}^T = E \cdot L_{AB}, \quad E = 0, \quad \text{T.K. } w = \text{const.}$$

Шаг 3: определить ускорения для каждой группы Ассура

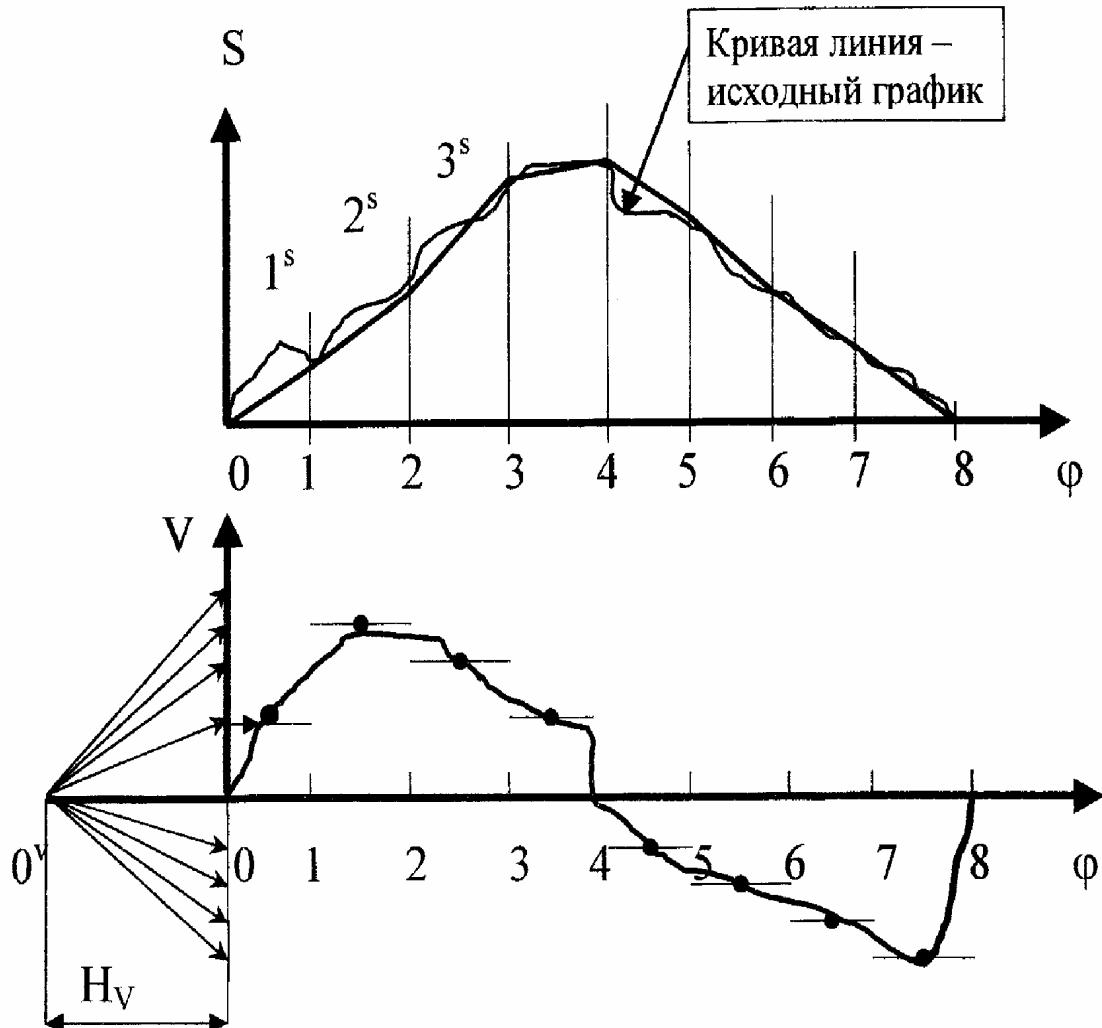


$$\bar{a}_C = \bar{a}_B + \bar{a}_{CB},$$

$$\bar{a}_C = \bar{a}_B + \frac{\bar{a}_{CB}}{n} + \frac{\bar{a}_{CB}^T}{a_{CB}}$$

## 6. Кинематические диаграммы.

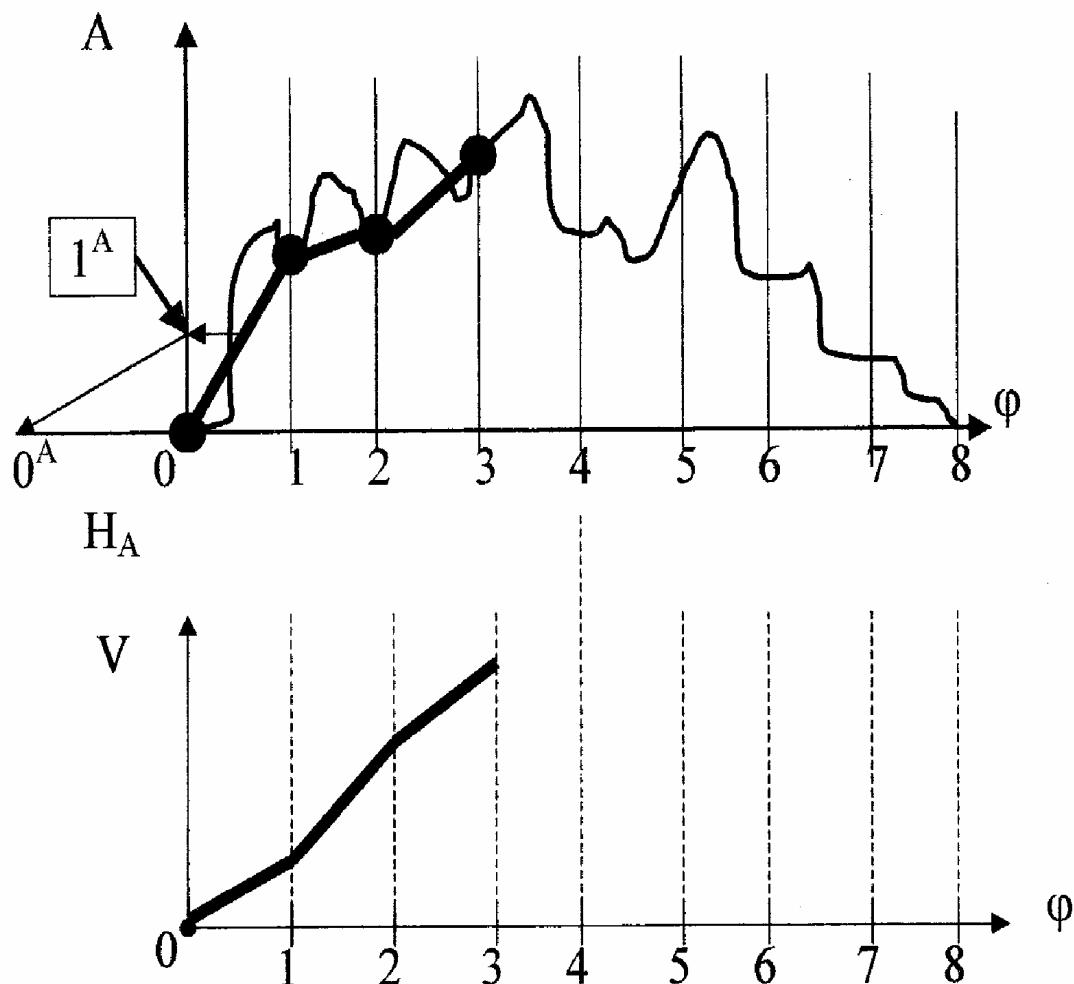
### Графическое дифференцирование



### Алгоритм

1. На 1-ом графике кривую линию на каждом участке заменяем прямой.
2. На 2-ом графике выбираем полюсное расстояние  $H_V = 20 \div 40$  мм.
3. Прямую  $01^s$  с 1-го графика параллельно переносим в точку  $0^v$  2-го графика до тех пор пока она не пересечёт ось  $V$ .  
Отрезок отсекаемый на оси  $V$  показывает значение скорости на участке  $(01)$  2-го графика.
4. Прямую  $1^s2^s$  с 1-го графика параллельно переносим в точку  $0^v$  2-го графика.
5. Аналогично поступаем на остальных участках.
6. Середины участков на 2-ом графике соединяем кривой линией.

## Графическое интегрирование



### Алгоритм

1. На 1-ом графике кривую линию на каждом участке заменяем прямой.
2. На 1-ом графике выбираем полюсное расстояние  $H_a = 20 \div 40$  мм.
3. Середину каждого участка на 1-ом графике параллельно сносим на ось а . Точку пересечения с осью а соединяем с точкой  $0^A$ .
4. Прямую  $0^A 1^A$  с 1-го графика параллельно переносим на участок 01 2- го графика.
5. На остальных участках поступаем аналогично.

## 7. Вопросы для самопроверки.

**1. Цель кинематического анализа механизма.**

Ответ: изучить движение звеньев механизма без учёта сил, вызывающих это движение.

**2. Как называются графики, построенные по полученным значениям кинематических величин?**

Ответ: кинематические диаграммы.

**3. Назовите численные значения масштаба.**

Ответ: 1, 2, 2.5, 4, 5.

**4. Как называется чертёж, на котором изображены в виде отрезков векторы, равные по модулю и по направлению ускорениям различных точек звеньев механизма в данный момент?**

Ответ: план ускорений.

**5. Единица измерения масштаба скорости?**

Ответ: м сек<sup>-1</sup> / мм.

**6. Напишите формулу для определения численного значения нормальной составляющей ускорения любой точки кривошипа.**

Ответ:  $a_n = w^2 \cdot R$

**7. Как определить направления угловой скорости звена?**

Ответ: угловая скорость и вектор относительной скорости направлены в одну сторону.

**8. Сделайте чертеж и напишите векторное уравнение для определения скорости любой точки кривошипа.**

Ответ:

**9. Скорость самолета 2500 км/час. А сколько метров самолет пролетает за одну секунду?**

Ответ: 694,4 м/сек.

**10. Скорость автомобиля 80 км/час. Какой путь автомобиль пройдет за одну секунду?**

Ответ: 22 м.

**11. Задачи КАМ.**

Ответ: определение перемещений звеньев и траекторий, описываемых точками звеньев; определение скоростей отдельных точек звеньев и угловых скоростей звеньев; определение ускорений отдельных точек звеньев и угловых ускорений звеньев.

**12. Понятие масштаба в ТММ?**

Ответ: Масштаб это отношение действительной величины к отрезку в мм, который изображает эту величину на чертеже.

**13. Алгоритм графического интегрирования.**

Ответ:

**14. Напишите формулу для определения численного значения скорости любой точки кривошипа.**

Ответ:  $V = w \cdot R$ .

**15. Чем задаётся положение ведущего звена, если оно входит в поступательную пару?**

Ответ: функцией перемещения  $s = s(t)$ .

**16. Как определить направления углового ускорения звена?**

Ответ: угловое ускорение направлено в сторону тангенциальной составляющей относительного ускорения.

**17. С какой целью определяют ускорения точек звеньев механизма?**

Ответ: например, для определения силы инерции.

**18. Сделайте чертеж и напишите векторное уравнение для определения ускорения любой точки кривошипа.**

Ответ:

**19. Скорость самолета 2400 км/час. А сколько метров самолет пролетает за одну секунду?**

Ответ: 666,7 м/сек.

**20. Скорость автомобиля 40 км/час. Какой путь автомобиль пройдет за одну секунду?**

Ответ: 10 м.

**21. Цель кинематического анализа механизма.**

Ответ: изучить движение звеньев механизма без учёта сил, вызывающих это движение.

**22. Алгоритм графического дифференцирования.**

Ответ:

**23. Для каких целей строят кинематические диаграммы?**

Ответ: для кинематического исследования механизма.

**24. Единица измерения масштаба времени?**

Ответ: сек / мм

**25. Чем определяется положение ведущего звена, если оно входит во вращательную пару, со стойкой?**

Ответ: функцией угла поворота  $\phi = \phi(t)$ .

**26. С какой целью определяют перемещения (траектории) точек звеньев механизма?**

Ответ: для построения кинематических диаграмм, а также для выбора размеров корпусных деталей при проектировании механизма.

**27. Сделайте чертеж и напишите векторное уравнение для определения скорости любой точки ползуна.**

Ответ:  $\overline{V}_B = \overline{V}_A + \overline{V}_{BA} = \overline{V}_A$

**28. Скорость самолета 2300 км/час. А сколько метров самолет пролетает за одну секунду?**

Ответ: 638,9 м/сек.

**29. Напишите формулу для определения угловой скорости  $w$  (рад./сек), если известна частота вращения  $n$  (об./мин.).**

Ответ:  $w = 2 \cdot \pi \cdot n / 60$

**30. Скорость автомобиля 90 км/час. Какой путь автомобиль пройдет за одну секунду?**

Ответ: 25 м.

**31. Задачи КАМ.**

Ответ:

**32. Как называется чертёж, на котором изображены в виде отрезков векторы, равные по модулю и по направлению скоростям различных точек звеньев механизма в данный момент?**

Ответ:

**33. Единица измерения масштаба длины?**

Ответ: м / мм.

**34. Напишите формулу для определения численного значения тангенциальной составляющей ускорения любой точки кривошипа.**

Ответ:  $a^t = E \cdot R$ .

**35. С какой целью определяют скорости точек звеньев механизма?**

Ответ: например, для выбора типа смазки.

- 36. Сделайте чертеж и напишите векторное уравнение для определения ускорения любой точки ползуна.**
- Ответ:
- 37. Напишите формулу для определения угловой скорости звена, если известна частота вращения.(об./мин.).**
- Ответ:
- 38. Скорость самолета 2200 км/час. А сколько метров самолет пролетает за одну секунду?**
- Ответ:
- 39. Скорость автомобиля 50 км/час. Какой путь автомобиль пройдет за одну секунду?**
- Ответ:
- 40. Скорость пули 200 м/сек. Сколько километров пуля пролетит за один час, если пренебречь сопротивлением воздуха и притяжением Земли?**
- Ответ: 720 км.
- 41. Цель кинематического анализа механизма.**
- Ответ:
- 42. Единица измерения масштаба угла поворота?**
- Ответ: град. / мм, или рад./мм.
- 43. Сделайте чертеж и напишите векторное уравнение для определения скорости любой точки шатуна.**
- Ответ:
- 44. Скорость самолета 2000 км/час. А сколько метров самолет пролетает за одну секунду?**
- Ответ:
- 45. Скорость автомобиля 60 км/час. Какой путь автомобиль пройдет за одну секунду?**
- Ответ:
- 46. Скорость пули 220 м/сек. Сколько километров пуля пролетит за один час, если пренебречь сопротивлением воздуха и притяжением Земли?**
- Ответ:
- 47. Спортсмен пробегает 100 метров за 10 сек. А сколько километров спортсмен мог бы пробежать за один час, если бы двигался с такой же скоростью?**
- Ответ: 36 км.

**48. Что такое кинематические диаграммы?**

Ответ: графики, построенные по полученным значениям кинематических величин.

**49. Что такое план скоростей?**

Ответ: чертёж, на котором изображены в виде отрезков векторы, равные по модулю и по направлению скоростям различных точек звеньев механизма в данный момент?

**50. Что такое план ускорений.**

Ответ: чертёж, на котором изображены в виде отрезков векторы, равные по модулю и по направлению ускорениям различных точек звеньев механизма в данный момент?

**51. Задачи КАМ.**

Ответ:

**52. Как называются графики, построенные по полученным значениям кинематических величин?**

Ответ:

**53. Понятие масштаба в ТММ?**

Ответ:

**54. Что такое графическое дифференцирование?**

Ответ:

**55. Как называется чертёж, на котором изображены в виде отрезков векторы, равные по модулю и по направлению скоростям различных точек звеньев механизма в данный момент?**

Ответ:

**56. Единица измерения масштаба угла поворота?**

Ответ:

**57. Сделайте чертеж и напишите векторное уравнение для определения ускорения любой точки шатуна.**

Ответ:

**57. Скорость самолета 1800 км/час. А сколько метров самолет пролетает за одну секунду?**

Ответ:

**58. Скорость автомобиля 70 км/час. Какой путь автомобиль пройдет за одну секунду?**

Ответ:

**59. Скорость пули 240 м/сек. Сколько километров пуля пролетит за один час, если пренебречь сопротивлением воздуха и притяжением Земли?**

Ответ:

**60. Цель кинематического анализа механизма.**

Ответ:

**61. Кратный каким числам выбирается масштаб?**

Ответ:

**62. Для каких целей строят кинематические диаграммы?**

Ответ:

**63. Сделайте чертеж и напишите векторное уравнение для определения скорости любой точки шатуна.**

Ответ:

**64. Скорость самолета 1700 км/час. А сколько метров самолет пролетает за одну секунду?**

Ответ:

**65. Скорость автомобиля 100 км/час. Какой путь автомобиль пройдет за одну секунду?**

Ответ:

**66. Скорость пули 260 м/сек. Сколько километров пуля пролетит за один час, если пренебречь сопротивлением воздуха и притяжением Земли?**

Ответ:

**67. Спортсмен пробегает 100 метров за 11 сек. А сколько километров спортсмен мог бы пробежать за один час, если бы двигался с такой же скоростью?**

Ответ:

**68. Скорость самолета 1400 км/час. А сколько метров самолет пролетает за одну секунду?**

Ответ:

**69. Скорость автомобиля 120 км/час. Какой путь автомобиль пройдет за одну секунду?**

Ответ:

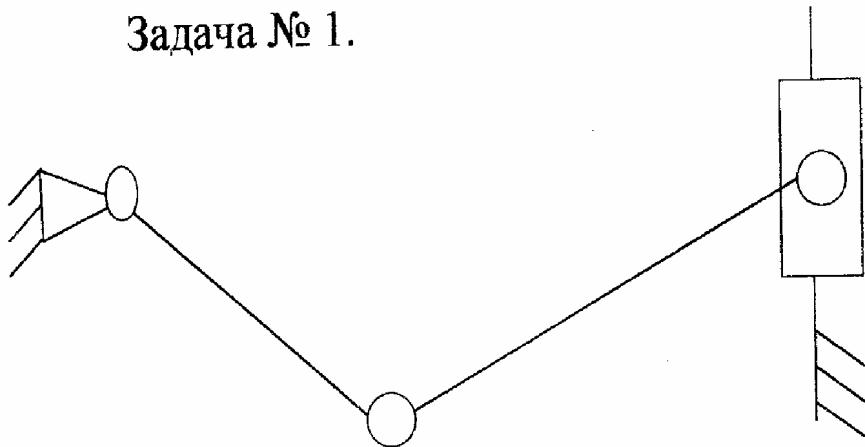
**70. Скорость пули 300 м/сек. Сколько километров пуля пролетит за один час, если пренебречь сопротивлением воздуха и притяжением Земли?**

**71. Ответ:**

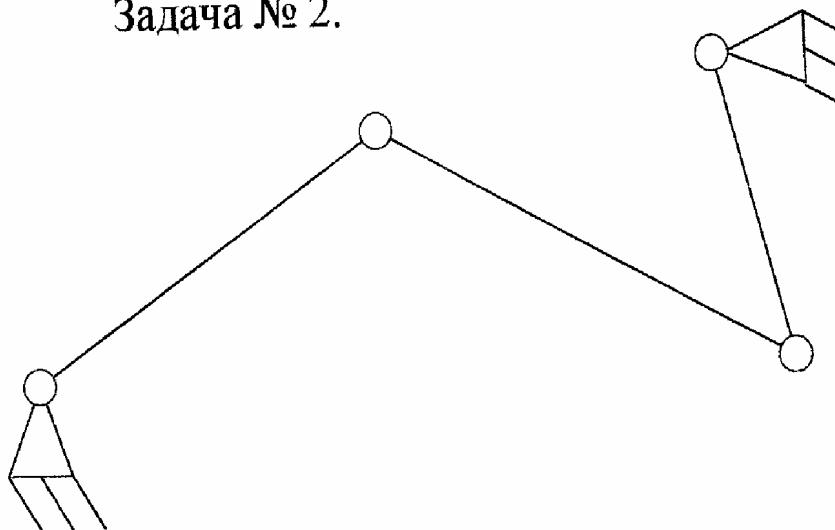
## 8. Задачи для самостоятельного решения.

Построить план скоростей и ускорений для заданных механизмов, считая, что задано ведущее звено. Размеры звеньев известны.

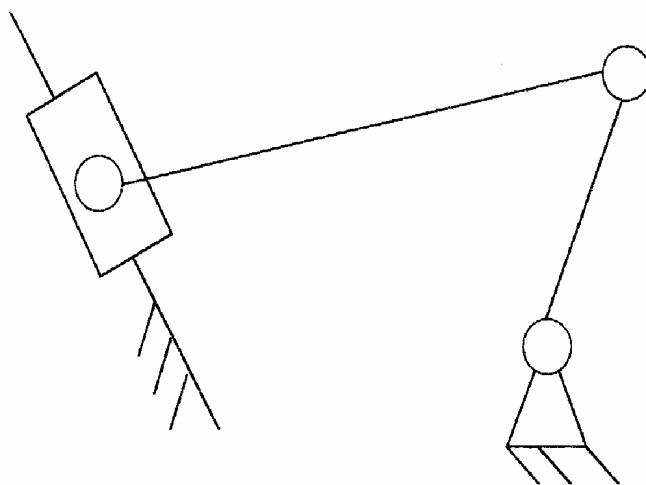
### Задача № 1.



