Энгельсский технологический институт

СГТУ ЭТИ имени ГАГАРИНА Ю.А.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. ЧАСТЬ 1. «СТРУКТУРНЫЙ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ СО СЛОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗВЕНЬЕВ»

Саратов 2026

Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.
ЧАСТЬ 1.
«СТРУКТУРНЫЙ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ СО СЛОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗВЕНЬЕВ»

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Теория механизмов и машин»
для студентов направлений

15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»
23.03.01 «Нефтегазовое дело»

очной и заочной форм обучения

Энгельс 2023

УДК 531.8
ББК 34.41
М 60

М 60 Авторы-составители Потехина Л.Н., Милованова Л.Р., Легкоступ А.А., Земченков В.С. Лабораторный практикум. Часть 1. «Структурный и кинематический анализ механизмов со сложным движением звеньев»: Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Теория механизмов и машин», «Техническая механика» (Раздел «Теория машин и механика механизмов») – Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2023. – 27 с.

Методические указания к выполнению лабораторных работ посвящены структурному анализу плоских и пространственных механизмов, а также кинематическому анализу таких базовых механизмов как кривошипно-ползунный, кулачковый и универсальный шарнир Гука. Содержат основные понятия, теорию и методику выполнения лабораторных работ. Разработаны в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов направлений «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Технологические машины и оборудование», «Нефтегазовое дело», «Конструирование изделий легкой промышленности».

УДК 531.8
ББК 34.41

Одобрено редакционно-издательским советом
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Брошюра издается в авторской редакции

Содержание

Введение 6
Лабораторная работа № 1. Составление кинематических схем и структурный анализ механизмов 7
Лабораторная работа № 2. Кинематический анализ кривошипно-ползунного механизма 14
Лабораторная работа № 3. Кинематический анализ плоского кулачкового механизма 19
Лабораторная работа № 4. Кинематический анализ универсального шарнира Гука 23
Список рекомендуемой литературы 26

Введение

Лабораторный практикум - один из видов практического учебного занятия, основная цель которого - установление тесной связи между практикой и теорией. В ходе таких занятий студенты практически осваивают научно-теоретические положения изучаемого предмета, овладевают инновационными техниками экспериментирования в соответствующей научной сфере, занимаются инструментализацией знаний, полученных на лекциях и из учебных пособий, то есть превращают их в средство для решения сначала учебно-исследовательских, а позже реальных практических и экспериментальных задач.

Кроме того, у учащихся формируются навыки, имеющие непосредственное отношение к будущей профессии.

В рамках дисциплин «Теория механизмов и машин» и «Техническая механика» изучаются научные основы построения современных машин и механизмов, а также методы теоретического и экспериментального их исследования. Эти дисциплины являются одними из первых в цикле базовых профессиональных дисциплин и оказываются для студентов одними из наиболее сложных. Освоение требуемыми компетенциями облегчается при сближении теории с практикой. Успешное решение данной задачи в первую очередь зависит от хорошей организации лабораторного практикума.

Приведенный курс лабораторных работ разбит на три части: первая часть - «Структурный и кинематический анализ механизмов со сложным движением звеньев», вторая часть – «Проектирование и исследование зубчатых передач», третья часть – «Динамический анализ механизмов».

Первая часть лабораторного практикума посвящена структурному и кинематическому анализу механизмов. Она начинается со структурного анализа, теории классификации механизмов. Основное внимание уделяется структуре и классификации плоских механизмов. В данной части закладывается фундамент для изучения вопросов кинематического анализа, при котором применяются графические и аналитические методы. В качестве кинематического анализа простейших пространственных механизмов предлагается изучение кинематики универсального шарнира Гука.

Данные методические указания включают четыре лабораторные работы по исследованию механизмов со сложным движением звеньев: структуры рычажных механизмов, кривошипно-ползунного механизма, кулачкового механизма, универсального шарнира Гука.

К выполнению лабораторных работ студент должен приступать после изучения основных понятий, содержащихся в начале каждой лабораторной работы. Отчет о выполнении работы оформляется по установленной форме и сопровождается устной проверкой полученных знаний.