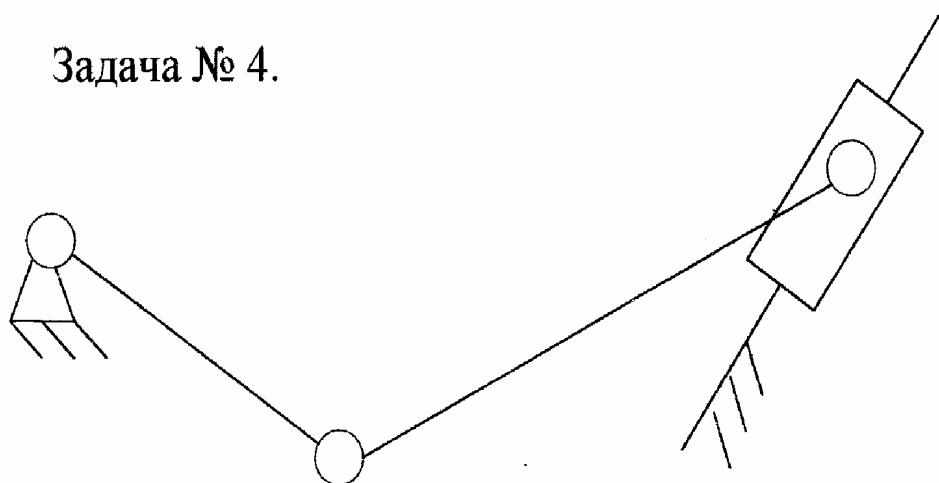
### Задача № 2.



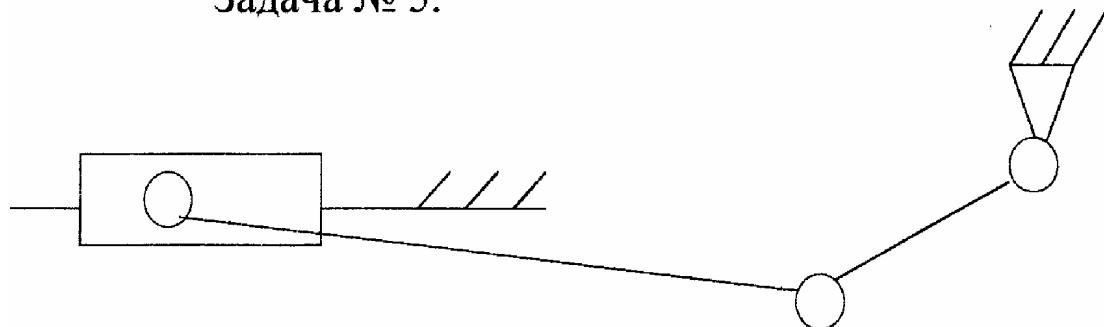
Задача № 3.



Задача № 4.



Задача № 5.



## ТЕМА 3,4: ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА

### 1. Цель и задачи динамического анализа

Цель: изучить движение звеньев механизма с учетом действующих сил.



При проектировании новых механизмов конструктор, выполнив структурный и кинематический анализ механизма, приступает к решению первой задачи динамического анализа, которая называется «Силовой анализ механизма». При этом он считает, что:

- угловая скорость ведущего звена постоянна, то есть такая же, как и при кинематическом анализе механизма,
- задаваемые силы (движущие силы, силы сопротивления, силы тяжести звеньев, силы инерции) в механизме считаются известными, или их можно определить по известным формулам.

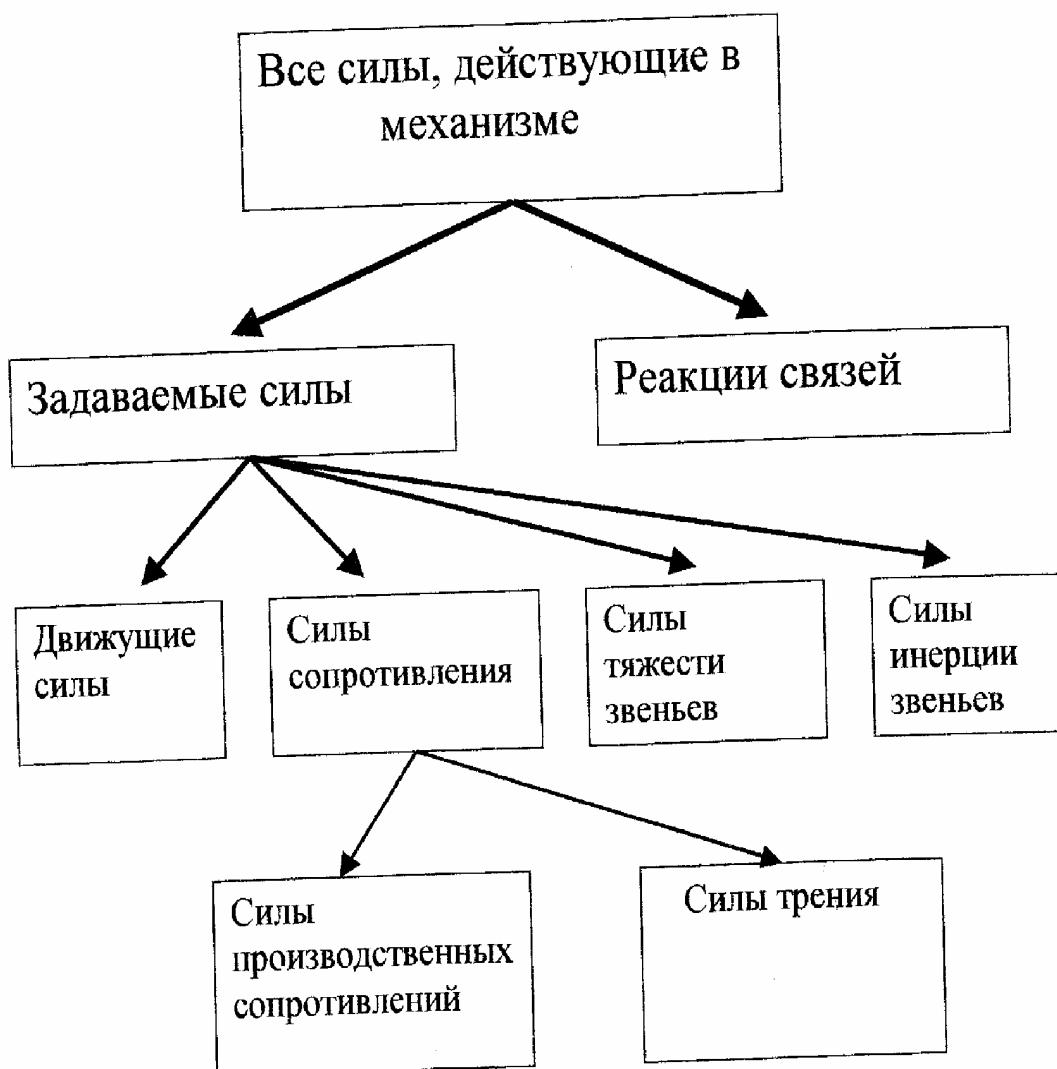
Исходя из принятых предположений, конструктор определяет:

1. Реакции в кинематических парах, знание которых позволяет ему выбрать размеры и массу звеньев и подшипников механизма, то есть провести расчет на прочность.
2. Уравновешивающую силу, под которой понимают условную силу, приложенную к ведущему звену механизма. Уравновешивающая сила в каждый момент времени уравновешивает все силы и моменты, действующие на звенья механизма, и следовательно ведущее звено механизма в этом случае будет равномерно вращаться с постоянной угловой скоростью.

Решив первую задачу, конструктор приступает ко второй задаче, которая называется «Динамика механизма». При этом из решения первой задачи он знает размеры и массу, а следовательно и моменты инерции звеньев механизма, а также все задаваемые силы (движущие, сопротивления, тяжести, инерции). По известным данным конструктор определяет истинный закон движения ведущего звена механизма, так как в реальных механизмах угловая скорость ведущего звена никогда не бывает постоянной, а все время колеблется между максимальным и минимальным значениями. Сравнив размах колебаний угловой скорости ведущего звена с допустимыми значениями для данного типа машин, конструктор прекращает дальнейший расчет, если укладывается в допустимые значения. Если колебания угловой скорости ведущего звена спроектированного механизма превышают допустимые значения, то конструктор продолжает расчет. Суть дальнейшего расчета заключается в подборе размеров и массы маховика, который устанавливается на ведущее звено механизма, являясь аккумулятором кинетической энергии и дает возможность уменьшить размах колебаний угловой скорости ведущего звена до допустимых значений.

## ТЕМА 3: СИЛОВОЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА

### 1. Классификация сил в механизме.



Движущие силы направлены в сторону перемещения их точек приложения или составляют с этими перемещениями острые углы. Без движущих сил не работает ни одна машина. С энергетической стороны движущие силы совершают положительную работу. Движущие силы приложены к ведущим звеньям механизма.

Силы сопротивления направлены против перемещения их точек приложения или составляют с этими перемещениями тупые углы. С энергетической стороны силы сопротивления совершают отрицательную работу. Силы сопротивления делятся на силы:

- производственных сопротивлений, то есть это те силы для преодоления которых и создан механизм. Силы производственных сопротивлений приложены к исполнительным звеньям механизма.
- Силы трения (качения и скольжения) возникают в кинематических парах. Часто в курсовых проектах, выполняемых студентами, силами трения пренебрегают.

Силы тяжести звеньев приложены в центре масс звена и могут совершать положительную, отрицательную работы или не совершать никакой работы (если центр масс звена не перемещается или остается на одном горизонтальном уровне). С энергетической стороны силы тяжести звеньев совершают за период работы механизма столько же положительной работы, сколько и отрицательной.

Силы инерции и момент пары сил инерции возникает, если у звена имеется масса и звено движется. Так же как и силы веса силы инерции за период работы механизма могут совершать положительную, отрицательную работы или не совершать никакой работы.

Силы реакции связей возникают в кинематических парах механизма.

## 2. Методы силового расчета механизма.

В ТММ силовой расчет механизма основывается на принципе Д'Аламбера, сущность которого заключается в следующем: если к звеньям механизма мысленно приложить еще и силы инерции, то сумма всех сил, действующих на механизм будет равна нулю. Этот метод называется еще кинетостатическим расчетом механизма, в отличие от статического расчета, когда не учитываются силы инерции звеньев.

История возникновения принципа Д. Аламбера кратко выглядит следующим образом. Гюйгенс рассмотрел простейшую механическую систему твердого тела – физический маятник. Его теория встретила возражение со стороны Я. Бернулли, который фактически сформулировал принцип Д. Аламбера, но в приложении только к решению одной частной задачи. Я Герман (1716 г.) освобождает метод Бернулли от частного решения и придает ему большую обобщенность, однако применение его метода ограничено, а во-вторых принцип Я. Германа недостаточно точно сформулирован. В 1740 году Л. Эйлер более точно сформулировал принцип Д. Аламбера, но и его метод, как признавался сам Эйлер, применим только к теории колебательных движений. Мог ли Эйлер изобрести этот принцип? Да мог, но приоритет принципа Д. Аламбера принадлежит самому Д. Аламберу. Но учитывая большой вклад ученых Петербургской академии наук в разработку и уточнение принципа Д. Аламбера, в то время его часто называли Петербургским принципом.

### 3. Порядок кинетостатического расчета механизма.

Группа Ассура является статически определимой кинематической цепью.

Шаг 1: провести структурный анализ механизма.

Шаг 2: провести кинематический анализ механизма и определить значения ускорений.

Шаг 3: провести силовой расчет последней группы Ассура, затем предпоследней и так до тех пор, пока не останется ведущее звено и стойка.

Шаг 4: провести силовой расчет ведущего звена.

#### 4. Реакции в кинематических парах механизма.

Если не учитывать силу трения при кинетостатическом расчете механизма, то:

- во вращательной кинематической паре 5-го класса реакция одного звена на другое проходит через центр шарнира, а неизвестны: величина и направление реакции,
- в поступательной кинематической паре 5-го класса реакция перпендикулярна к оси относительного движения звеньев, а неизвестны: величина и точка приложения реакции,
- в высшей кинематической паре 4-го класса реакция приложена в точке касания звеньев и направлена по нормали, проведенной через точку касания, неизвестна величина реакции.

#### 5. Порядок силового расчета группы Ассура.

Шаг 1: отсоединить группу Ассура от механизма и приложить к ней известные силы, в том числе и силы инерции, а действия звеньев заменить реакциями.

Шаг 2: найти сумму моментов всех сил, действующих на одно звено группы Ассура, относительно точки (кинематической пары, так чтобы из полученного уравнения можно было найти значение тангенциальной составляющей реакции).

Шаг 3: составить векторное уравнение всех сил, действующих на группу Ассура, которое равно нулю. В векторное уравнение войдут два неизвестных вектора, их пересечение при графическом построении даст нам решение векторного уравнения.

#### 6. Порядок силового расчета ведущего звена.

Условно в ТММ за ведущее звено принимается звено (кривошип), к которому подводится движение извне и которое приводит в движение механизм рабочих машин, или звено (кривошип) от которого передается движение наружу (вовне) механизма двигателя.

Шаг 1: отсоединить ведущее звено от стойки, а действие стойки заменить реакцией.

Шаг 2: приложить к ведущему звену известные силы.

Шаг 3: приложить к ведущему звену силу реакции группы Ассура, равную по величине, но направленную в противоположную сторону силы реакции ведущего звена на группу Ассура, которую определили в результате расчета группы Ассура.

Шаг 4: приложить к ведущему звену в любой точке, кроме оси вращения кривошипа, неизвестную по величине и направлению уравновешивающую силу.

Шаг 5: найти сумму моментов всех сил, действующих на ведущее звено, относительно оси вращения кривошипа. Из этого уравнения определим уравновешивающую силу.

Шаг 6: составить векторное уравнение всех сил, действующих на ведущее звено, которое равно нулю. Из уравнения найдем реакцию стойки на ведущее звено.

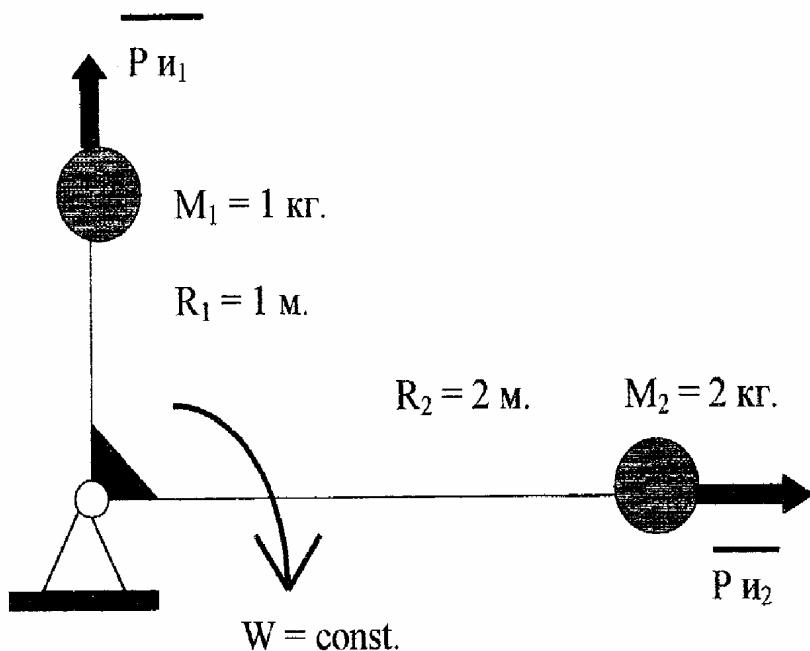
## 7. Теорема о жестком рычаге Жуковского.

«Если в соответствующие точки плана скоростей механизма, повернутого относительно полюса на  $90^\circ$ , параллельно самим себе перенести все силы, действующие на звенья механизма, включая силы инерции и уравновешивающую силу, которая неизвестна, то сумма моментов всех сил относительно полюса равна нулю.»

Алгоритм:

1. Построить план скоростей.
2. Повернуть план скоростей относительно полюса на  $90^\circ$ .
3. В соответствующие точки плана скоростей перенести параллельно самим себе все силы, действующие на звенья механизма.
4. Найти сумму моментов всех сил относительно полюса.
5. Решить уравнение и найти значение уравновешивающей силы.

## 8. Статическое уравновешивание вращающихся масс.



Известны массы и радиусы грузиков. Необходимо провести статическое уравновешивание, т.е. найти массу и радиус, на котором будет установлен уравновешивающий грузик, а также его направление.

Решение:

1. Условие статического уравновешивания (центр масс всех грузиков должен находиться на оси вращения):

$$\sum \overline{P_{и_i}} = \overline{P_{и_1}} + \overline{P_{и_2}} + \overline{P_{и_{up}}} = 0,$$

Данное уравнение означает, что векторная сумма всех сил инерции равна нулю, т.е. многоугольник сил должен быть замкнутым.

2. Определяем численные значения сил инерции:

$$P_{и_1} = M_1 \cdot a_1 = M_1 \cdot R_1 \cdot W = 1 \text{ кг. } 1 \text{ м. } 1 \text{ с}^{-1} = 1 \text{ Н.}$$

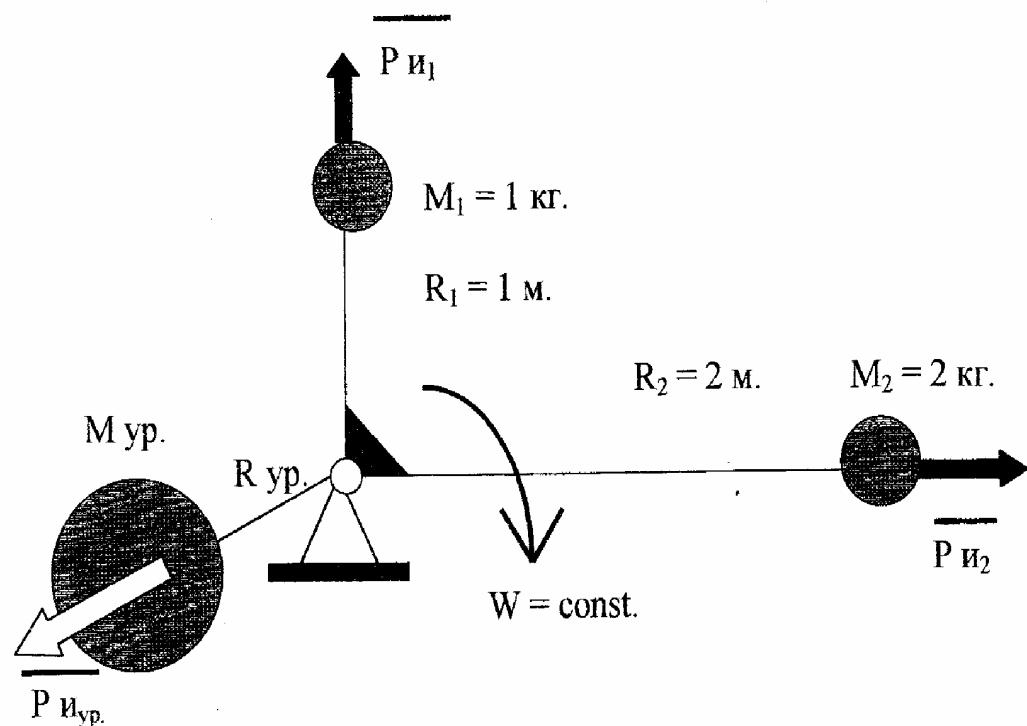
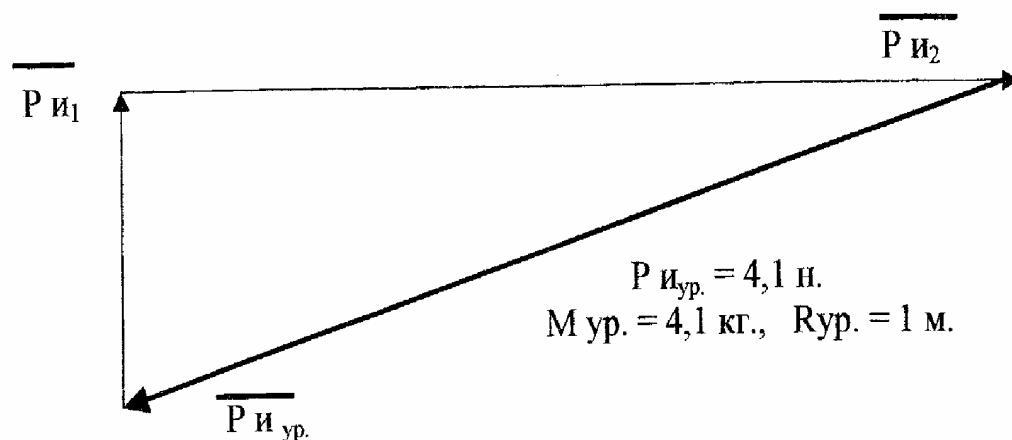
$$P_{и_2} = 2 \text{ кг. } 2 \text{ м. } 1 \text{ с}^{-1} = 4 \text{ Н.}$$

3. Выбираем масштаб плана сил:

$$\mu = \frac{4 \text{ н}}{40 \text{ мм}} = 0,1 \frac{\text{н}}{\text{мм}}$$

4. Строим замкнутый векторный многоугольник сил инерции.

С плана сил определяем численное значение  $P_{\text{и}_{\text{уп.}}}$ , ее направление, а также массу и радиус уравновешивающего грузика.



## 9. Вопросы для самопроверки.

**1. Что предполагается заданным при силовом расчете механизмов?**

Ответ: законы движения ведущих звеньев и действующие силы.

**2. Что такое силы полезного сопротивления?**

Ответ: силы, для преодоления которых предназначен механизм.

**3. Основная задача кинетостатического расчета?**

Ответ: определение реакций в кинематических парах механизма, определение уравновешивающей силы.

**4. Сколько уравновешивающих сил необходимо для равновесия механизма с несколькими степенями свободы?**

Ответ: столько, сколько степеней свободы.

**5. Первая задача динамического анализа механизма?**

Ответ: определение реакций и уравновешивающей силы по известному закону движения.

**6. Какие допущения принимаются при силовом расчете механизма?**

Ответ: отсутствие трения в кинематических парах, все силы, действующие на механизм расположены в одной плоскости.

**7. Как расположены в поступательной паре все элементарные силы взаимодействия и их равнодействующие?**

Ответ: перпендикулярно направляющим.

**8. Что условно принимают за ведущее звено при исследовании механизмов двигателей?**

Ответ: кривошип.

**9. Теорема Жуковского?**

Ответ: если какой-либо механизм под действием системы сил, приложенных к этому механизму, находится в равновесии, то повернутый на  $90^\circ$  план скоростей механизма, рассматриваемый как твердое тело (неизменяемая система), врачающееся вокруг полюса плана скоростей и нагруженное теми же силами, приложенными в соответствующих точках плана, также находится в равновесии.

**10. Как обычно называют главный вектор сил инерции и как он определяется?**

Ответ: силой инерции звена, он равен  $\bar{P}_i = -m\bar{a}_s$ .

**11. Для чего нужно знать силы и моменты пар сил, которые приложены к каждому звену механизма?**

Ответ: для расчета на прочность звеньев механизма и их деталей.

**12. Что нужно для того, чтобы механизм находился в равновесии под действием внешних сил?**

Ответ: уравновешивающий момент.

**13. Из чего состоит статический расчет механизма?**

Ответ: 1) нахождение уравновешивающих сил или момента; 2) определение реакций в кинематических парах.

**14. Если при силовом расчете механизма в число известных внешних сил не включена инерциальная нагрузка, то как называют такой расчет?**

Ответ: статическим.

**15. Если при силовом расчете механизма в число известных внешних сил, приложенных к его звеньям, включена инерциальная нагрузка, то как называют такой расчет?**

Ответ: кинетостатическим.

**16. Что такое кинетостатический расчет механизма?**

Ответ: силовой расчет механизма, при котором в число известных внешних сил включена инерциальная нагрузка.

**17. Что такое рычаг Жуковского?**

Ответ: метод определения уравновешивающей силы.

**18. Как находится уравновешивающий момент, если известна уравновешивающая сила?**

Ответ: сила, умноженная на плечо относительно оси звена, к которому она приложена.

**19. Задачи силового анализа механизма?**

Ответ: определение реакций в кинематических парах, определение уравновешивающих моментов и сил.

**20. Алгоритм силового анализа механизма?**

Ответ: делим механизм на группы Ассура и начальный механизм; на группы Ассура переносим все внешние силы механизма; расчет начинаем с последней группы Ассура; реакцию во вращательной паре раскладываем на нормальную и тангенциальную; реакции в поступательной паре прикладываем перпендикулярно направляющим; после определения реакцию переносим на начальный механизм; уравновешивающий момент находим из условия равновесия начального механизма; проверку делаем с помощью жесткого рычага Жуковского.

**21. Из-за чего возникают реакции в кинематических парах?**

Ответ: воздействие внешних сил, движение отдельных масс механизма с ускорением.

**22. Чему равно угловое ускорение, если звено движется поступательно?**

Ответ: 0.

**23. Чему равно угловое ускорение, если  $\omega = \text{const}$ ?**

Ответ: 0.

**24. Почему совершается движение механизма?**

Ответ: под действием приложенных к нему внешних сил.

**25. Что такое реакции в кинематической паре?**

Ответ: силы взаимодействия звеньев, возникающие в местах их соприкосновения.

**26. Что такое трение покоя?**

Ответ: трение, имеющие место при относительном покое соприкасающихся тел.

**27. В какой точке звена приложена сила инерции?**

Ответ: в центре масс звена.

**28. Как направлена сила инерции?**

Ответ: противоположно полному ускорению центра масс звена.

**29. Формула для определения момента пары сил инерции?**

Ответ:  $M_i = -J_s \cdot \epsilon$ .

**30. Как направлен момент пары сил инерции?**

Ответ: момент пары сил инерции направлен противоположно угловому ускорению звена.

**31. Какую размерность имеет момент пары сил инерции?**

Ответ:  $\frac{кг \cdot м^2}{сек^2} = \frac{кг \cdot м}{сек^2} \cdot m = H \cdot m$

**32. На какие звенья действует момент пары сил инерции?**

Ответ: на вращающиеся с ускорением звенья.

**33. Принцип Д'Аламбера**

Ответ: если к звеньям механизма мысленно приложить и силы инерции, то сумма всех сил, действующих на механизм будет равна нулю.

**34. Что такое жидкостное трение?**

Ответ: трение между поверхностями с промежуточными слоями смазки.

**35. Что такое сухое трение?**

Ответ: трение выступающих неровностей поверхностей, непосредственно соприкасающихся друг с другом.

**36. Написать формулу Амонтена – Кулона?**

Ответ:  $F = fN$ .

**37. Какое направление имеет сила трения?**

Ответ: противоположное относительной скорости.

**38. Цель силового анализа механизма.**

Ответ: определить движение звеньев механизма с учетом сил, вызывающих это движение.

**39. Классификация сил, действующих на звенья механизма.**

Ответ:

**40. Что такое уравновешивающая сила?**

Ответ: сила, приложенная к начальному звену.

**40. Назовите второе название принципа Д'Аламбера?**

Ответ: петербургский.

**41. Что такое статический расчет механизма?**

Ответ: определение сил в механизмах, в которых не учитываются дополнительные силы, возникающие при движении механизма.

**42. Что понимают под термином «балансировка»?**

Ответ: статическое уравновешивание вращающихся масс.

**43. С какой целью проводят балансировку?**

Ответ: нагрузка на подшипники, уменьшающаяся за счет смещения вращающихся масс в центре вращения.

**44. Алгоритм силового расчета ведущего звена.**

Ответ: отсоединим ведущее звено от стойки; прикладываем все силы к механизму; сумма моментов всех сил относительно полюса равна нулю; складываем векторы.

**45. Алгоритм определения уравновешивающей силы с помощью теоремы о жестком рычаге Жуковского Н. Е.**

Ответ: построить план скоростей; повернуть план скоростей относительно полюса на  $90^\circ$  в любую сторону; параллельно самим себе перенести все силы в соответствующие точки на повёрнутый план скоростей; сумма моментов всех сил относительно полюса равна нулю.

**46. Что такое рычаг Жуковского Н. Е.**

Ответ: метод определения уравновешивающей силы и уравновешивающего момента.

**47. В какой точке звена приложен вектор силы инерции?**

Ответ: в центре масс звена.

**48. Как определить направление вектора силы инерции тела?**

Ответ: противоположно полному ускорению тела.

**49. Что такое коэффициент трения скольжения?**

Ответ: тангенс угла наклона поверхности в момент начала движения.

**50. Какая сила называется движущей?**

Ответ: движущие силы – те силы, которые стремятся ускорить движение ведущего звена (движущие силы – это те силы, приложенные к звеньям механизма, которые совершают положительную работу).

**51. Какая сила называется силой полезного сопротивления?**

Ответ: силой полезного сопротивления называют те силы сопротивления, которые совершают работу, необходимую для выполнения требуемого технологического процесса.

**52. Является ли сила тяжести звена движущей силой?**

Ответ: если угол между вектором этой силы и вектором движения острый, то да, если тупой – нет.

**53. Является ли сила трения силой полезного сопротивления?**

Ответ: нет.

**54. Является ли сила пиления (в пилораме) силой трения?**

Ответ: нет.

**55. Размерность масштаба плана сил.**

Ответ: Н/мм.

**56. Размерность масштаба на индикаторной диаграмме.**

Ответ:

**57. Что такое момент силы относительно точки?**

Ответ:

**58. Что такое плечо силы относительно точки ?**

Ответ: плечо силы – кратчайшее расстояние от точки до линии действия силы.

**59. Является ли сила перемешивания теста (в тестомесильной машине) движущей силой?**

Ответ: нет.

**60. Если группа Ассура состоит из  $3^x$  звеньев, будет ли она являться статически определимой?**

Ответ: группа Ассура состоит только из  $2^x$  или  $4^x$  звеньев.

**61. Что необходимо знать, чтобы определить направление вектора силы инерции, действующей на любое звено?**

Ответ: ускорение.

**62. Избыточное давление на индикаторной диаграмме ДВС равно 5 атмосферам. Диаметр цилиндра 100мм. Определить величину газовой силы.**

Ответ:

**63. В каких единицах измеряется коэффициент трения скольжения?**

Ответ: эта величина безразмерна.

**64. Что такое коэффициент трения качения?**

Ответ: плечо момента трения качения.

**65. В каких единицах измеряется коэффициент трения качения?**

Ответ: в метрах.

**66. Петербургский принцип (Я. Герман, Л. Эйлер, Я. Бернулли).**

Ответ: принцип Д'Аламбера.

**67. Что известно и неизвестно о силе реакции во вращательной кинематической паре, если не учитывать силу трения скольжения?**

Ответ: известна точка приложения; неизвестно направление и численное значение.

**68. Что известно и неизвестно о силе реакции в поступательной кинематической паре, если не учитывать силу трения скольжения?**

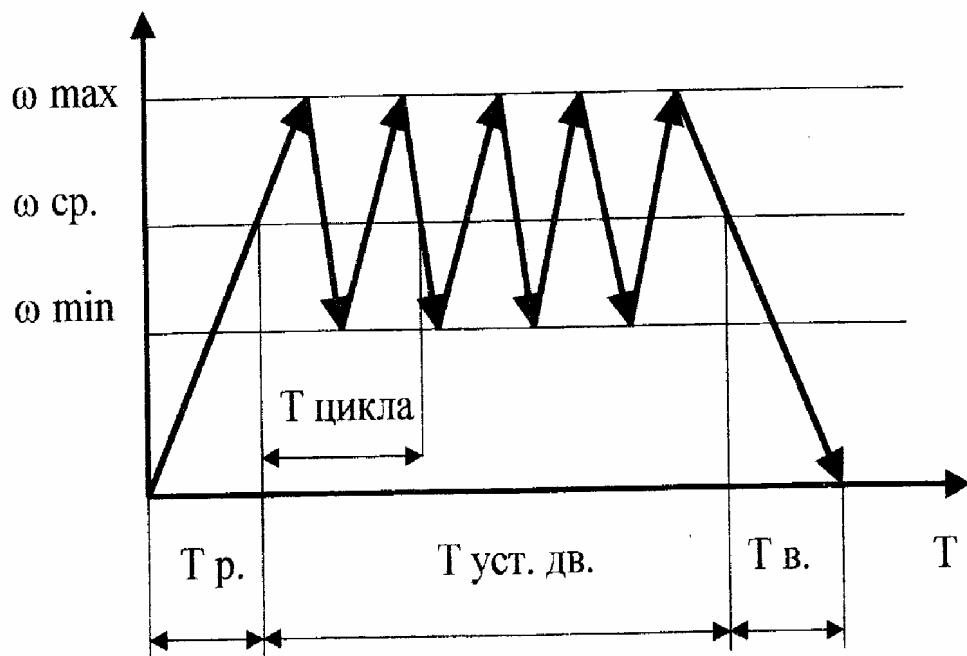
Ответ: известно направление; неизвестна точка приложения и численное значение.

**69. Что известно и неизвестно о силе реакции в высшей кинематической паре, если не учитывать силу трения скольжения?**

Ответ: известна точка приложения и направление; неизвестно численное значение.

## ТЕМА 4: ДИНАМИКА МЕХАНИЗМА

### 1. Тахограмма механизма.



Время движения механизма:

Т<sub>р.</sub> – время разбега, кинетическая энергия механизма возрастает, работа движущих сил больше, чем работа сил полезного сопротивления,

Т<sub>уст. дв.</sub> – состоит из большого числа повторяющихся циклов (Т<sub>цикла</sub> – время одного цикла), кинетическая энергия механизма периодически то возрастает, то убывает, но за время одного цикла работа движущих сил равна работе сил полезного сопротивления, внутри цикла равенство работ отсутствует, то есть ведущее звено механизма движется неравномерно,

Т<sub>в.</sub> – время выбега, кинетическая энергия убывает, работа движущих сил меньше, чем работа сил полезного сопротивления.

## 2. Коэффициент неравномерности хода механизма.

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{ср.}}}$$

## 3. Кинетическая энергия механизма.

Если звено механизма движется поступательно (ползун), то его кинетическая энергия равна:

$$E = \frac{M \cdot V^2}{2}$$

Если звено механизма вращается (кривошип), то его кинетическая энергия равна:

$$E = \frac{J \cdot \omega^2}{2}$$

Если звено механизма совершает сложное плоско-параллельное движение (шатун), то его кинетическая энергия равна:

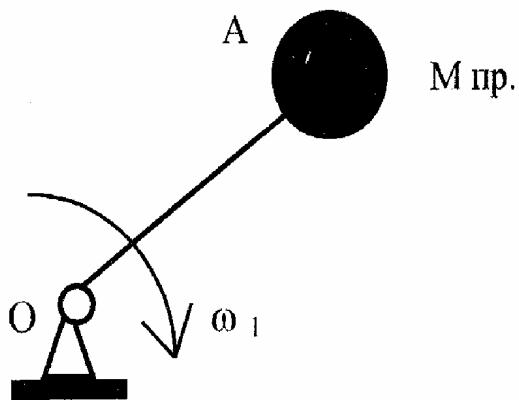
$$E = \frac{M \cdot V^2}{2} + \frac{J \cdot \omega^2}{2}$$

Следовательно, кинетическая энергия всех звеньев механизма определяется по формуле:

$$E = \sum_i^n \left( \frac{M_i \cdot V_i^2}{2} + \frac{J_i \cdot \omega_i^2}{2} \right)$$

#### 4. Приведенная масса (приведенный момент инерции) механизма.

При динамическом анализе работы механизма удобно использовать в расчетах не массы звеньев, которые движутся с переменными скоростями, а одну массу, называемую приведенной. Таким образом, приведенная масса ( $M_{\text{пр.}}$ ) представляет собой условную массу, сосредоточенную в точке A звена приведения. Кинетическая энергия приведенной массы в любом положении механизма равна кинетической энергии всех его звеньев.



Если приведенную массу умножим на длину звена приведения в квадрате, то получим приведенный момент инерции механизма:

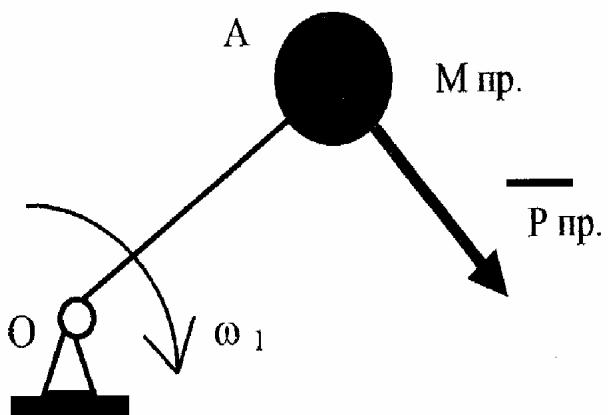
$$J_{\text{пр.}} = M_{\text{пр.}} \cdot L_{OA}^2,$$

или:

$$J_{\text{пр.}} = \sum_i^n \left\{ M_i \left( \frac{V_i}{\omega_1} \right)^2 + J_i \left( \frac{\omega_i}{\omega_1} \right)^2 \right\}.$$

## 5. Приведенная сила (приведенный момент).

Точно также удобно оперировать не отдельными силами и моментами, приложенными к звеньям механизма, а одной приведенной силой, приложенной в точке А звена приведения. Приведенная сила ( $P_{\text{пр.}}$ ) это такая условная сила, которая имеет мощность равную мощности всех сил и моментов, действующих на звенья механизма.



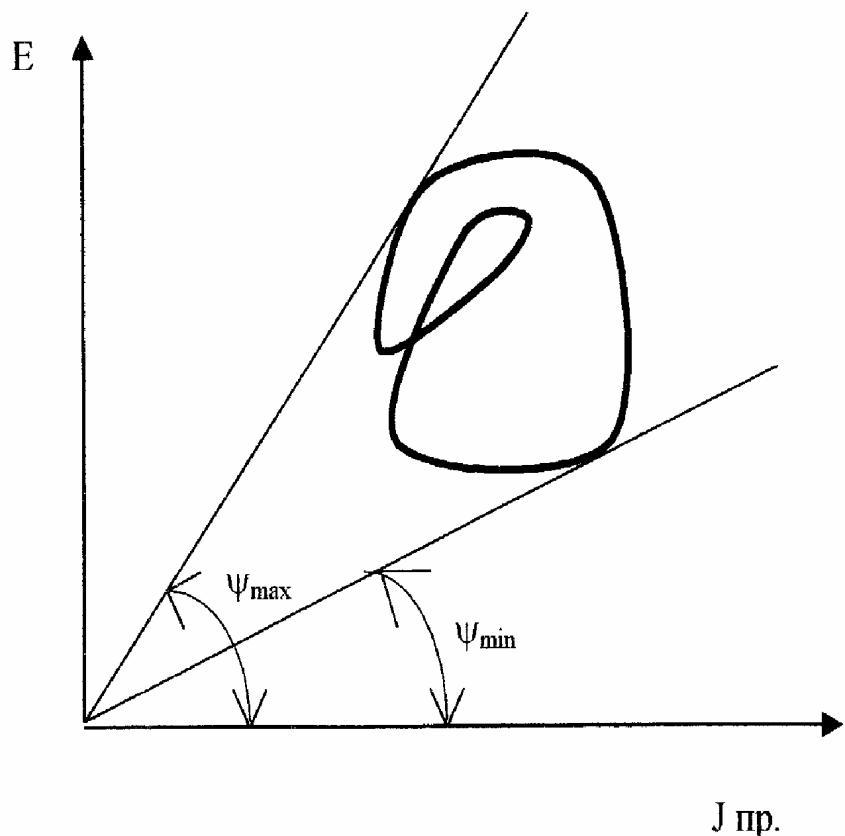
Если приведенную силу умножить на длину звена приведения, то получим приведенный момент:

$$M_{\text{пр.}} = P_{\text{пр.}} \cdot L_{OA}.$$

Приведенная сила ( $P_{\text{пр.}}$ ) по величине равна уравновешивающей силе ( $P_{\text{ур.}}$ ), но направлена в противоположном направлении. Следовательно, приведенную силу можно определять с помощью метода «Рычага Жуковского».

Таким образом, мы получаем: одно подвижное звено (звено приведения), одну приведенную массу и одну приведенную силу. Единственное условие такой замены любого механизма: закон движения механизма не должен меняться.

## 6. Диаграмма Фердинанда Виттенбауэра.



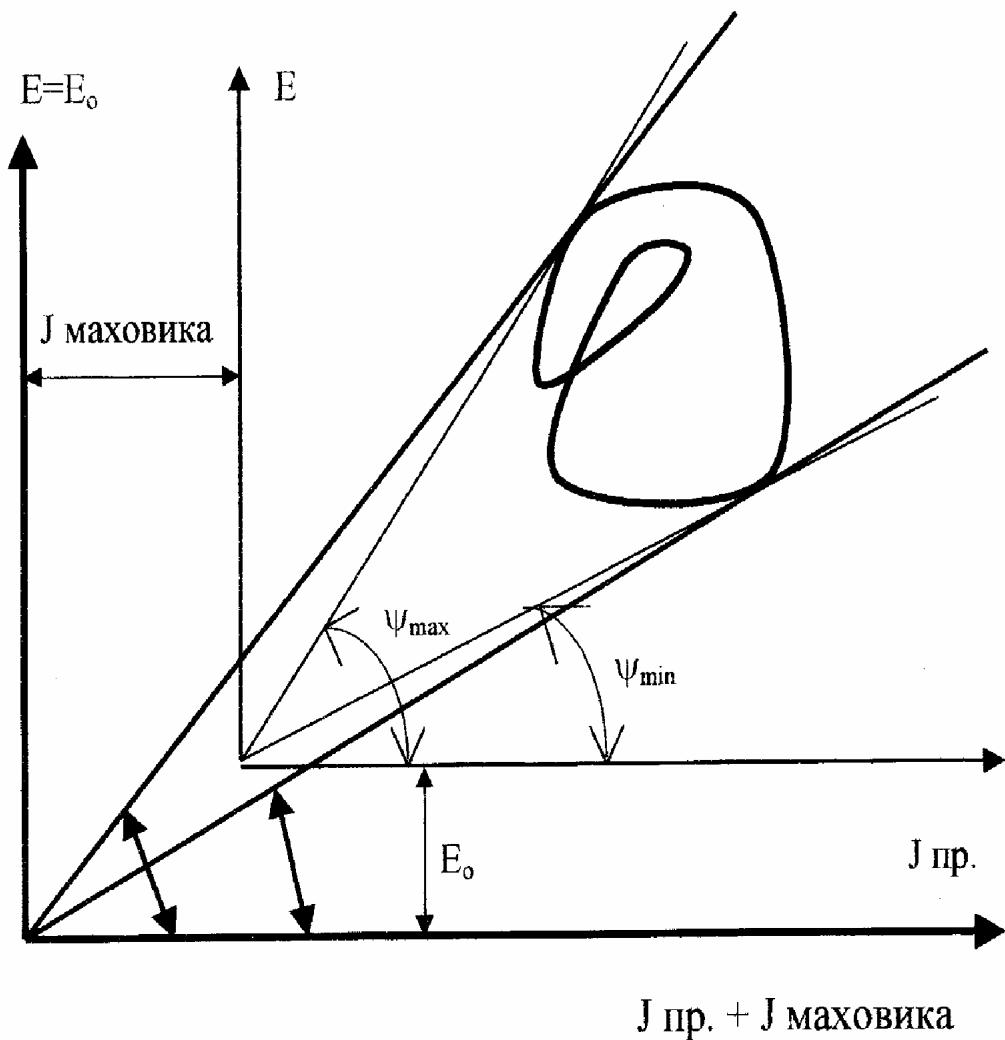
Для одного цикла установившегося движения механизма можно построить зависимость кинетической энергии от приведенного момента инерции механизма. Так как:

$$E = \frac{J \text{ пр.} \cdot \omega^2}{2}, \quad \text{или: } \omega^2 = \frac{2E}{J \text{ пр.}} \approx 2 \operatorname{tg} \psi,$$

то зная  $\psi_{\max}$  и  $\psi_{\min}$  можно найти максимальное и минимальное значения угловой скорости, а затем и среднее значение угловой скорости звена приведения. Зная эти данные можно определить коэффициент неравномерности хода механизма. Если значение коэффициента не превышает допустимого значения, то вторая задача динамического анализа механизма считается решенной.