Лабораторная работа № 1

СОСТАВЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ И СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ

Цель работы: закрепление материала по методам структурного анализа и приобретение навыков в составлении кинематических схем механизмов.

Основные понятия

Для кинематического и динамического исследования механизма пользуются его *кинематической схемой*, под которой понимают такое изображение всего механизма в целом и отдельных его частей, которое отчетливо показывает, из каких звеньев и кинематических пар состоит данный механизм.

Правильно составленная кинематическая схема должна удовлетворять следующим условиям.

1. На кинематической схеме должно быть указано все, что необходимо для кинематического исследования механизма. Все лишнее, не имеющее отношение к геометрии движения механизма, на кинематической схеме не указывается.

2. Кинематическая схема должна быть построена в определенном масштабе, с точным соблюдением относительного расположения звеньев и пар, с указанием величины масштаба, размеров звеньев и расстояний между неподвижными точками и линиями.

Основные элементы механизма – звенья и кинематические пары.

Звено – одно или несколько жесткосоединенных твердых тел. Различают несколько видов звеньев (стойка, кривошип, коромысло, шатун, ползун, кулиса, кулачок, зубчатое колесо и т.д.). Различают входные и выходные звенья (ведущее и ведомое), между которыми расположены промежуточные.

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

Различают кинематические пары высшие и низшие.

Низшая кинематическая пара – звенья соприкасаются по поверхностям, например, цилиндрический и шаровой шарниры.

Высшая кинематическая пара – звенья соприкасаются по линии или в точке, например, касание цилиндрических валиков, касание зубьев в зубчатом зацеплении.

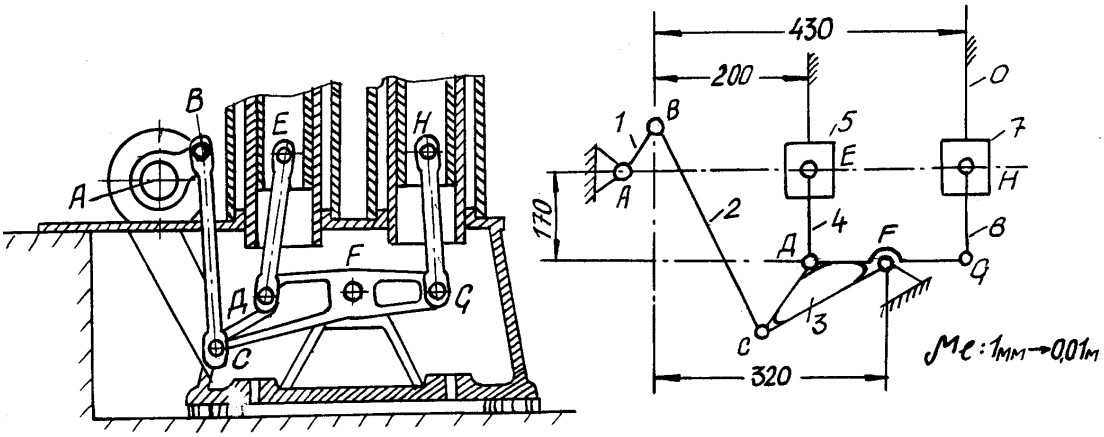
Низшие пары изнашиваются меньше, чем высшие, так как у них больше площадь соприкосновения, то есть меньше удельное давление.

На рис. 1.1 *а* приведен общий вид двухцилиндрового компрессора, а на рис. 1.1 *б* показана его кинематическая схема.

При составлении кинематических схем пользуются условными обозначениями кинематических пар и звеньев, производят замену высших пар низшими

(одна высшая пара заменяется двумя низшими), в результате получается заменяющий механизм.

Некоторые условные обозначения звеньев и кинематических пар сведены в табл. 1.1 и 1.2.



а *б*

Рис. 1.1

Кинематическая схема механизма компрессора включает восемь звеньев и десять низших кинематических пар, из которых восемь вращательных и две поступательные. Схема снабжена всеми необходимыми размерами, вычерчена в масштабе и может служить для исследования движения отдельных точек механизма.