## 7. Определение момента инерции маховика.

Если же значение коэффициента превышает допустимую величину, то его значение уменьшают путем увеличения приведенного момента инерции механизма. Это увеличение момента инерции достигается за счет увеличения массы кривошипа. То есть к кривошипу присоединяется еще одна деталь в виде диска или колеса, которое называется маховиком. Обладая дополнительным моментом инерции, маховик является аккумулятором кинетической энергии: он накапливает энергию во время ускоренного движения и отдает ее во время замедленного движения, таким образом уменьшая амплитуду колебаний угловой скорости механизма.



На практике задача решается следующим образом: задаваясь коэффициентом неравномерности хода механизма и зная его среднюю угловую скорость можно определить максимальное и минимальное значения угловой скорости звена приведения, а следовательно и соответствующие им максимальное и минимальное значения углов  $\psi$ . Под этими углами проводим две касательные к диаграмме Виттенбауэра и находим их точку пересечения, которая является новым началом координат диаграммы. При этом кинетическая энергия механизма увеличивается на величину  $E_0$ , а приведенный момент инерции на величину  $J$  маховика. В итоге, уменьшая коэффициент неравномерности хода механизма, мы увеличиваем его кинетическую энергию и приведенный момент инерции.

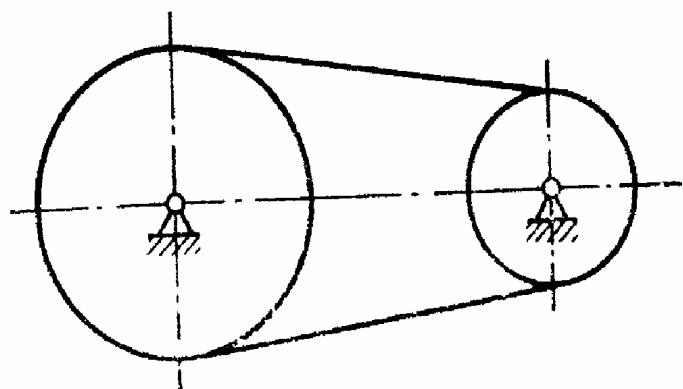
### 8. Вопросы для самопроверки.

1. Что такое тахограмма механизма?
2. Время работы механизма?
3. Коэффициент неравномерности хода механизма?
4. Кинетическая энергия механизма?
5. Что такое приведенная масса механизма?
6. Что такое приведенная сила механизма?
7. Диаграмма Виттенбауэра?
8. Что можно определить по диаграмме Виттенбауэра?

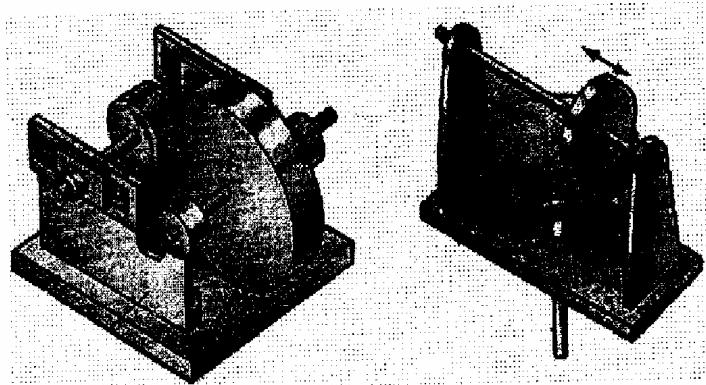
## ТЕМА 5 : МЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАЧИ

### 1. Классификация механизмов передач

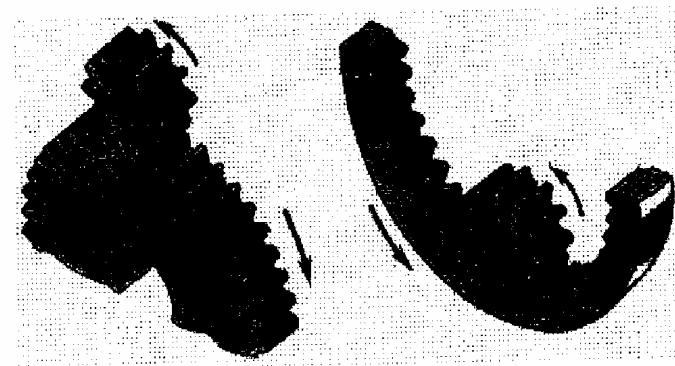
#### 1. С гибкими звеньями (цепные и ременные)



#### 2. Фрикционные

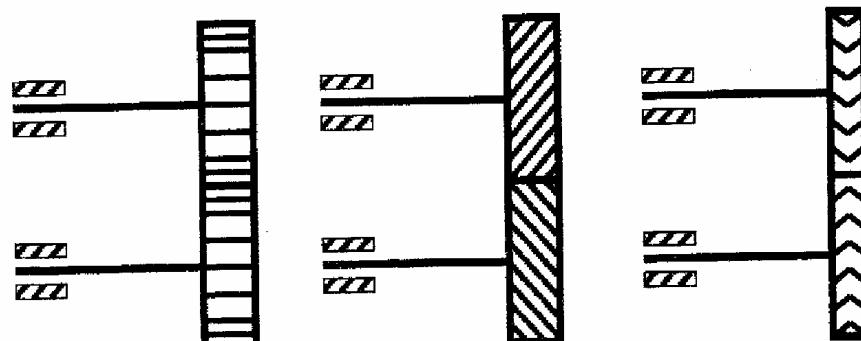


#### 3. Зубчатые



## 2. Классификация зубчатых механизмов

### 1. Оси зубчатых колёс параллельны (плоские механизмы)

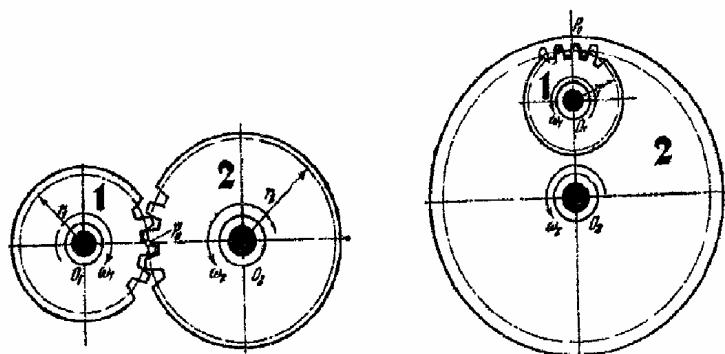


Прямой зуб

Косой зуб

Шевронный зуб

В этом случае передаточное отношение определяется по формуле:



для внешнего зацепления:

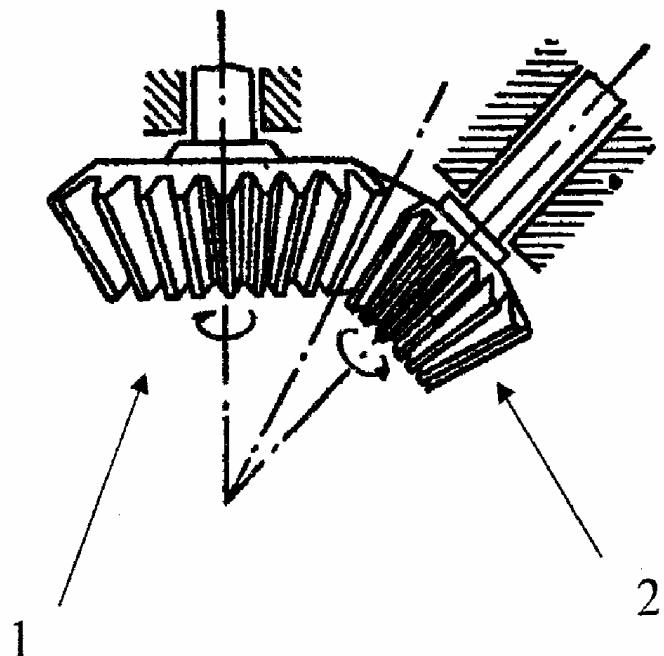
$$U_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{w_1}{w_2} =$$

для внутреннего зацепления:

$$\frac{-}{Z_2} \quad \frac{+}{Z_1}$$

## 2. Оси зубчатых колёс пересекаются (пространственные механизмы)

В пространственных механизмах знак передаточного отношения не определяют.



$$U_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{z_2}{z_1},$$

где:

$n$  - частота вращения колеса (об./мин.),

$w$  - угловая скорость колеса (рад./сек.),

$z$  - число зубьев колеса.

3. Оси зубчатых колёс скрещиваются (пространственные механизмы)

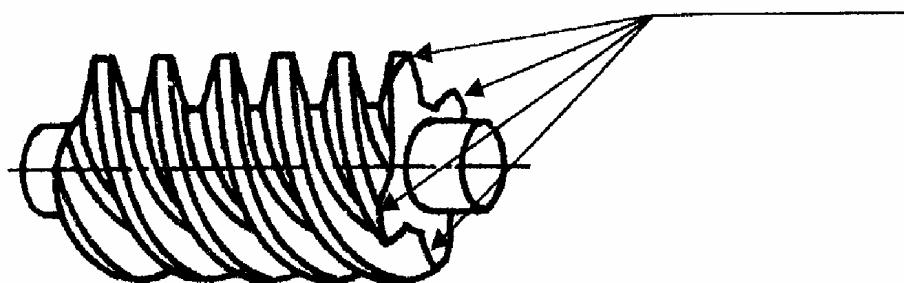


$$U_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{z_k}{z_q},$$

где:

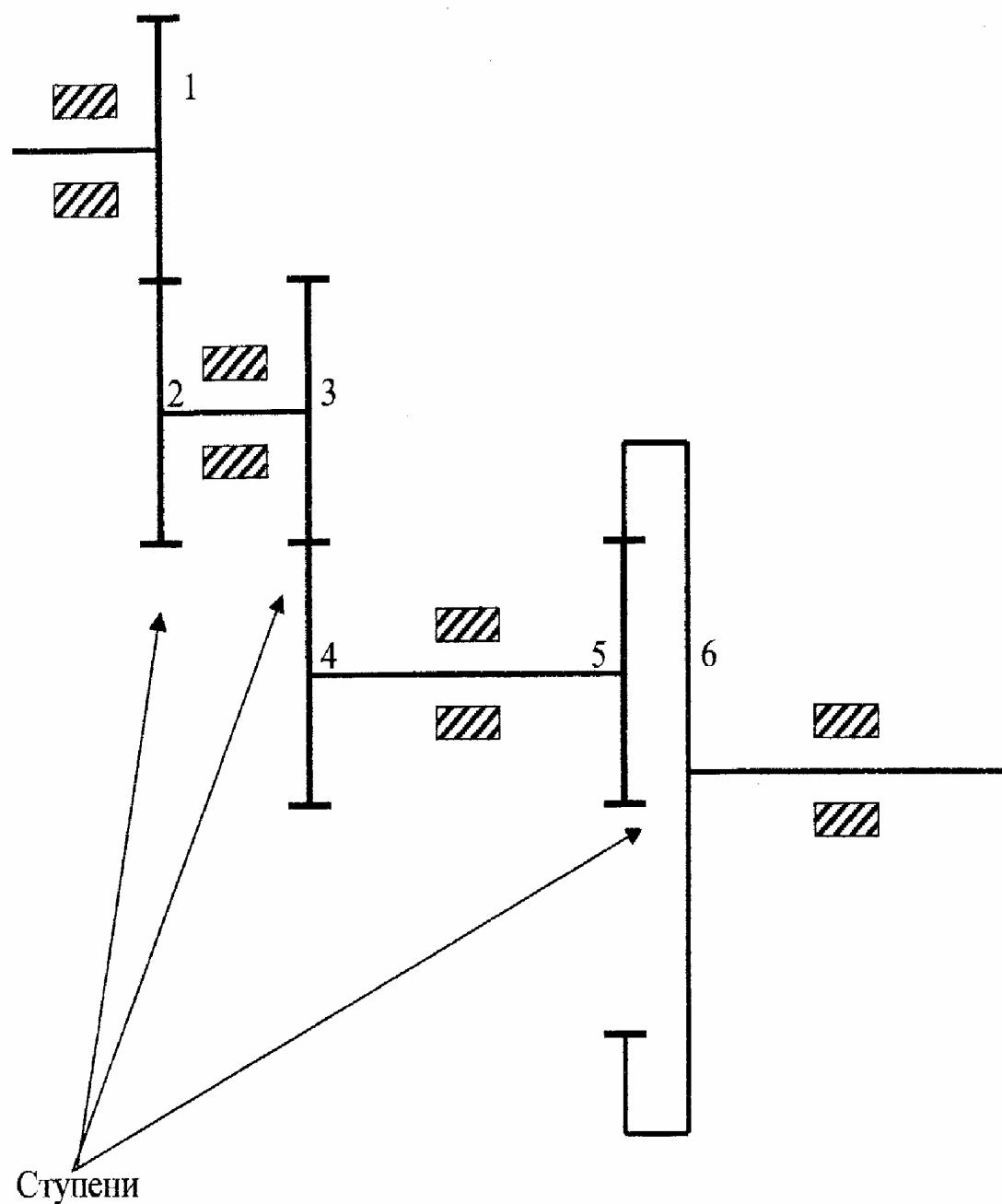
$Z_k$  – число зубьев колеса;  
 $Z_q$  – число заходов червяка.

Заходы червяка



$$1 \leq Z_q \geq 4$$

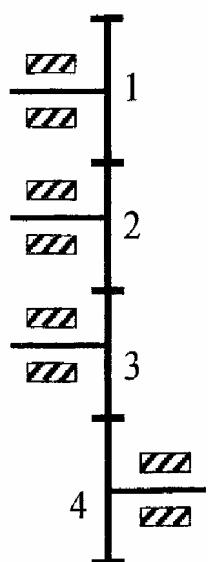
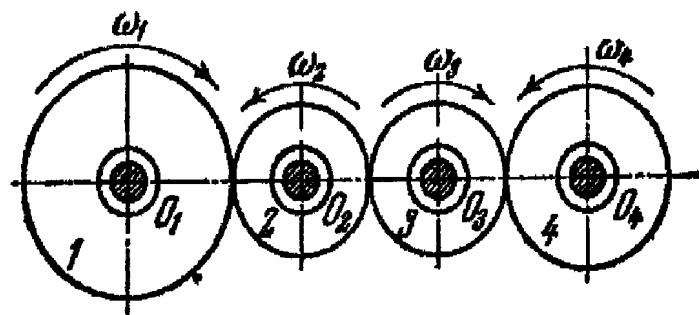
### 3. Многоступенчатые редукторы



$$U_{16} = (-1)^m \cdot U_{12} \cdot U_{34} \cdot U_{56} = (-1)^2 \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{Z_6}{Z_5} = + \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{Z_6}{Z_5},$$

где  $m$  – число внешних зацеплений.

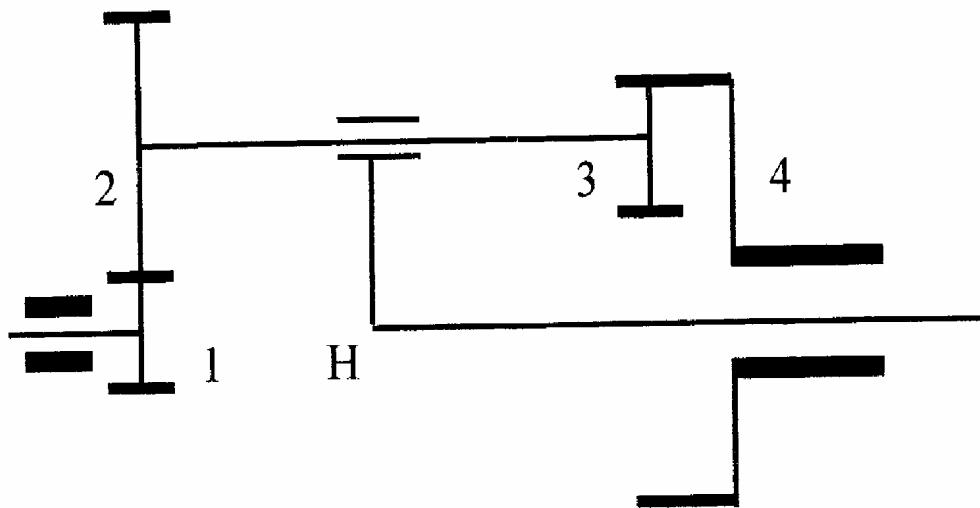
#### 4. Рядовое соединение зубчатых колёс с паразитными колёсами



$$U_{14} = (-1)^m \cdot U_{12} \cdot U_{23} \cdot U_{34} = (-1)^3 \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_3}{Z_2} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} = \frac{Z_4}{Z_1}$$

Второе и третье колеса являются паразитными (промежуточными). Они не оказывают никакого влияния на величину передаточного отношения, а их число оказывает влияние только на знак передаточного отношения.

## 5. Планетарные редукторы

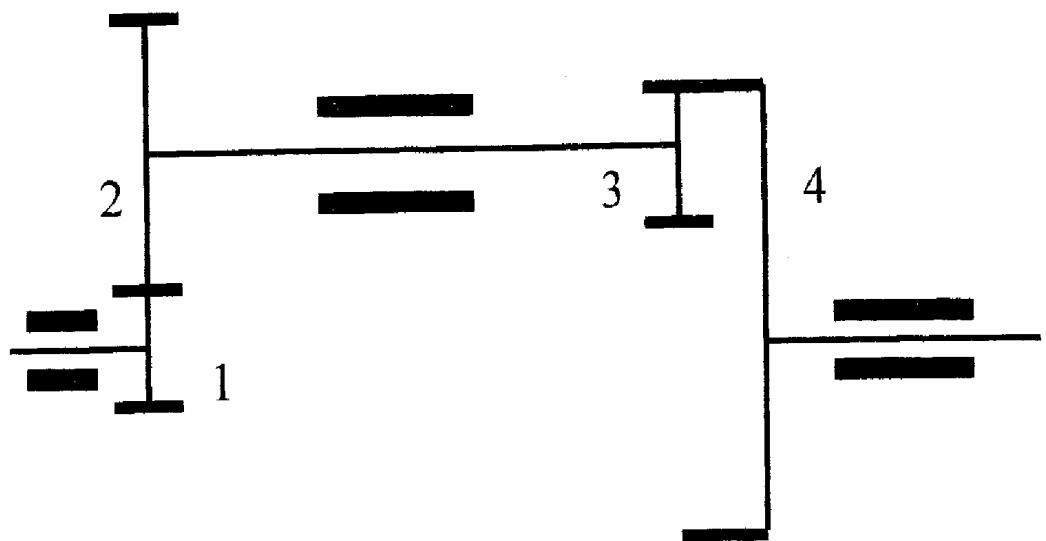


- 1 – подвижное колесо,  
 2 и 3 – блок сателлитов (два колеса жестко закрепленных на одном валу),  
 4 – неподвижное колесо,  
 Н – водило (вращающееся звено, которое соединяется с осью сателлитов).

**Алгоритм определения передаточного отношения от  
 (4)  
 колеса к водилу:  $U_{1H} = ?$**

1. Мысленно остановить водило и определить передаточное отношение от колеса к тому колесу, которое в планетарном механизме было неподвижным:

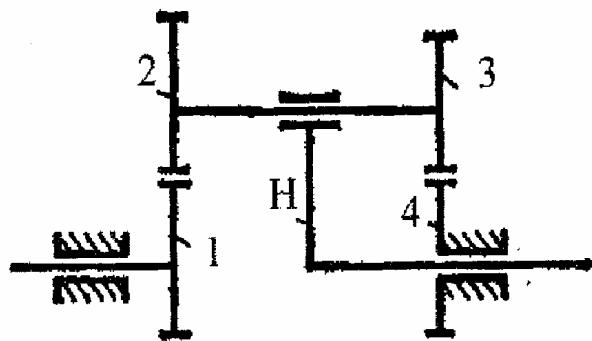
$$U_{14}^{(H)} = (-1)^m \cdot U_{12} \cdot U_{34} = (-1)^1 \cdot \frac{Z_2 \cdot Z_4}{Z_1 \cdot Z_3} = -\frac{Z_2 \cdot Z_4}{Z_1 \cdot Z_3}$$



2. Полученный результат вычесть из 1:

$$U_{1H}^{(4)} = 1 - \left( -\frac{Z_2 \cdot Z_4}{Z_1 \cdot Z_3} \right) = 1 + \frac{Z_2 \cdot Z_4}{Z_1 \cdot Z_3}$$

Пример решения задачи:



$$U_{1H}^{(4)} = 1 - U_{14}^{(H)} = 1 - (-1)^2 \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} = 1 - \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_4}{Z_3}.$$

## 6. Вопросы для самопроверки

**1. Что означает знак ( – ) в передаточном отношении?**

Ответ: угловые скорости входного и выходного звена направлены в противоположные стороны.

**2. Как определить число заходов червяка?**

Ответ: посмотреть в торец червяка и подсчитать количество ниток.

**3. На какие виды передач классифицируются механические передачи?**

Ответ: с гибкими звеньями; фрикционные; зубчатые.

**4. У каких зубчатых передач требуется определить знак передаточного отношения?**

Ответ: у зубчатых передач относящихся к плоским механизмам.

**5. Сколько заходов может быть у червяка?**

Ответ: от 1 до 4 заходов.

**6. Из скольких звеньев состоит одноступенчатый редуктор?**

Ответ: из трех.

**7. Чему равна степень подвижности планетарного редуктора?**

Ответ: 1.

**8. Чему равна степень подвижности дифференциального редуктора?**

Ответ: 2 и больше.

**9. По какому принципу классифицируются зубчатые механизмы?**

Ответ: оси параллельны; пересекаются; скрещиваются.

**10. Какие зубья бывают у зубчатых колес с параллельными осями?**

Ответ: прямые; косые; шевронные.

**11. Какое звено в червячной передаче является ведомым?**

Ответ: зубчатое колесо.

**12. Какое звено в червячной передаче является ведущим?**

Ответ: червяк.

**13. Назовите виды гибких звеньев.**

Ответ: ремень; цепь.

**14. К какому типу механизмов относится червячная передача?**

Ответ: пространственный.

**15. На что влияют промежуточные (паразитные) колеса в рядовом соединении зубчатых колес?**

Ответ: на знак передаточного отношения.

**16. На что не влияют промежуточные (паразитные) колеса в рядовом соединении зубчатых колес?**

Ответ: на величину передаточного отношения.

**17. Что означает число 0.1 в передаточном отношении зубчатой передачи?**

Ответ: частота вращения выходного колеса в 10 раз больше частоты входного.

**18. Что означает число 0.2 в передаточном отношении зубчатой передачи?**

Ответ: частота вращения выходного колеса в 20 раз больше частоты входного.

**19. Что означает число 2 в передаточном отношении зубчатой передачи?**

Ответ: частота вращения выходного колеса в 2 раз меньше частоты входного.

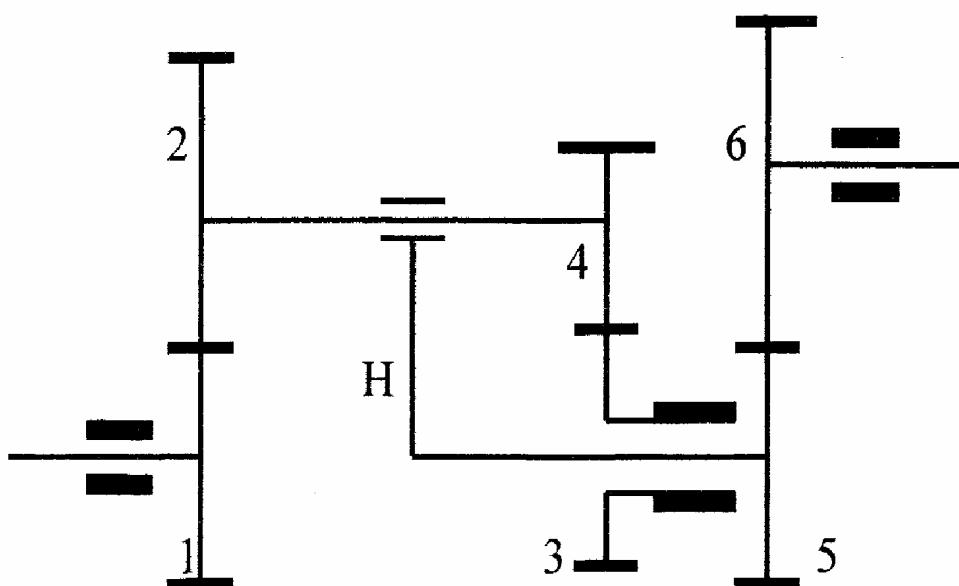
**20. Что означает число 10 в передаточном отношении зубчатой передачи?**

Ответ: частота вращения выходного колеса в 10 раз меньше частоты входного, а число зубьев выходного колеса в 10 раз больше числа зубьев входного.

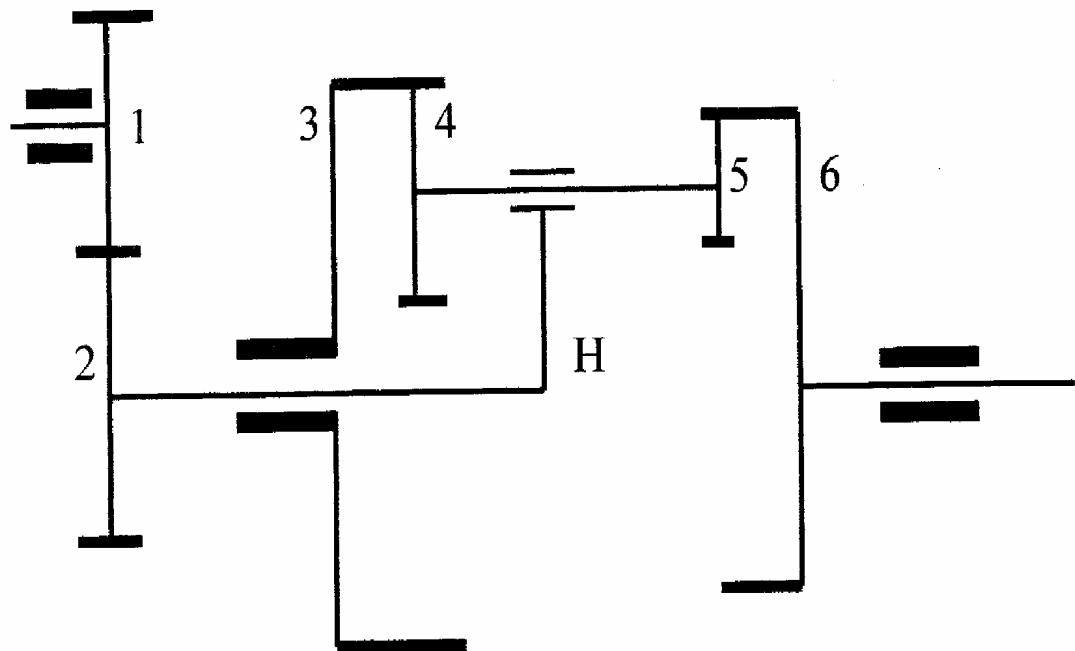
## 7. Задачи для самостоятельного решения.

Определить передаточное отношение в редукторах, если известно число зубьев зубчатых колес.

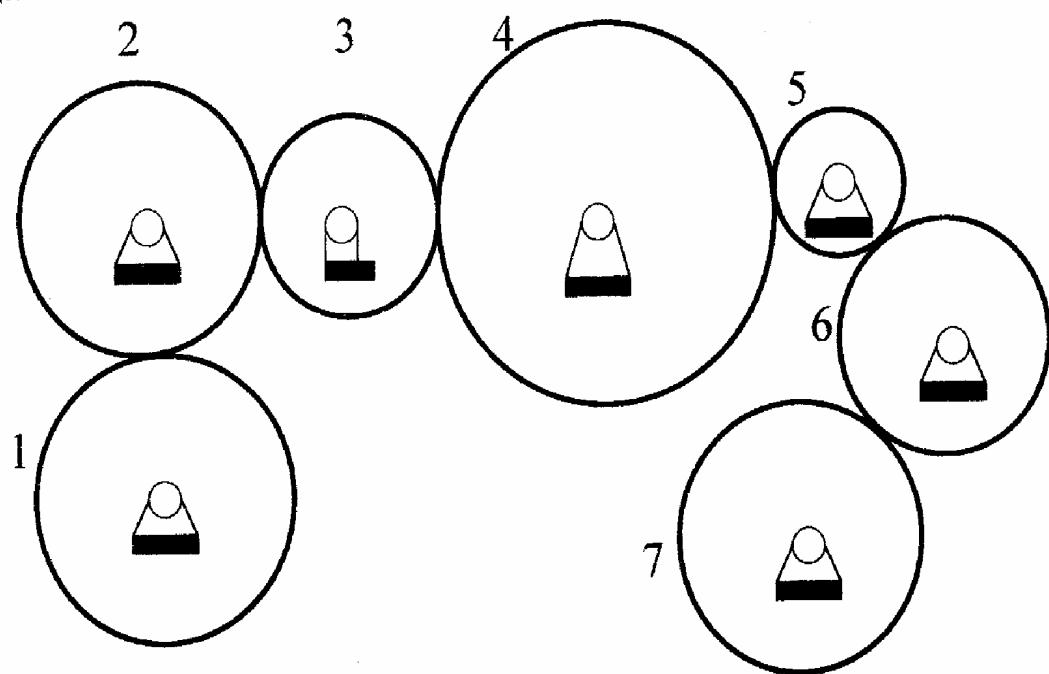
Задача № 1.



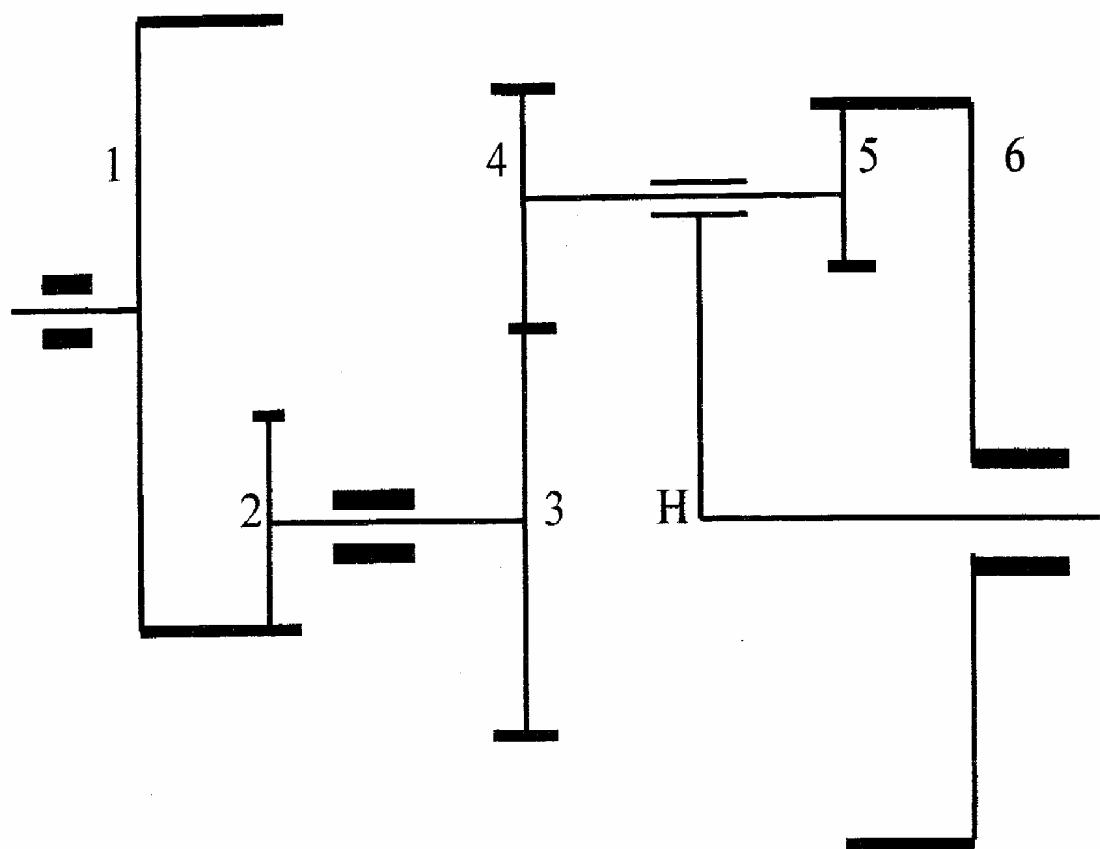
Задача № 2.



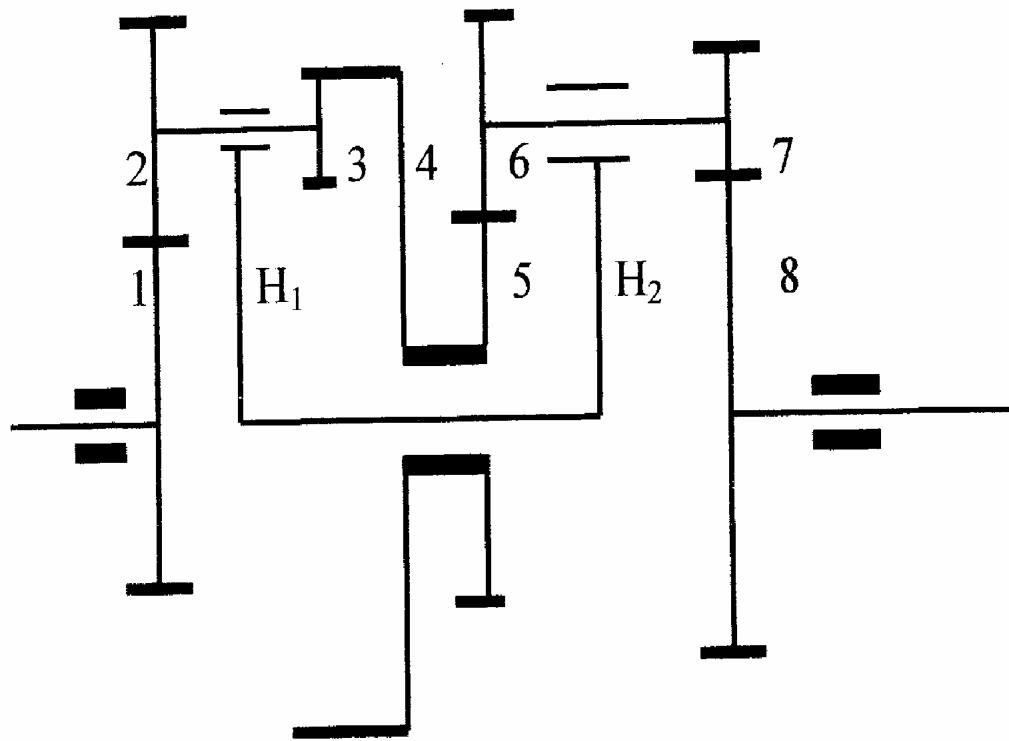
Задача № 3.



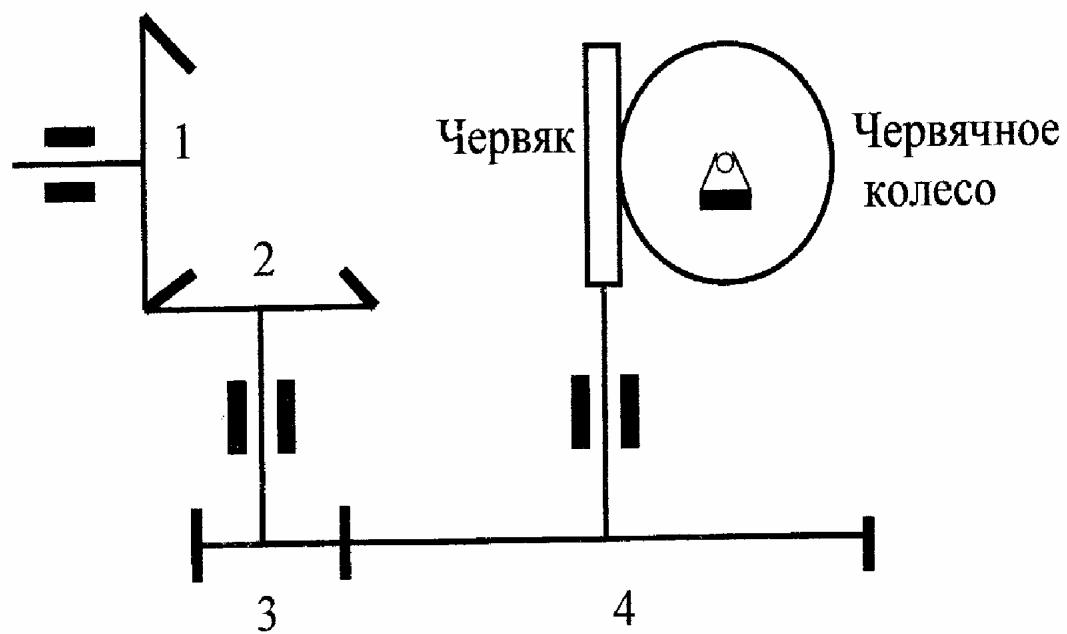
Задача № 4.



Задача № 5.

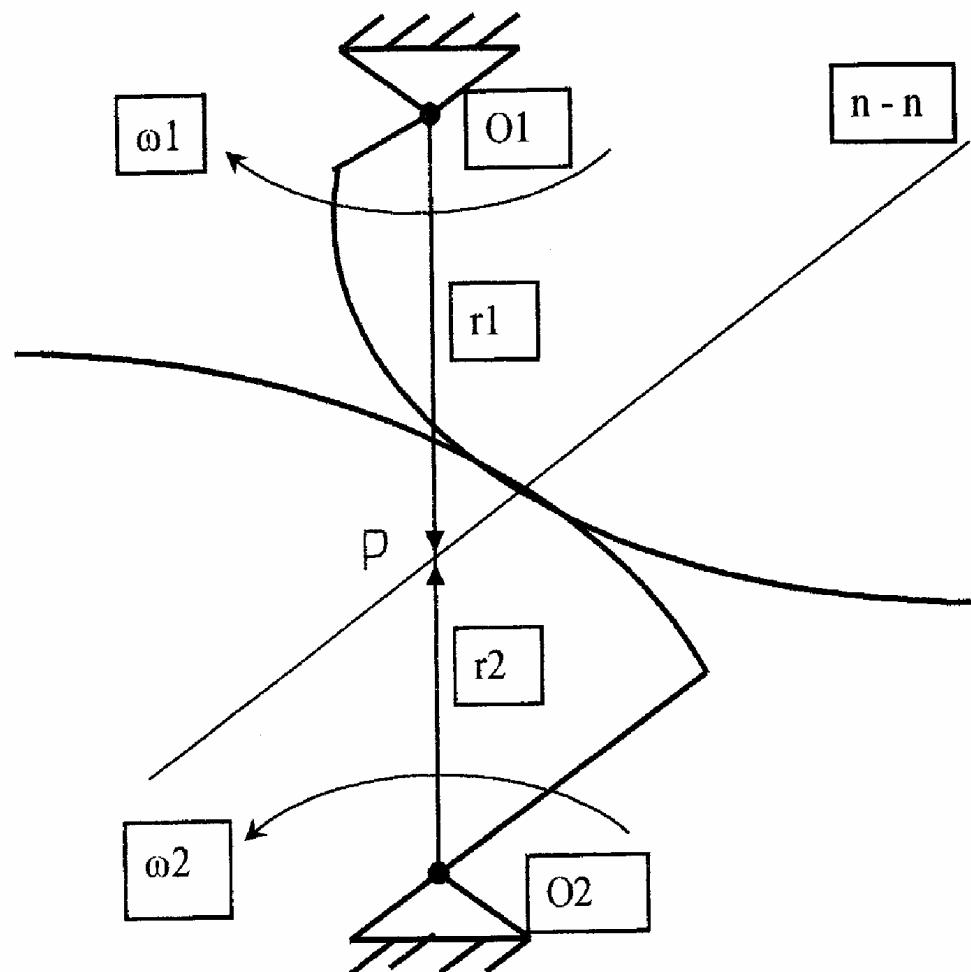


Задача № 6.



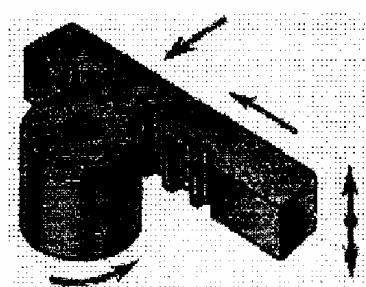
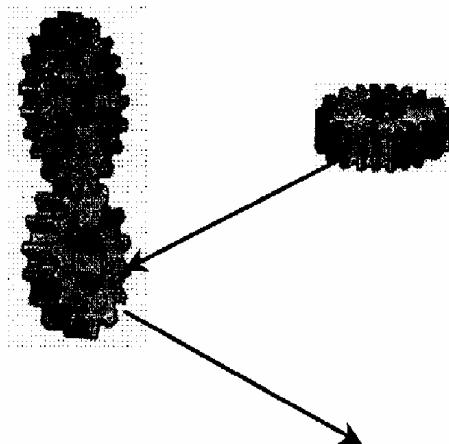
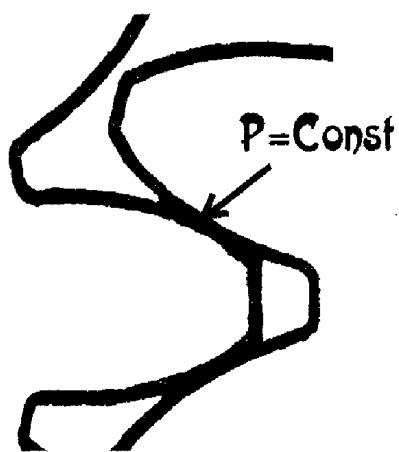
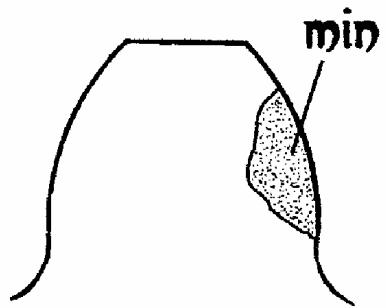
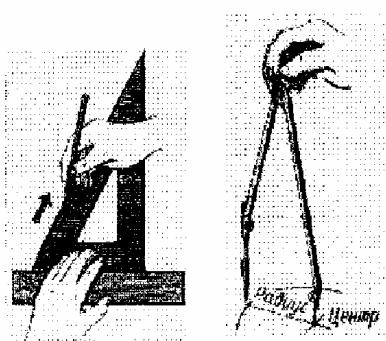
## ТЕМА № 6: ЭВОЛЬВЕНТНОЕ ЗАЦЕПЛЕНИЕ

### 1. Основная теорема зацепления.

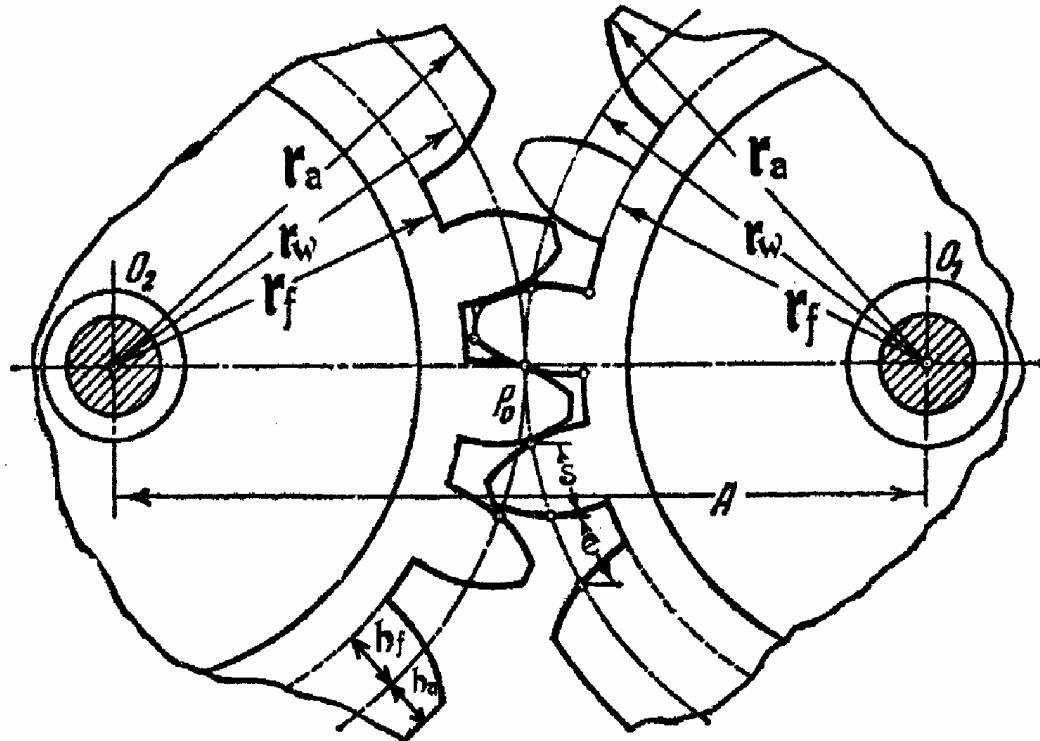


$$U_{12} = \frac{W_1}{W_1} = + \frac{O_2 P}{O_1 P} = + \frac{r_2}{r_1}$$

2. Требования, предъявляемые к профилям зубьев зубчатых колес: кинематические, динамические, технологические, эксплуатационные.