Каждой кинематической паре соответствует свой класс (всего пять классов). Для определения класса кинематической пары нужно знать ее условия связи.

Свободнодвижущееся в пространстве тело имеет шесть *степеней свободы.* Если же такое тело связано с другими посредством кинематической пары, то на его движение накладываются ограничения.

Если U – *число связей*, то W=6-U – *число степеней свободы*.

U=0, W=6 – свободнодвижущееся тело;

U=6, W=0 – абсолютно жесткое тело.

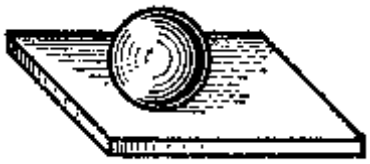
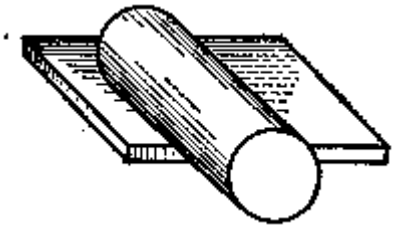
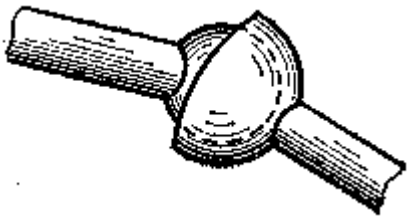
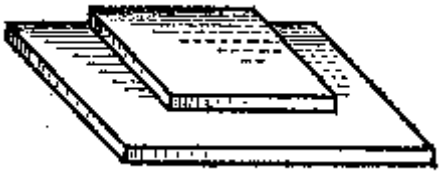
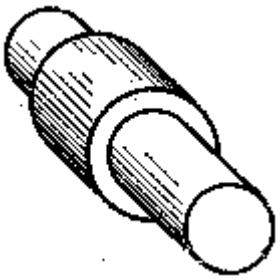
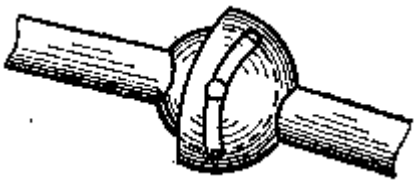
Класс кинематической паре присваивается в зависимости от числа связей U (табл. 1.2). Для подсчета степени подвижности плоских механизмов пользуются формулой Чебышева:

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

где n – число подвижных звеньев; p_5 – число пар пятого класса; p_4 – число пар четвертого класса.

Таблица 1.1

Основные виды кинематических пар

Число связей	Число степеней свободы	Название	Рисунок	Условное обозначение
1	5	Шар - плоскость		
2	4	Шар - цилиндр		
3	3	Сферическая пара		
3	3	Плоскостная пара		
4	2	Цилиндрическая пара		
4	2	Сферическая пара с пальцем		

Окончание табл. 1.1

Число связей	Число степеней свободы	Название	Рисунок	Условное обозначение
5	1	Поступательная пара		
5	1	Вращательная пара		
5	1	Винтовая пара		

Таблица 1.2

Основные типы звеньев механизмов

№	Наименование	Эскиз	Движение	Особенности
1	Стойка		Отсутствует	
2	Кривошип		Вращательное	Полный оборот
3	Коромысло		Колебательное	Неполный оборот

Окончание табл. 1.2

4	Шатун		Плоскопараллельное	Нет кинематических пар, связанных со стойкой
5	Ползун		Поступательное	Возвратное движение
6	Кулиса		Колебательное	Направляющая для ползуна
			Поступательное	
			Плоскопараллельное	
7	Кулачок		Вращательное	Профиль определяет движение ведомого звена
			Поступательное	
8	Зубчатое колесо		Вращательное	Зубчатый контур

Рекомендуется обозначать шарниры большими латинскими буквами (A, B, C, D, F и т.д.), а звенья нумеровать арабскими цифрами, считая стойку нулевым звеном (0, 1, 2, 3 и т.д.).