### 3. Основные размеры нулевых зубчатых колёс.



Если :  $r = r_w$  , то колёса нулевые.

$$m = \frac{P}{\pi} - \text{модуль.}$$

$r_a$  - радиус окружности вершин.

$r_f$  - радиус окружности впадин .

$r_w$  - радиус начальной окружности.

$r$  - радиус делительной окружности.

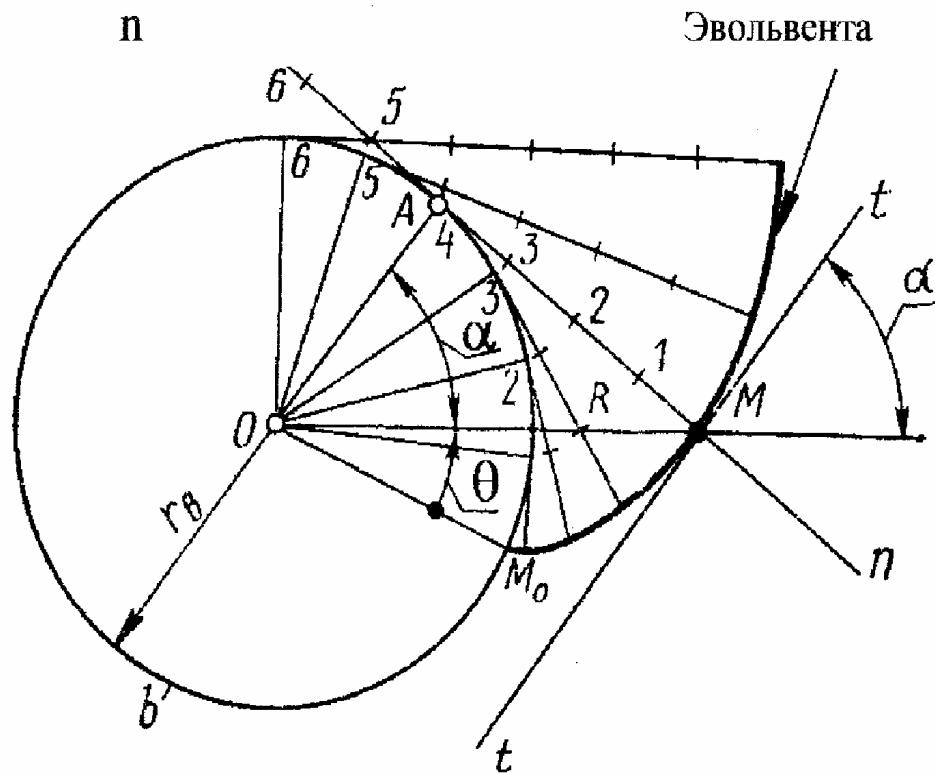
$h_a$  - высота головки зуба.

$h_f$  - высота ножки зуба.

$h$  - полная высота зуба.

$P$  - шаг по делительной окружности.

#### 4. Эвольвента окружности



$r_b$  – радиус основной окружности.

n-n – производящая прямая (образующая).

b – основная окружность.

t-t – касательная.

$\alpha$  - угол профиля рейки.

$\theta$  - эвольвентный угол.

$OM_0$  - начальный радиус-вектор эвольвенты.

$OM$  – текущий радиус эвольвенты.

Стандартные значения модулей:

1-й ряд (в мм): 0; 0,05; 0,06; 0,08; 0,1; 0,12; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8; 1,0; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 8; 10; 12; 15; 20; 25; 32; 40; 50; 60; 80.

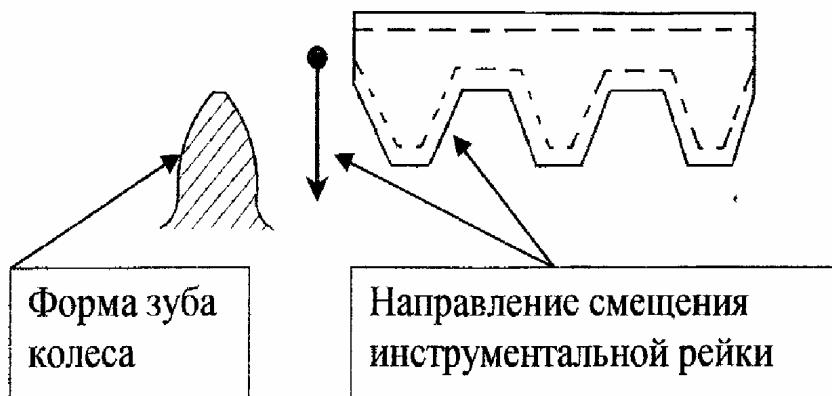
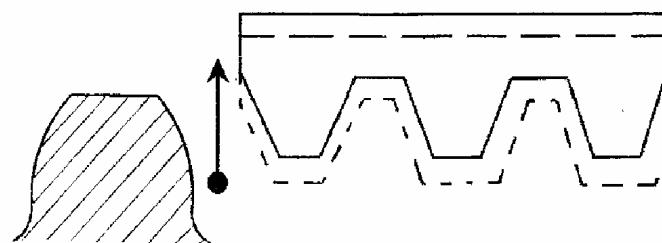
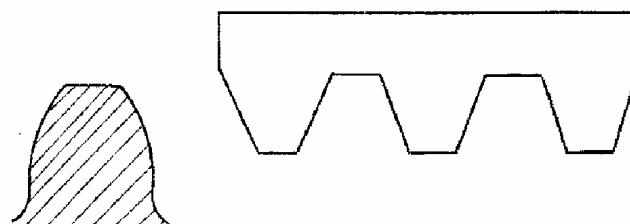
2-й ряд (в мм): 3,5; 4,5; 5,5; 7; 9; 11 и др.

## 5. Ненулевые зубчатые колёса: положительные и отрицательные.

Если  $r \neq r_\omega \Rightarrow$  то колеса ненулевые.

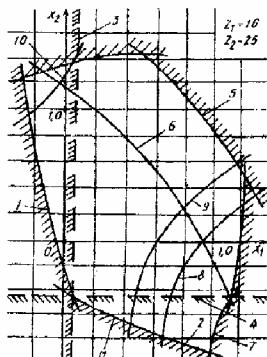
Зависимость формы зуба от смещения инструментальной рейки:

1. Смещение рейки = 0, колесо нулевое.
2. Рейку смещают от центра колеса, смещение = +, колесо положительное.
3. Рейку смещают к центру колеса, смещение = —, колесо отрицательное.



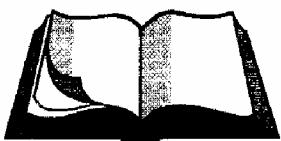
## 6. Методы выбора коэффициентов смещения инструментальной рейки.

1. Блокирующие контуры.



2. Рекомендации ЦКБР (центрального конструкторского бюро редукторостроения).

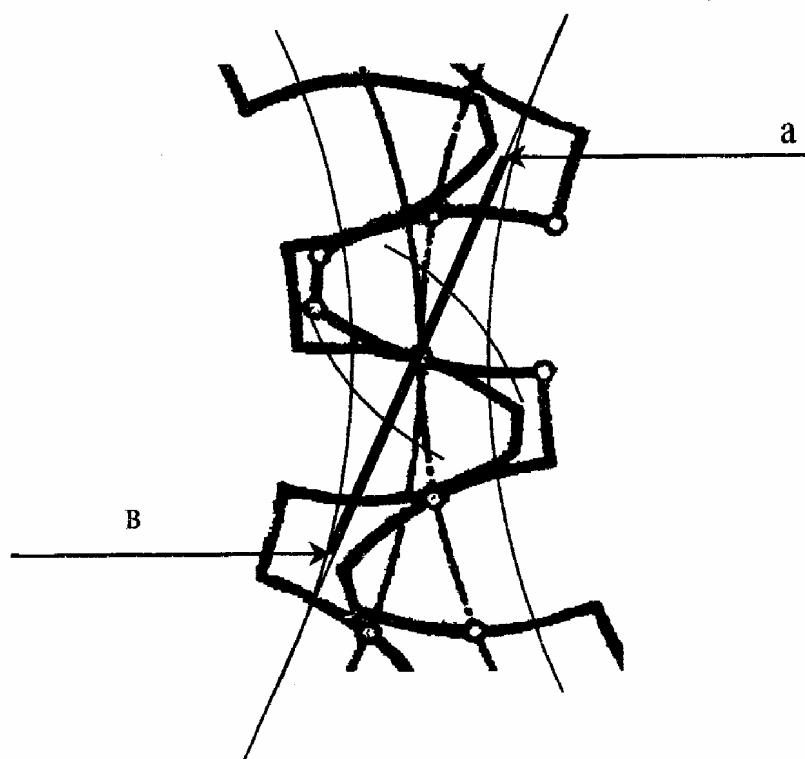
3. Рекомендации профессора Кудрявцева.



3. Условие “Отсутствие подреза ножки зуба” при изготовлении нулевого колеса с числом зубьев меньше 17.

$$X = \frac{17 - Z}{17}$$

## 7. Коэффициент перекрытия ( качественный показатель зацепления).



$$E_{\alpha} = \frac{a}{P_B} \geq 1,2,$$

где:

ав - длина практической линии зацепления,

P<sub>в</sub> - шаг по основной окружности.

Если E<sub>α</sub> = 1,4 , то это означает, что 40% всего времени работы двух зубчатых колес в зацеплении находится 4 зуба, а остальные 60% времени работы в зацеплении находится 2 зуба.

Если E<sub>α</sub> = 1,7 , то это означает, что 70% всего времени работы двух зубчатых колес в зацеплении находится 4 зуба, а остальные 30% времени работы в зацеплении находится 2 зуба.

## 8. Вопросы для самопроверки.

### 1. Какие зубчатые колеса называются нулевыми?

Ответ: колеса, у которых делительная окружность совпадает с начальной.

### 2. Что называется модулем зубчатого колеса, в чем он измеряется?

Ответ: параметр, принятый в качестве основной единицы для определения основных размеров зубчатых колес. Модуль это – величина, которая определяется как частное от деления шага по делительной окружности на  $\pi = 3,14$ . Модуль измеряется в мм.

### 3. Где находится полюс зацепления зубчатых колес?

Ответ: при переменном значении  $U_{12}$  полюс зацепления занимает на линии центров переменные положения. При постоянном значении  $U_{12}$  полюс зацепления располагается в одной и той же точке, которую можно определить следующим образом: как точка касания начальных окружностей зубчатых колес, или как точка пересечения межосевой линии с образующей, т.е. общей касательной к начальным окружностям.

### 4. Какие зубчатые колеса называются ненулевыми?

Ответ: колеса, у которых делительная окружность не совпадает с начальной.

### 5. Какие методы изготовления зубчатых колес вы знаете?

Ответ: метод копирования (инструмент – пальцевая или дисковая фреза), метод обкатки (инструмент – рейка, долбяк или червячная фреза).

### 6. Что такое инволюта угла $\alpha$ ?

Ответ: функция полярного угла  $\theta_i = \operatorname{tg} \alpha_i - \alpha_i$ , которая обозначается  $\operatorname{inv} \alpha_i$ , находится по специальным таблицам и называется эвольвентной функцией или инволютой угла  $\alpha$ .

### 7. Что называется зубчатой коробкой скоростей?

Ответ: зубчатый механизм, передаточное отношение которого можно изменять скачкообразно по ступеням.

### 8. Что такое угол зацепления?

Ответ: угол, заключенный между нормалью к межосевой линии и образующей.

### 9. Какие окружности называются начальными?

Ответ: окружности, которые катятся одна по другой без скольжения и касаются в полюсе зацепления.

### 10. Какая окружность называется делительной?

Ответ: окружность, у которой модуль является стандартной величиной.

### 11. Какая окружность называется основной?

Ответ: окружность, на которой начинается эвольвентный профиль зуба.

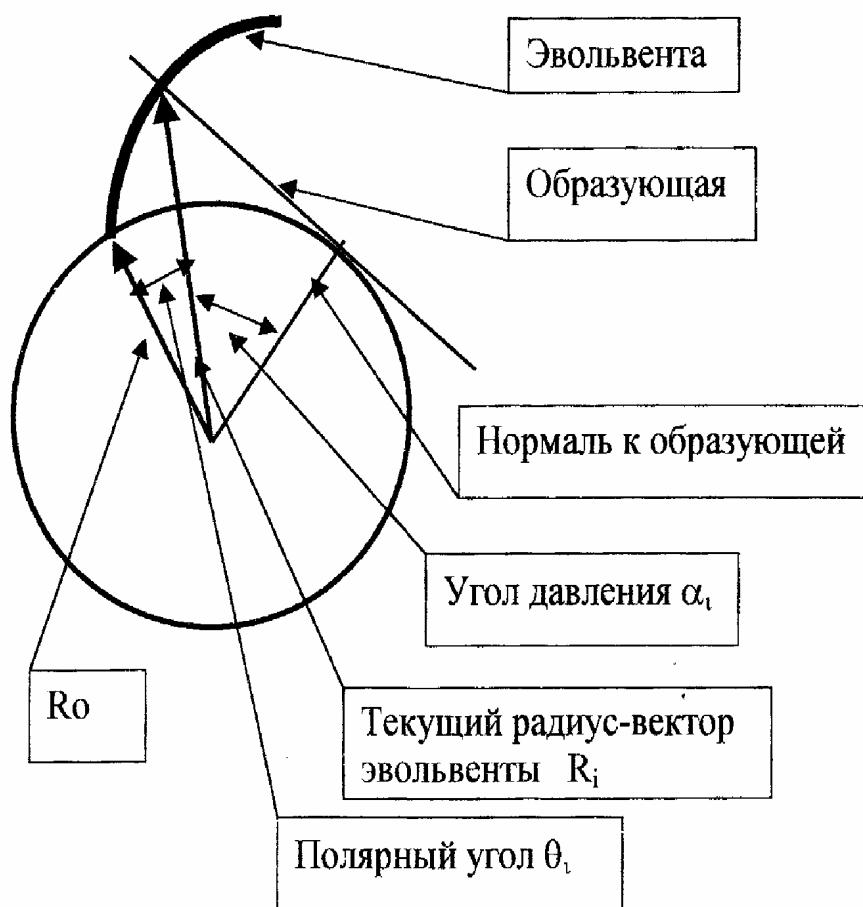
### 12. Какая окружность называется окружностью вершин?

Ответ: окружность, ограничивающая снаружи все головки зубьев внешнего зацепления.

### 13. Назовите основные свойства эвольвенты.

Ответ: эвольвента окружности это траектория точки прямой, катящейся по окружности без скольжения. Окружность называется основной, а прямая – образующей. Эвольвента обладает следующими свойствами:

- это односторонне ограниченная спираль, которая начинается на основной окружности и расположена вне ее пределов,
- образующая в любой точке эвольвенты перпендикулярна к ней,
- форма эвольвенты зависит только от радиуса основной окружности,
- угол между текущим радиус-вектором эвольвенты и перпендикуляром к образующей называется углом давления и обозначается  $\alpha_i$ ,
- координаты любой точки эвольвенты в полярной системе координат определяются текущим радиус-вектором по формуле:  $R_i = R_o / \cos \alpha_i$  и полярным углом  $\theta_i$ , который находится по специальным таблицам и является функцией угла давления  $\alpha_i$ . Эта функция называется эвольвентной функцией или инволютой угла  $\alpha$ , которая обозначается:  $\text{inv } \alpha_i$ . Эвольвентная функция записывается в следующем виде:  $\theta_i = \text{inv } \alpha_i = \tan \alpha_i - \alpha_i$ .



**14. Почему в формуле для определения коэффициента смещения (по одному из методов) стоит число 17?**

Ответ: для стандартного угла  $\alpha = 20^\circ$  и  $x' = 1$  получаем

$$X = \frac{17 - z}{17},$$

где 17 – это  $z_{\min}$  для угла зацепления  $\alpha = 20^\circ$  и  $x' = 1$ .

17 – это минимальное количество зубьев нулевого зубчатого колеса при изготовлении которого не будет происходить подреза ножки зуба инструментом.

**15. Какая окружность называется окружностью впадин?**

Ответ: окружность, ограничивающая ножки зубьев изнутри.

**16. Чему равна высота головки зуба у нулевых колес?**

Ответ:  $h_a = 1\text{m}$ .

**17. Чему равна высота ножки зуба у нулевых колес?**

Ответ:  $h_f = 1,25\text{m}$ .

**18. Напишите формулу для определения радиусов окружности вершин**

Ответ:  $r_a = mz/2 + m$ .

**19. Напишите формулу для определения радиусов окружности впадин**

Ответ:  $r_f = mz/2 - 1,25\text{m}$ .

**20. Напишите формулу для определения радиусов основной окружности**

Ответ:  $r_b = mz \cdot \cos\alpha / 2$ .

**21. Напишите формулу для определения радиусов делительной окружности**

Ответ:  $r = mz/2$ .

**22. Что означает знак – в передаточном отношении?**

Ответ: угловые скорости входного и выходного звена направлены в противоположные стороны.

**23. Как определяется число заходов червяка?**

Ответ: по количеству ниток видимых с торца червяка.

**24. На какие виды передач классифицируются механические передачи?**

Ответ: с гибкими звеньями; фрикционные; зубчатые.

**25. У каких зубчатых механизмов требуется определять знак передаточного отношения?**

Ответ: у плоских.

**26. Сколько заходов может быть у червяка?**

Ответ: от 1 до 4 заходов.

**27. Из скольких звеньев состоит одноступенчатый редуктор?**

Ответ: из трех.

**28. Чему равна степень подвижности планетарного редуктора?**

Ответ: 1.

**29. Чему равна степень подвижности дифференциального редуктора?**

Ответ: 2 и больше.

**30. По какому принципу классифицируются зубчатые механизмы?**

Ответ: оси параллельны; пересекаются; скрещиваются.

**31. Какие зубья бывают у зубчатых колес с параллельными осями?**

Ответ: прямой; косой; шевронный.

**32. Какое звено в червячной передаче является ведомым?**

Ответ: зубчатое колесо.

**33. Какое звено в червячной передаче является ведущим?**

Ответ: червяк.

**34. Назовите виды гибких звеньев**

Ответ: ремни; цепи.

**35. К какому типу механизмов относится червячный механизм?**

Ответ: пространственный.

**36. На что влияют промежуточные (паразитные) колеса в рядовом соединении зубчатых колес?**

Ответ: на знак передаточного отношения.

**37. Какие зубчатые колеса называются нулевыми?**

Ответ: колеса, у которых делительная окружность совпадает с начальной.

**38. Что такое угол зацепления?**

**39. Напишите формулу для определения радиусов окружности впадин**

Ответ:

**40. Чему равна степень подвижности планетарного редуктора?**

Ответ: 1.

**40. Какая окружность называется начальной?**

Ответ:

**41. Какая окружность называется делительной?**

Ответ:

**41. Напишите формулу для определения радиусов основной окружности**

Ответ:

**42. Напишите формулу для определения радиусов делительной окружности.**

Ответ:

## 9. Таблица $\theta_i = \operatorname{inv} \alpha_i = \operatorname{tg} \alpha_i - \alpha_i$ .

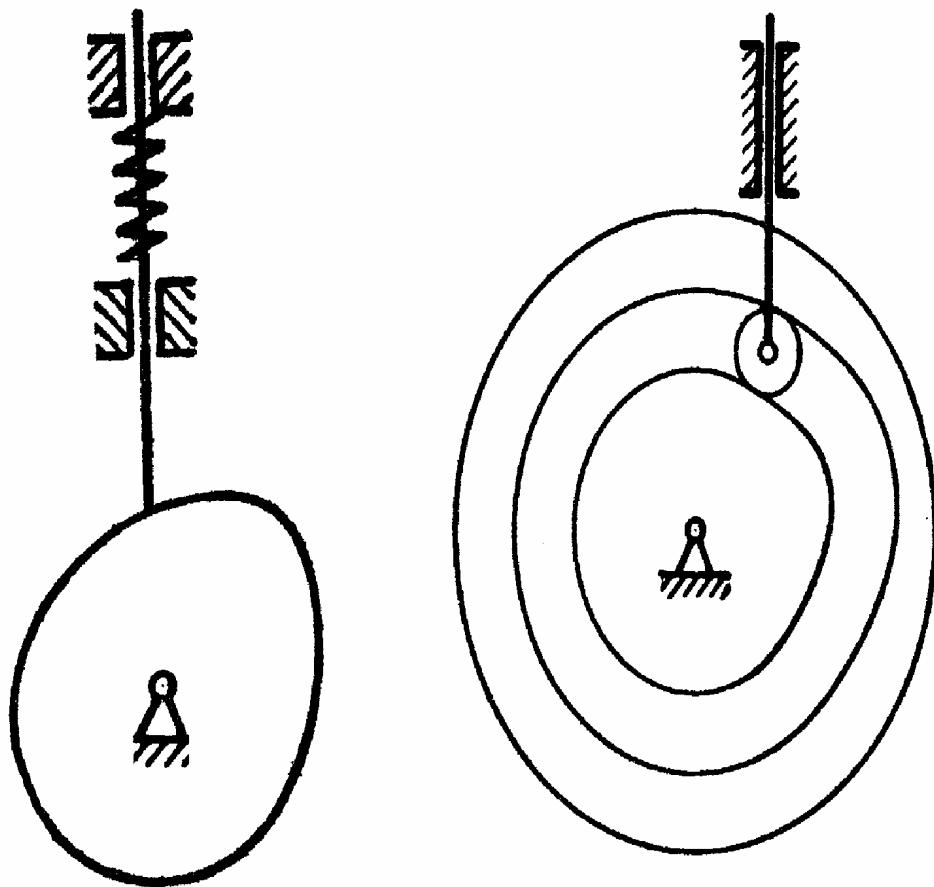
Градусы	Порядок	Градусы													
		0'	5'	10'	15'	20'	25'	30	35	40	45	50	55	Порядок	Градусы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,000	00177	00225	00281	00346	00420	00504	00598	00704	00821	00950	01092	01248	0,000	1
2	0,000	01318	01603	01804	02020	02253	02503	02771	03058	03364	03689	04035	04402	0,000	2
3	0,000	04790	05201	05634	06091	06573	07078	07610	08167	08751	09362	10000	10668	0,000	3
4	0,000	11364	12090	12847	13634	14453	15305	16189	17107	18059	19045	20067	21125	0,000	4
5	0,000	22220	23352	24522	25731	26978	28266	29694	30963	32394	33827	35324	36864	0,000	5
6	0,00	03845	04008	04175	04347	04524	04706	04892	05083	05280	05481	05687	05898	0,00	6
7	0,00	06115	06337	06564	06797	07035	07279	07528	07783	08044	08310	08582	08861	0,00	7
8	0,00	09145	09435	09732	10034	10343	10659	10980	11308	11643	11984	12332	12687	0,00	8
9	0,00	13048	13416	13792	14174	14563	14960	15363	15774	16193	16618	17051	17492	0,00	9
10	0,00	17941	18397	18860	19332	19812	20299	20795	21299	21810	22330	22859	23396	0,00	10
11	0,00	23941	24495	25057	25628	26208	26797	27394	28001	28616	29241	29875	30518	0,00	11
12	0,00	31171	31832	32504	33185	33875	34555	35285	36005	36735	37474	38224	38984	0,00	12
13	0,00	39754	40534	41325	42126	42938	43760	44593	45437	46291	47157	48033	48921	0,00	13
14	0,00	49819	50729	51650	52582	53526	54482	55448	56427	57417	58420	59434	60460	0,00	14
15	0,00	61488	62548	63611	64686	65773	66873	67985	69110	70248	71398	72561	73738	0,00	15
16	0,0	07493	07613	07735	07857	07982	08107	08234	08362	08492	08623	08756	08889	0,0	16
17	0,0	09025	09161	09299	09439	09580	09722	09866	10012	10158	10607	10456	10608	0,0	17
18	0,0	10760	10915	11071	11228	11387	11547	11709	11873	12038	12205	12373	12543	0,0	18
19	0,0	12715	12888	13063	13240	13418	13598	13779	13963	14148	14334	14523	14713	0,0	19
20	0,0	14904	15098	15293	15490	15689	15890	16092	16296	16502	16710	16920	17132	0,0	20
21	0,0	17345	17560	17777	17996	18217	18440	18665	18891	19120	19350	19583	19817	0,0	21
22	0,0	20054	20292	20533	20775	21019	21266	21514	21765	22018	22272	22529	22788	0,0	22
23	0,0	23044	23812	23577	23945	24414	24386	24936	25214	258495	25778	26062	0,0	23	
24	0,0	26350	26639	26931	27225	27521	27820	28121	28424	28729	29037	29348	29660	0,0	24
25	0,0	29975	30293	30613	30935	31260	31587	31917	32249	32583	32920	33260	33602	0,0	25
26	0,0	33947	34294	34644	34997	35352	35709	36069	36432	36798	37166	37537	37910	0,0	26
27	0,0	38287	38666	39047	39432	39819	40209	40602	40937	41396	41797	42201	42607	0,0	27
28	0,0	43017	43430	43845	44264	44685	45110	45537	45967	46400	46837	47276	47718	0,0	28
29	0,0	48164	48612	49064	49518	49976	50437	50901	51363	51838	52312	52788	53268	0,0	29
30	0,0	53751	54238	54728	55221	55711	56217	56726	57736	58249	58763	59285	0,0	30	
31	0,0	58809	60335	60856	61400	61937	62478	63022	63570	64122	64677	65236	65798	0,0	31
32	0,0	66364	66934	67507	68084	68665	69250	69838	70430	71026	71626	72230	72838	0,0	32
33	0,0	73449	74064	74684	75307	75934	76565	77200	77839	78483	79130	79781	80437	0,0	33
34	0,0	81097	81760	82422	83100	83777	84457	85142	85832	86525	87223	87925	88631	0,0	34
35	0,0	89342	90058	90777	91502	92230	92963	93701	94443	95190	95942	96698	97459	0,0	35
36	0	09822	09899	09977	10055	10133	10212	10292	10371	10452	10533	10614	10696	0	36
37	0	10778	10861	10944	11028	11113	11197	11283	11369	11455	11542	11630	11718	0	37
38	0	11806	11895	11985	12075	12165	12257	12348	12441	12534	12627	12721	12815	0	38
39	0	12911	13006	13102	13199	13297	13395	13493	13592	13692	13792	13893	13996	0	39
40	0	14097	14200	14303	14407	14511	14616	14722	14829	14936	15043	15152	15261	0	40
41	0	15370	15480	15591	15703	15815	15928	16041	16156	16270	16386	16502	16619	0	41
42	0	16737	16855	16974	17093	17214	17335	17457	17579	17702	17826	17951	18076	0	42
43	0	18202	18329	18457	18585	18714	18844	18975	19106	19238	19371	19505	19639	0	43
44	0	19774	19910	20047	20185	20323	20463	20603	20743	20885	21028	21171	21315	0	44
45	0	21460	21606	21753	21900	22049	22198	22348	22499	22651	22804	22958	23112	0	45
46	0	23268	23424	23582	23740	23899	24049	24220	24382	24545	24709	24874	25040	0	46
47	0	25206	25374	25543	25713	25883	26055	26228	26401	26576	26752	26929	27107	0	47
48	0	27285	27465	27646	27828	28012	28196	28381	28567	28755	28943	29133	29724	0	48
49	0	29516	29709	29983	30098	30295	30492	30691	30891	31092	31295	31498	31708	0	49
50	0	31909	32116	32324	32534	32745	32957	33171	33385	33681	33818	34037	34257	0	50
51	0	34478	34700	34924	35149	35376	35604	35833	36063	36295	36529	36763	36999	0	51
52	0	37237	37476	37716	37958	38202	38446	38693	38941	39190	39441	39693	39947	0	52
53	0	40202	40459	40717	40977	41239	41502	41767	42034	42302	42571	42843	43116	0	53

Примеры пользования таблицей.

- Найти  $\operatorname{inv}$  угла  $\alpha_{\text{вн}} = 14^\circ 30'$ ,  $\operatorname{inv} \alpha_{\text{вн}} = 0,0055448$ .
- Найти  $\operatorname{inv}$  угла  $\alpha_{\text{вн}} = 22^\circ 18' 25''$ . По таблице находим  $\operatorname{inv} 22^\circ 15' = 0,020775$ , табличная разность  $0,000244$  на 5',  $0,000244 \cdot 205 = 300$ . Дополнительная величина  $\operatorname{inv}$  равна  $= 0,000171$ , откуда  $\operatorname{inv} 22^\circ 17' 25'' = 0,020775 + 0,000171 = 0,020946$ .

## ТЕМА 7 : КУЛАЧКОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ

### 1. Особенности кулачковых механизмов.

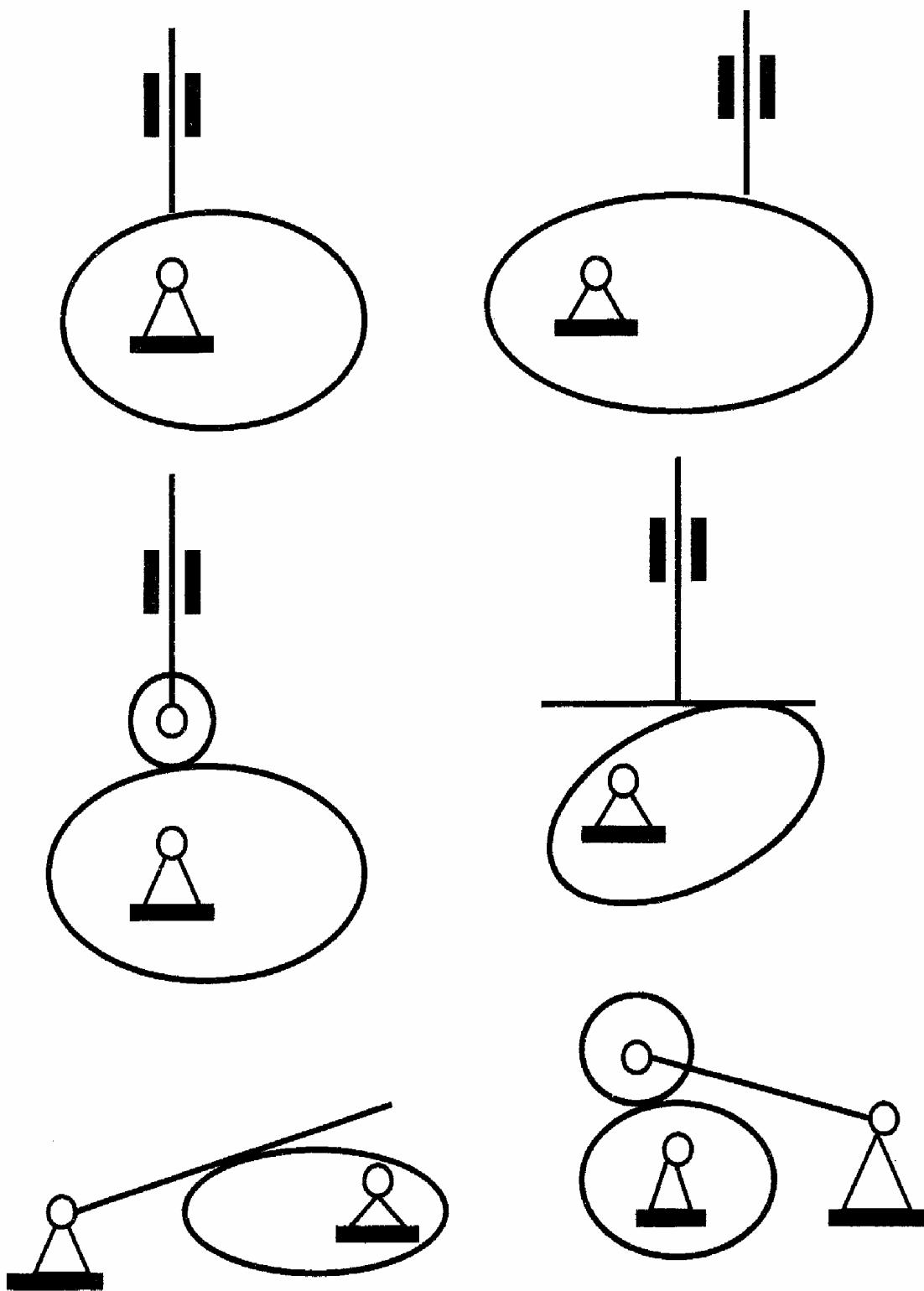


Кулачковые механизмы одни из самых распространенных механизмов в технике.

В кулачковых механизмах можно получить любой закон движения ведомого звена (толкателя).

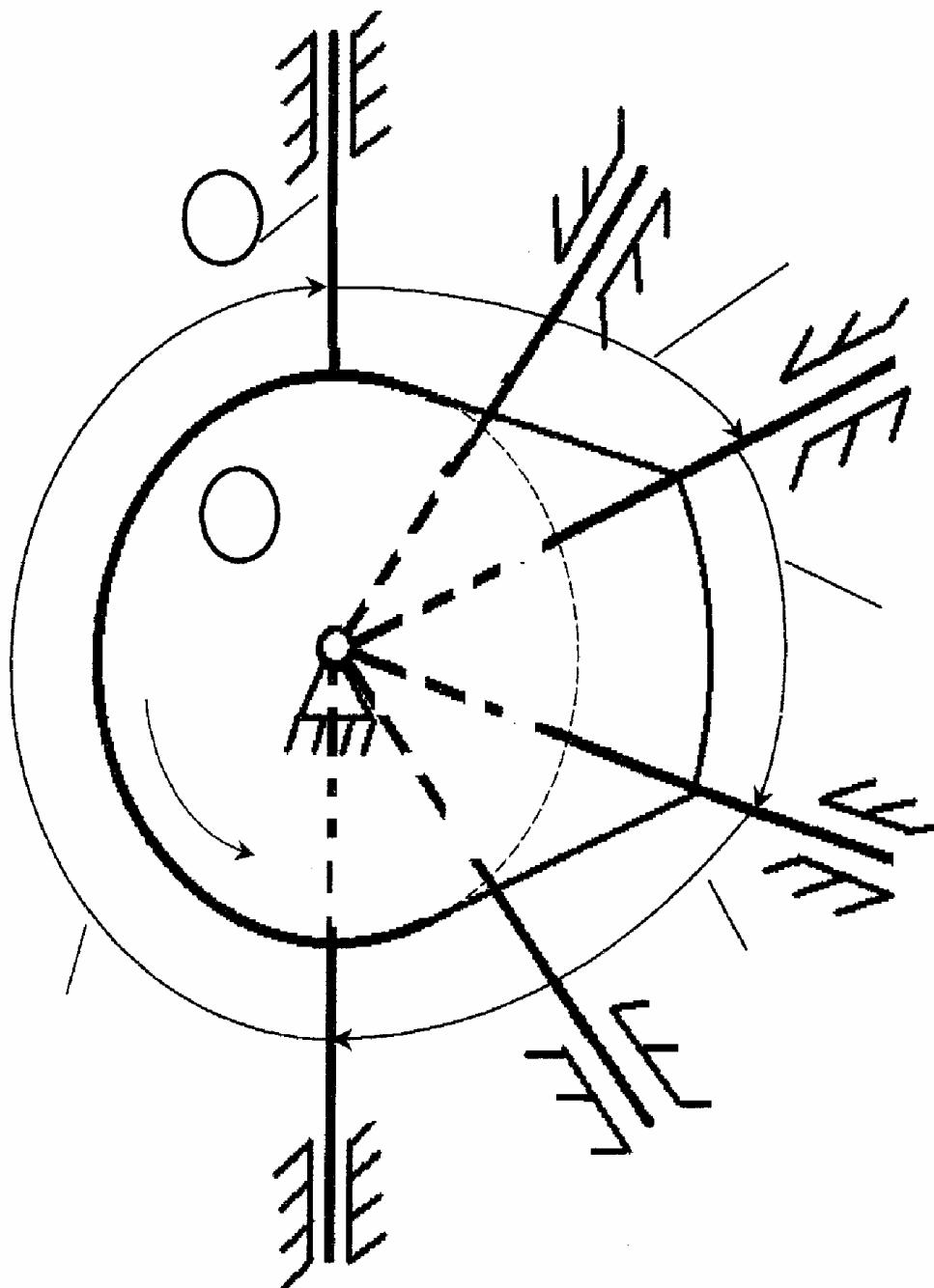
Для обеспечения постоянного контакта между ведомым и ведущим звеном необходимо их силовое (пружина) или геометрическое (паз) замыкание.

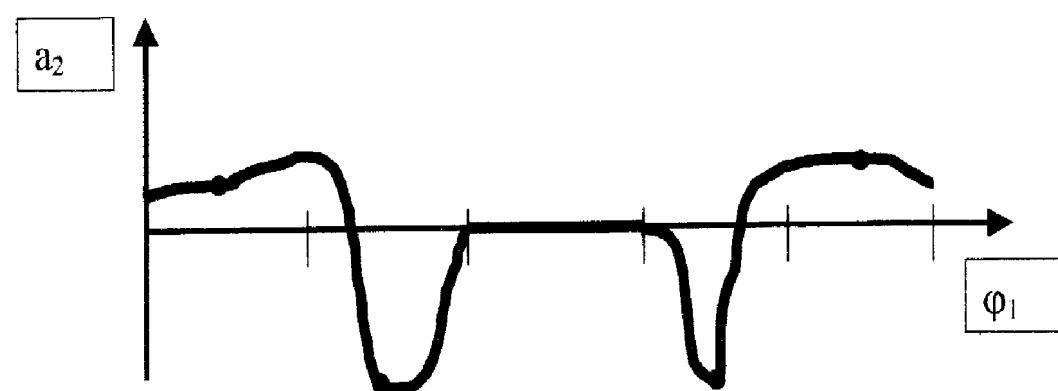
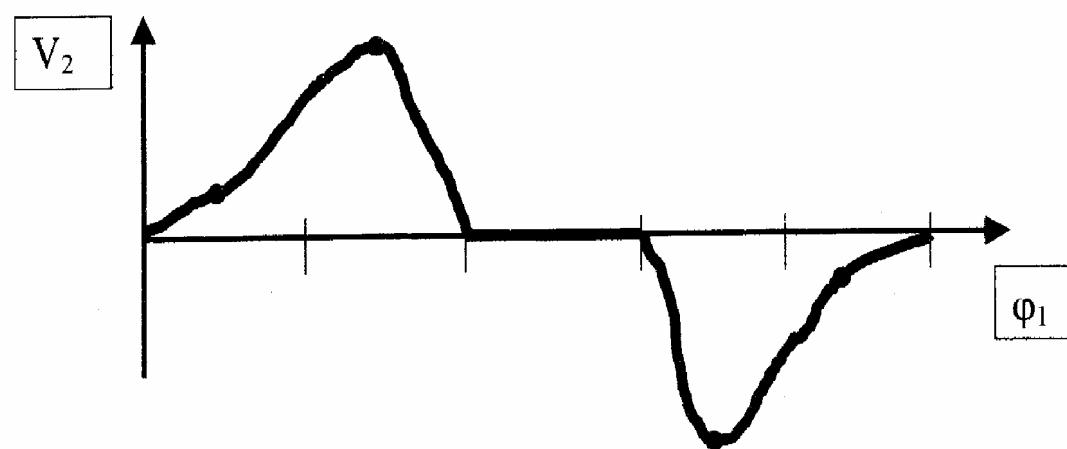
## 2. Классификация кулачковых механизмов.



### 3. Анализ кулачковых механизмов.

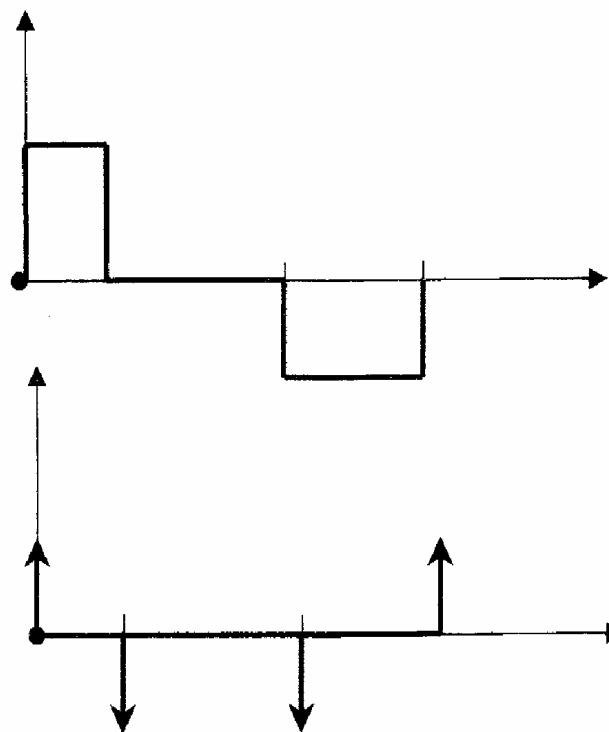
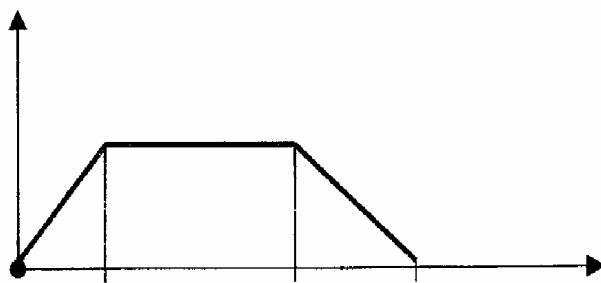
Цель: построить зависимости:  $S_2(\phi_1)$ ;  $V_2(\phi_1)$ ;  $a_2(\phi_1)$ .