Для составления формулы строения механизма нужно механизм разложить на *структурные группы.*

Структурная группа –- это кинематическая цепь, число степеней свободы которой равно нулю, группа не должна распадаться на более простые кинематические цепи, удовлетворяющие этому условию.

Правило структурной группы: W=0.

Тогда из формулы Чебышева следует: $0 = 3n - 2p_5 - p_4$.

Заменяем пары высшего класса p_4 на пары низшего класса p_5, тогда

$$0 = 3n - 2p_5, \text{ откуда } p_5 = \frac{3n}{2}.$$

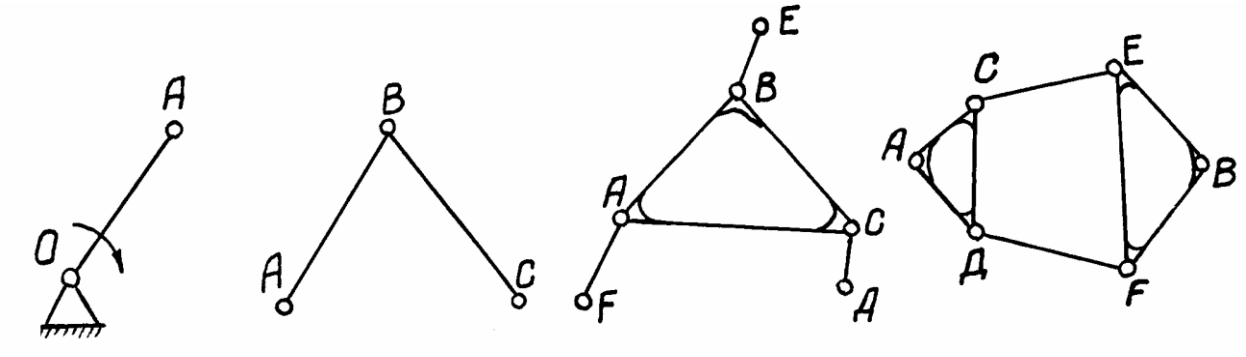
Таким образом, исходя из правила определения структурной группы, число пар пятого класса в структурной группе должно быть кратно трем, а число подвижных звеньев должно быть четным:

n	2	4	6	8	10
p_5	3	6	9	12	15

Структурная группа I класса – это ведущее звено со стойкой, соединенные парой пятого класса (W=1) (рис. 1.2., *а*).

Структурная группа II класса состоит из двух звеньев и трех кинематических пар пятого класса (вращательные или поступательные) (рис. 1.2.,*б*).

Начиная с III класса, номер группе присваивается в зависимости от числа внутренних кинематических пар (внешние кинематические пары служат для соединения с другими группами) (рис. 1.2.,*в,г*).



а *б* *в* *г*

Рис. 1.2

Порядок выполнения работы

1. Имея перед собой механизм, необходимо разобраться в характере относительного движения отдельных звеньев, для чего привести механизм в движение и наблюдать за перемещением отдельных звеньев.

2. Разобравшись в относительном движении звеньев, следует составить структурную схему механизма и произвести подсчет звеньев и кинематических пар.

3. Выписать: n – число подвижных звеньев; p_5 – число пар пятого класса; p_4 – число пар четвертого класса. Кинематические пары обозначать цифрами соответственно нумерации звеньев, входящих в данную кинематическую пару (0-1, 2-3,1-3 и т.д.)

4. Подсчитать степень подвижности механизма по формуле Чебышева:

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

5. Механизм разложить на структурные группы.

6. Построить кинематическую схему механизма в масштабе, предварительно определив размеры звеньев механизма и расстояния между неподвижными точками и линиями.

Форма отчета

Название лабораторной работы.
Цель лабораторной работы.
Краткие теоретические сведения.
Экспериментальная часть.
Расчеты.
Кинематическая схема механизма в масштабе.
Разложение механизма на структурные группы (вычертить группы).
Заполнить сводную таблицу отчета (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Сводная таблица отчета

Таблица кинематических пар			
Обозначение кинематич. пары	Наименование кинематич. пары (вращательная, поступательная, высшая, низшая)	Звенья, составляющие кинематич. пару	Класс кинематич. пары
		Действительный механизм	Заменяющий механизм
Число подвижных звеньев n			
Число низших кинематических пар			
Число высших кинематических пар			
Степень подвижности механизма W			
Класс механизма			

Выводы.

Лабораторная работа № 2

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА

Цель работы: кинематическое исследование кривошипно–ползунного механизма, включающее определение величины перемещения, скорости и ускорения ползуна в зависимости от угла поворота кривошипа.

Основные понятия

Кривошипно-ползунный (кривошипно-шатунный) механизм – четырехзвенник с тремя вращательными и одной поступательной кинематическими парами. Он предназначен для преобразования вращательного движения кривошипа 1 в поступательное движение ползуна 3. При этом шатун 2 совершает сложное плоскопараллельное движение (рис. 2.1).

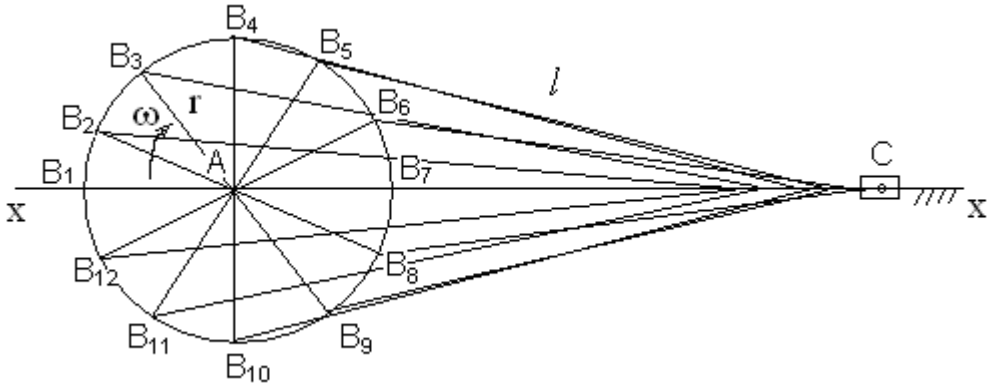


Рис. 2.1

Перемещение, скорость и ускорение точки С ползуна могут быть определены аналитически.

Перемещение точки С ползуна:

$$S_C^* = r(1-\cos\varphi) + \frac{1}{2}\frac{r^2}{\ell}\sin^2\varphi, \qquad (2.1)$$

где r – радиус кривошипа, мм; ℓ – длина шатуна, мм; φ – угол поворота кривошипа, град.

Дифференцируя (2.1) по времени, получим выражение для скорости точки С ползуна:

$$V_C^* = r\omega\left(\sin\varphi \pm \frac{\lambda}{2}\sin 2\varphi\right) \qquad (2.2)$$

где $\lambda = \frac{r}{\ell}$; $\omega = \frac{\pi n}{30}\left[1/c\right]$;

n – число оборотов кривошипа в минуту, $\frac{об}{мин}$.

Дифференцируя (2.2) по времени и считая угловую скорость кривошипа постоянной, находим ускорение точки С ползуна:

$$a_C^* = r\omega^2(\cos\varphi + \lambda\cos 2\varphi) \qquad (2.3)$$

Скорость и ускорение ползуна могут быть определены графически *методом плана скоростей и ускорений* или же получены путем *графического дифференцирования* графика перемещения ползуна.

Метод графического дифференцирования

1. Графическое дифференцирование начинаем с построения кинематической диаграммы перемещения $S_C=S_C(t)$. Проводим две оси координат. Ось угла поворота кривошипа (ось абсцисс) разбиваем на двенадцать равных промежутков (30°).

K_φ – масштабный коэффициент угла поворота, $\frac{град}{мм}$.

Из каждой точки оси абсцисс по оси ординат откладываем перемещение точки С ползуна, пользуясь экспериментальными данными из табл. 2.1. Масштабный коэффициент перемещения K_S, $\frac{м}{мм}$.