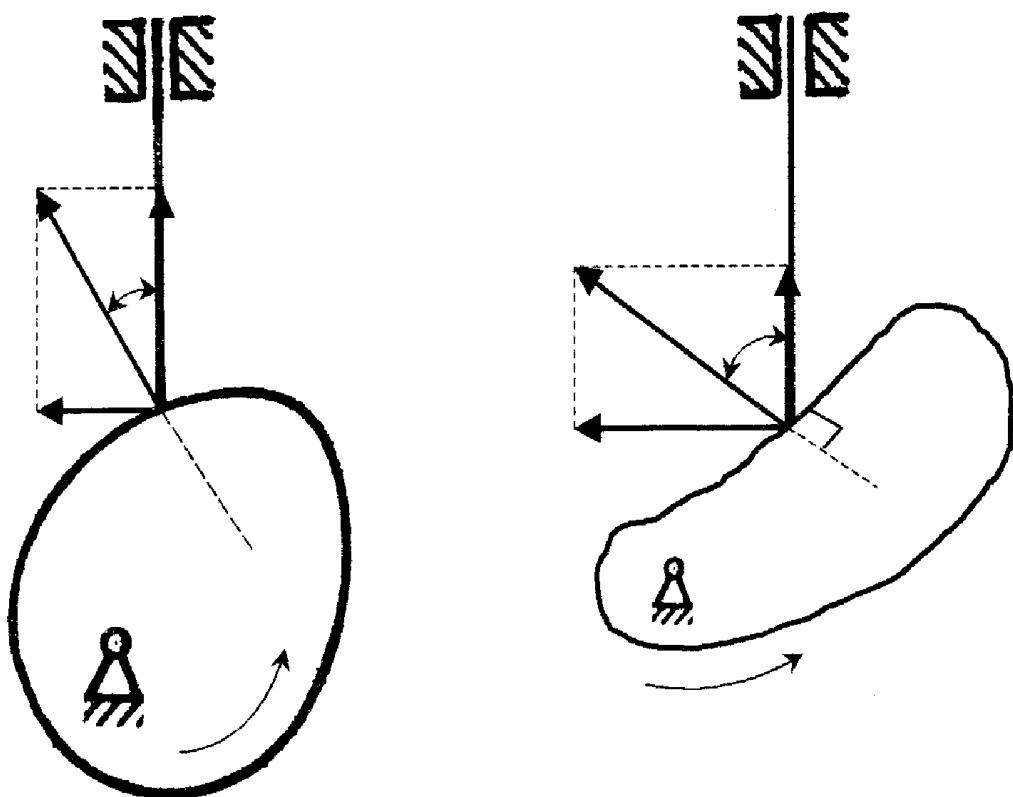
Зависимости скорости и ускорения толкателя стоятся методом графического дифференцирования.

#### 4. Мягкие и жесткие удары.



При линейном законе движения толкателя на фазах подъема и опускания скорость толкателя будет постоянна, а ускорения могут достигать бесконечности. Следовательно, силы, действующие на звенья механизма, теоретически также достигают бесконечности. Это вызывает появление в механизме так называемых жестких ударов, которые могут привести к разрушению механизма.

## 5. Углы давления в кулачковых механизмах.



В случае, если угол давления ( $\alpha$ ) в кулачковых механизмах превысит допустимое значение, то может произойти заклинивание механизма.

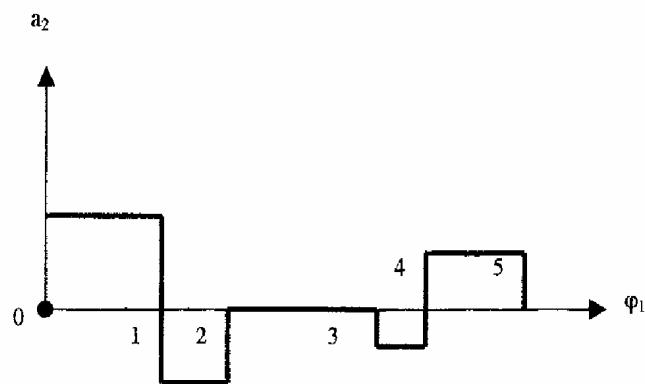
Например, в кулачковых механизмах с игольчатым толкателем угол давления не должен превышать 25-30 градусов.

Углом давления называется угол, заключенный между направлением вектора скорости толкателя и направлением вектора реакции кулачка на толкатель.

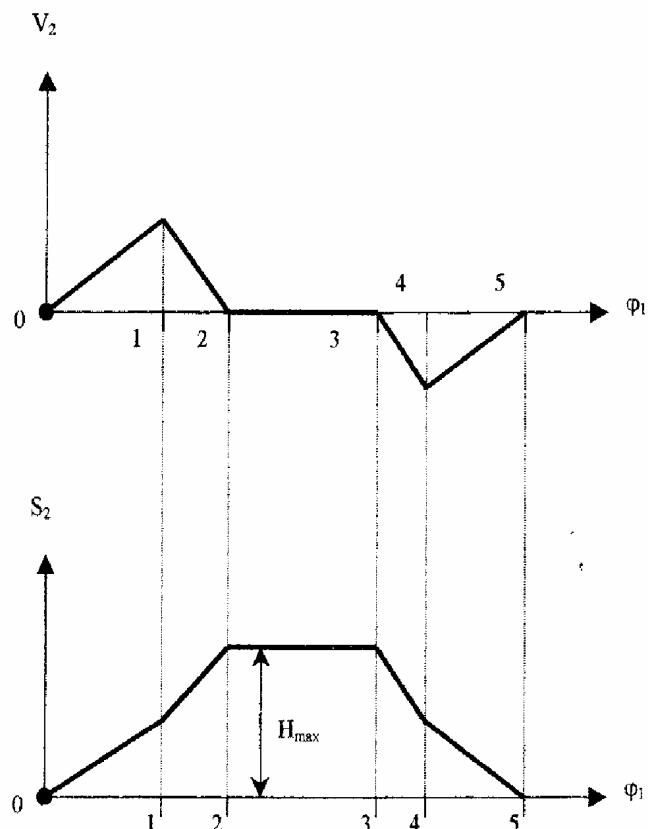
## 6. Синтез кулачковых механизмов

При синтезе кулачкового механизма считаются известными : схема механизма, фазовые углы, максимальный ход толкателя, допустимый угол давления, а также график зависимости ускорения толкателя от угла поворота кулачка.

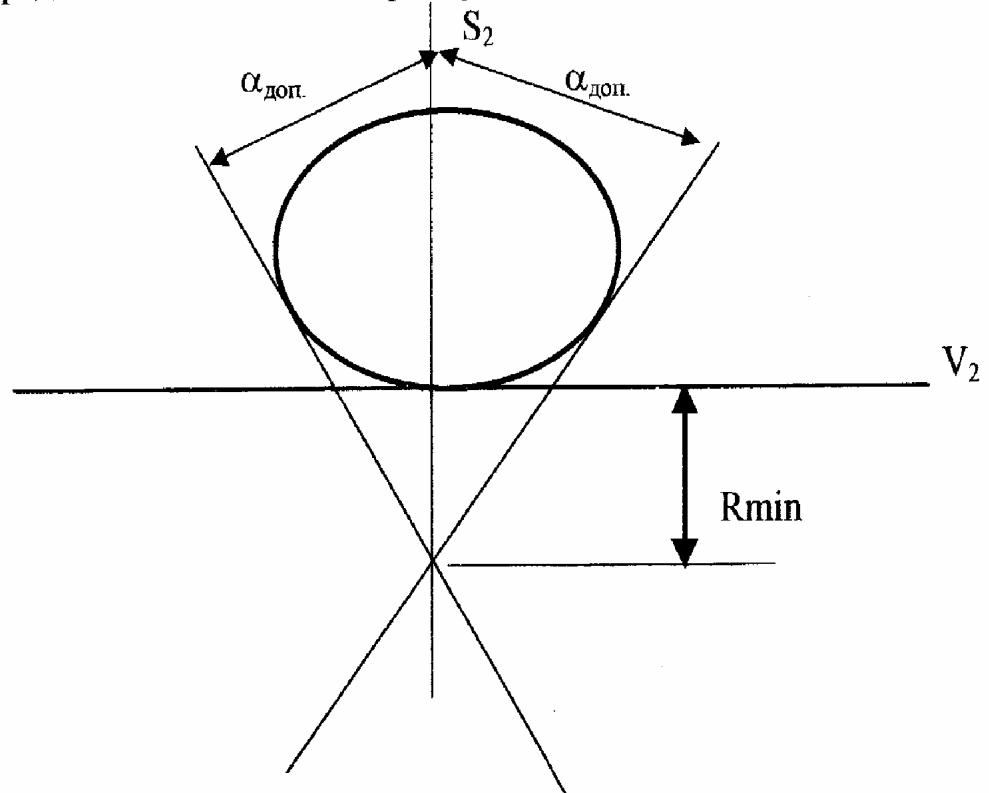
Требуется по заданным условиям построить профиль кулачка.



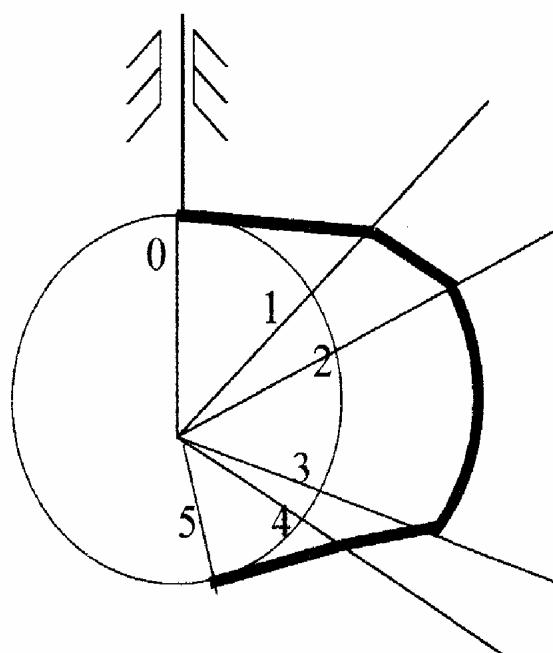
Методом графического интегрирования строим графики  $V_2(\phi_1)$  и  $S_2(\phi_1)$ ;



По графику  $S_2(V_2)$  с учетом допустимого угла давления ( $\alpha_{\text{доп.}}$ ) определяем минимальный радиус шайбы кулачка ( $R_{\min}$ ) и



строим профиль кулачка.



## 7. Вопросы для самопроверки.

### 1. Какие углы называются фазовыми?

Ответ: углы  $\Phi_{поднятия}$ ,  $\Phi_{ дальнего стояния}$ ,  $\Phi_{опускания}$  – называются фазовыми углами.

### 2. Какой угол называется углом давления?

Ответ: это угол между направлением вектора скорости толкателя и реакцией в точке касания кулачка и толкателя.

### 3. Назовите фазовые углы механизма?

Ответ: углы  $\Phi_{поднятия}$ ,  $\Phi_{ дальнего стояния}$ ,  $\Phi_{опускания}$ .

### 4. В чем заключается синтез кулачкового механизма?

Ответ: в определении основных размеров и профиля кулачка по заданным кинематическим и динамическим параметрам.

### 5. В чем заключается анализ кулачкового механизма?

Ответ: в определении закона движения толкателя по заданным: профилю кулачка, соответствующему закону его движения, размерам звеньев и схеме механизма.

### 6. Что такое жесткие удары в кулачковом механизме?

Ответ: при жестких ударах значения ускорения достигают значительных величин или даже бесконечности.

### 7. Что такое мягкие удары в кулачковом механизме?

Ответ: при мягких ударах значения ускорения достигают небольших величин.

### 8. Что такое инверсия?

Ответ: сообщение кулачку и толкателю общей угловой скорости  $-\omega_1$ , равную и обратно направленную угловую скорость  $\omega_1$  кулачка.

### 9. Как выбрать минимальный радиус шайбы кулачка?

Ответ: увеличивая радиус получим меньшие углы давления, но большие габариты. Уменьшая – возрастают углы давления и уменьшается коэффициент полезного действия. При динамическом синтезе радиус шайбы выбирают из условия обеспечения угла давления меньше допустимого.

### 10. Классификация кулачковых механизмов?

Ответ: кулачковые механизмы: пространственные и плоские. Плоские: 1) кулачковый механизм с игольчатым толкателем со смещением. 2) кулачковый механизм с игольчатым толкателем без смещения 3). кулачковый механизм с роликовым толкателем без смещения. 4) кулачковый механизм с роликовым толкателем со смещением. 5) кулачковый механизм с плоским толкателем со смещением. 6) кулачковый механизм с плоским толкателем без смещения. 7) кулачковый механизм с качающимся толкателем. 8) кулачковый механизм с качающимся толкателем с роликом.

**11. Особенности кулачковых механизмов?**

- Ответ: 1) Можно получить любой закон движения ведомого звена.  
2) Обязательно наличие силового или геометрического замыкания.  
3) Самые распространенные механизмы в технике.

**12. Какое звено в кулачковом механизме ведущее?**

Ответ: кулачок.

**13. Какое звено в кулачковом механизме ведомое?**

Ответ: толкатель.

**14. Цель силового замыкания?**

Ответ: для обеспечения постоянного контакта звеньев, образующих высшую пару.

**15. Цель геометрического замыкания?**

Ответ: для обеспечения постоянного контакта звеньев, образующих высшую пару.

**16. Из скольких звеньев состоит кулачковый механизм с игольчатым толкателем?**

Ответ: из трех: кулачок, толкатель, стойка.

**17. Из скольких звеньев состоит кулачковый механизм с роликовым толкателем?**

Ответ: из четырех: кулачок, толкатель, ролик, стойка.

**18. Из скольких звеньев состоит кулачковый механизм с плоским толкателем?**

Ответ: из трех.

**19. Из скольких звеньев состоит кулачковый механизм с качающимся толкателем?**

Ответ: из трех.

**20. Из скольких звеньев состоит кулачковый механизм с качающимся толкателем с роликом?**

Ответ: из четырех.

**21. Какой механизм называется кулачковым механизмом со смешенным толкателем?**

Ответ: кулачковый механизм, у которого ось перемещения толкателя не проходит через ось вращения кулачка.

**22. Что нужно знать, чтобы спроектировать профиль кулачка?**

Ответ: кинематическую схему, закон движения выходного звена в виде функции от обобщенной координаты, максимальный ход толкателя, фазовые углы и допустимый угол давления.

**23. Какие требования должны удовлетворяться при выборе закона движения?**

Ответ: закон должен удовлетворять требованиям технологического процесса, для выполнения которого проектируется кулачковый механизм.

**24. Что такое жесткие удары?**

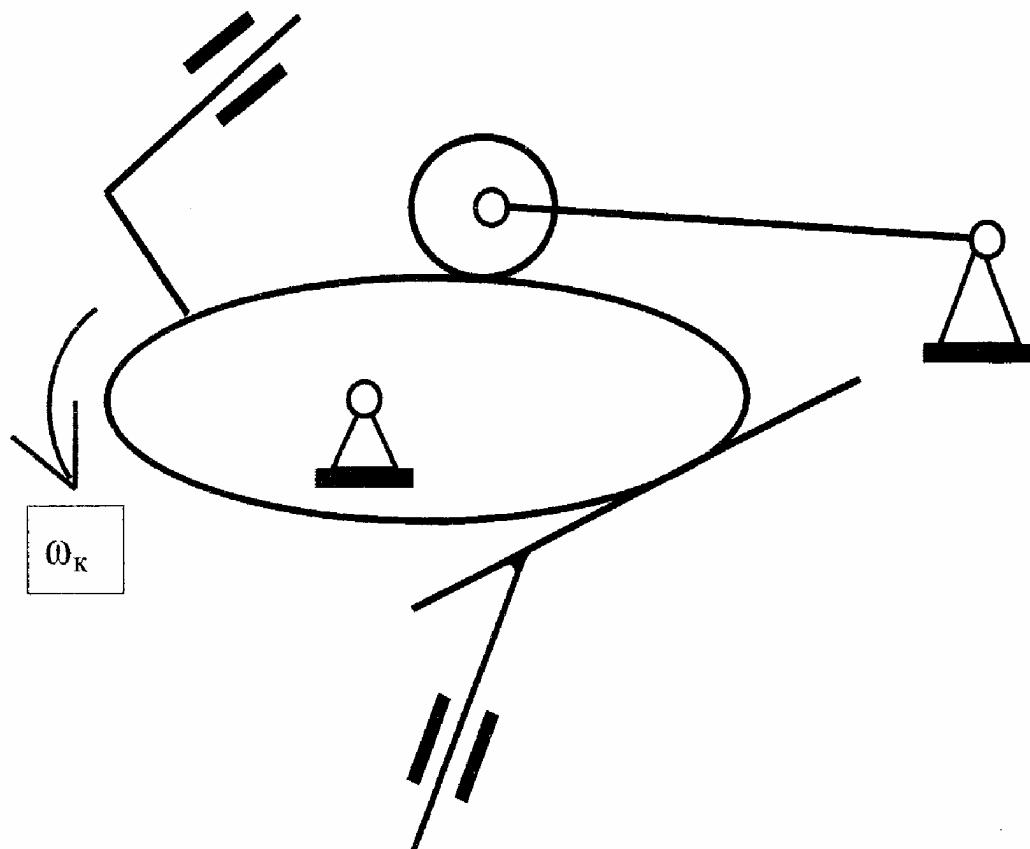
Ответ: удары, при которых сила, действующая на звенья механизма, теоретически достигает бесконечности.

**25. Какие законы изменения аналогов ускорений на фазе подъема вы знаете?**

Ответ: линейно-убывающий; косинусоидальный; синусоидальный;  
равноускоренный; трапециoidalный.

**8. Задачи для самостоятельного решения.**

Задача 1. Покажите на приведенной схеме углы давления.



# ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕМА 1: СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ.....	3
1. История развития ТММ. Основные понятия (машина, механизм, звено, кинематическая пара).....	3
2. Степень подвижности плоских и пространственных механизмов.....	10
3. Пассивные связи. Лишние степени свободы.....	11
4. Замена высших кинематических пар низшими кинематическими парами.....	12
5. Принцип образования плоских механизмов. (Ассур Л.В., Артоболевский И.И.).....	13
6. Классификация групп Ассура.....	14
7. Алгоритм проведения структурного анализа.....	15
8. Вопросы для самопроверки.....	16
9. Задачи для самостоятельного решения.....	26
ТЕМА 2: КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ.....	30
1. Цель и задачи кинематического анализа.....	30
2. Масштабы в ТММ.....	30
3. Определение перемещений.....	31
4. Определение скоростей.....	31
5. Определение ускорений.....	33
6. Кинематические диаграммы.....	35
7. Вопросы для самопроверки.....	37
8. Задачи для самостоятельного решения.....	43
ТЕМА 3,4: ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА.....	45
1. Цель и задачи динамического анализа.....	45
ТЕМА 3: СИЛОВОЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА.....	47
1. Классификация сил в механизме.....	47
2. Методы силового расчета механизма.....	48
3. Порядок кинетостатического расчета механизма.....	49
4. Реакции в кинематических парах механизма.....	50

5. Порядок силового расчета группы Ассура.....	50
6. Порядок силового расчета ведущего звена.....	50
7. Теорема о жестком рычаге Жуковского.....	51
8. Статическое уравновешивание вращающихся масс..	52
9. Вопросы для самопроверки.....	54
 ТЕМА 4: ДИНАМИКА МЕХАНИЗМА.....	59
1. Тахограмма механизма.....	59
2. Коэффициент неравномерности хода механизма.....	60
3. Кинетическая энергия механизма.....	60
4. Приведенная масса (приведенный момент инерции) механизма.....	61
5. Приведенная сила (приведенный момент).....	62
6. Диаграмма Фердинанда Вигтенбауэра.....	63
7. Определение момента инерции маховика.....	64
8. Вопросы для самопроверки.....	65
 ТЕМА 5: МЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАЧИ.....	66
1. Классификация механизмов передач.....	66
2. Классификация зубчатых механизмов.....	67
3. Многоступенчатые редукторы.....	70
4. Рядовое соединение зубчатых колес с паразитными колесами.....	71
5. Планетарные редукторы.....	72
6. Вопросы для самопроверки.....	74
7. Задачи для самостоятельного решения.....	75
 ТЕМА 6: ЭВОЛЬВЕНТНОЕ ЗАЦЕПЛЕНИЕ.....	79
1. Основная теорема зацепления.....	79
 2. Требования предъявляемые к профилям зубьев зубчатых колес: кинематические, динамические, технологические, эксплуатационные.....	80
3. Основные размеры нулевых зубчатых колес.....	81
4. Эвольвента окружности.....	82
5. Ненулевые зубчатые колеса:	

положительные и отрицательные.....	83
6. Методы выбора коэффициентов смещения инструментальной рейки .....	84
7. Коэффициент перекрытия (качественный показатель зацепления).....	85
8. Вопросы для самопроверки.....	86
9. Таблица инволют.....	90
 ТЕМА 7: КУЛАЧКОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ.....	91
1. Особенности кулачковых механизмов.....	91
2. Классификация кулачковых механизмов.....	92
3. Анализ кулачковых механизмов.....	93
4. Мягкие и жесткие удары.....	95
5. Углы давления в кулачковых механизмах.....	96
6. Синтез кулачковых механизмов.....	97
7. Вопросы для самопроверки.....	99
8. Задачи для самостоятельного решения.....	101
 ОГЛАВЛЕНИЕ .....	102