2. Методом графического дифференцирования (методом хорд) строим кинематические диаграммы скорости и ускорения $V_C=V_C(t)$, $a_C=a_C(t)$ (метод описан в методических указаниях к выполнению лабораторной «Кинематическое исследование кулачкового механизма»).

$K_t = \frac{K_\varphi}{6n}$ – масштабный коэффициент времени, $\frac{с}{мм}$.

$K_V = \frac{K_S}{OP_1 \cdot K_t}$ – масштабный коэффициент скорости, $\frac{м/с}{мм}$.

$K_a = \frac{K_V}{OP_2 \cdot K_t}$ – масштабный коэффициент ускорения, $\frac{м/с^2}{мм}$.

Так как кривошип вращается с постоянной скоростью w_1, то диаграммы $S_C=S_C(t)$, $V_C=V_C(t)$, $a_C=a_C(t)$ являются одновременно диаграммами $S_C=S_C(\varphi)$, $V_C=V_C(\varphi)$, $a_C=a_C(\varphi)$.

Метод построения планов скоростей и ускорений

1. Построение планов скоростей и ускорений начинаем с построения *плана положений механизма.* Для этого в масштабе K_L вычерчиваем кинематическую схему механизма с обозначением звеньев и направлением вращения кривошипа *w*, рад/с.

Разбиваем окружность (геометрическое место точек В кривошипа) на равные углы (30°). B_1 – крайнее левое положение ползуна. Таким образом получаем 13 положений точки В (B_1 и B_{13} совпадают). Делая засечки на линии х-х (линия движения ползуна) радиусом ВС, находим соответствующие 13 положений точки С ползуна.

2. Из теоретической механики известно, что плоскопараллельное движение фигуры в ее плоскости складывается из поступательного движения вместе с точкой фигуры (полюсом) и вращательного движения вокруг этого полюса.

Скорость ползуна: $\overline{V_C} = \overline{V_B} + \overline{V_{CB}}$.

где $\overline{V_C}$ – скорость ползуна (направлена вдоль оси движения ползуна); $\overline{V_B} = w_1 r$ – скорость точки В кривошипа (направлена перпендикулярно радиусу кривошипа), $м/с$; $\overline{V_{CB}}$ – относительная скорость точки С ползуна относительно полюса В (направлена перпендикулярно шатуну ВС).

Для нахождения скорости ползуна достаточно знать величину и направление одной составляющей векторного уравнения и направление двух остальных составляющих.

3. Построение плана скоростей. Из произвольно выбранного полюса Р (рис. 2.2) откладываем вектор скорости $\overline{V_B}$ перпендикулярно радиусу кривошипа произвольной величины и вводим масштабный коэффициент скорости $K_V = \frac{V_B}{\tilde{V}_B}, \frac{м/с}{мм}$. Проводим направления скоростей $\overline{V_C}$ и $\overline{V_{CB}}$. После построения плана скоростей величину скорости ползуна находим, умножая длину вектора $\tilde{V}_C$, $мм$, на масштабный коэффициент скорости. На рис. 2.2 показаны примеры построения плана скоростей и плана ускорений для угла поворота кривошипа $\varphi = 30^o$.

4. Построение плана ускорений. Ускорение точки С ползуна складывается из ускорения точки В кривошипа и двух составляющих (нормального и тангенциального) относительного ускорения:

$$\overline{a_C} = \overline{a_B} + \overline{a_{CB}}^n + \overline{a_{CB}}^t,$$

где $a_B = w^2 r$ – полное ускорение точки В кривошипа (направлено к центру вращения кривошипа), $м/с^2$; $a_{CB}{}^n = \frac{V_{CB}{}^2}{\ell_{CB}}$ – нормальное ускорение шатуна СВ (направлено вдоль шатуна от С к В); $a_{CB}{}^t$ – тангенциальная составляющая относительного ускорения (направлена перпендикулярно шатуну СВ).

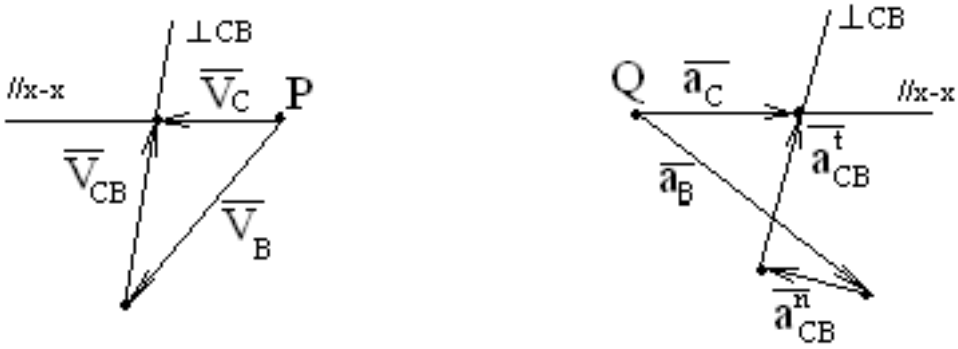


Рис. 2.2

5. Из произвольно выбранного полюса Q (см. рис. 2.2) откладываем вектор ускорения $\overline{a_B}$ произвольной величины и вводим масштабный коэффициент ускорения $K_a = \frac{a_B}{\tilde{a}_B}, \frac{м/c^2}{мм}$. Из конца вектора откладываем $\overline{a_{CB}}^n$, длина вектора $\tilde{a}_{CB}{}^n = \frac{a_{CB}{}^n}{K_a}$, *мм*. Из построения находим величину a_C, умножая длину вектора на масштабный коэффициент ускорения.

Порядок выполнения работы

1. Начертить кинематическую схему механизма в масштабе $K_L\left[\frac{м}{мм}\right]$.

2. Вычертить двенадцать положений механизма (через 30°). Заданное положение выделить жирной линией.

3. Проворачивая кривошип, экспериментально определить перемещения ползуна в зависимости от угла поворота кривошипа. Данные занести в табл. 2.1.

4. Рассчитать аналитически перемещение ползуна $S_C{}^*$ для каждого положения по формуле (2.1), занести в табл. 2.1. Рассчитать по формулам (2.2) и (2.3) скорость и ускорение ползуна, занести результаты в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Экспериментальные данные

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
φ	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
S, *мм*	0												
S^*, *мм*	0												

Таблица 2.2

Сводная таблица отчета

№ положения	φ	Скорость, м/с			Ускорение, м/с^2		
		Vc*	Vc (план скоростей)	Vc (график скорости)	a_C^*	a_C (план ускорений)	a_C (график ускорений)

5. Построить графики зависимостей $S_C=S_C(t)$ и $S_C^*=S_C^*(t)$, методом графического дифференцирования построить кинематические диаграммы $V_C=V_C(t)$, $a_C=a_C(t)$. Рассчитать масштабные коэффициенты. Определить скорость и ускорение точки С ползуна.

6. Для заданного положения построить план скоростей и план ускорений, определить скорость и ускорение точки С ползуна.

7. Оценить погрешность метода построения плана скоростей и ускорений, а также метода графического дифференцирования по сравнению с аналитическим методом по следующим формулам:

$$\delta_V = \frac{V_C^* - V_C}{V_C^*} 100\%,$$

$$\delta_a = \frac{a_C^* - a_C}{a_C^*} 100\%,$$

где V_C^* и a_C^* – скорость и ускорение ползуна, рассчитанные аналитическим методом; V_C и a_C – скорость и ускорение ползуна, найденные графическими методами.

Рассчитать отдельно погрешность построения плана скоростей и плана ускорений, а также построение кинематических диаграмм скорости и ускорения.

Форма отчета

Название лабораторной работы.
Цель лабораторной работы.
Краткие теоретические сведения.
Экспериментальная часть.
Кинематическая схема механизма в масштабе.
Кинематические диаграммы перемещения, скорости и ускорения.
Расчеты.
Планы скоростей и ускорений для заданного положения.
Расчеты.
Сводные таблицы отчета (табл. 2.1. и 2.2).
Выводы.

Лабораторная работа № 3

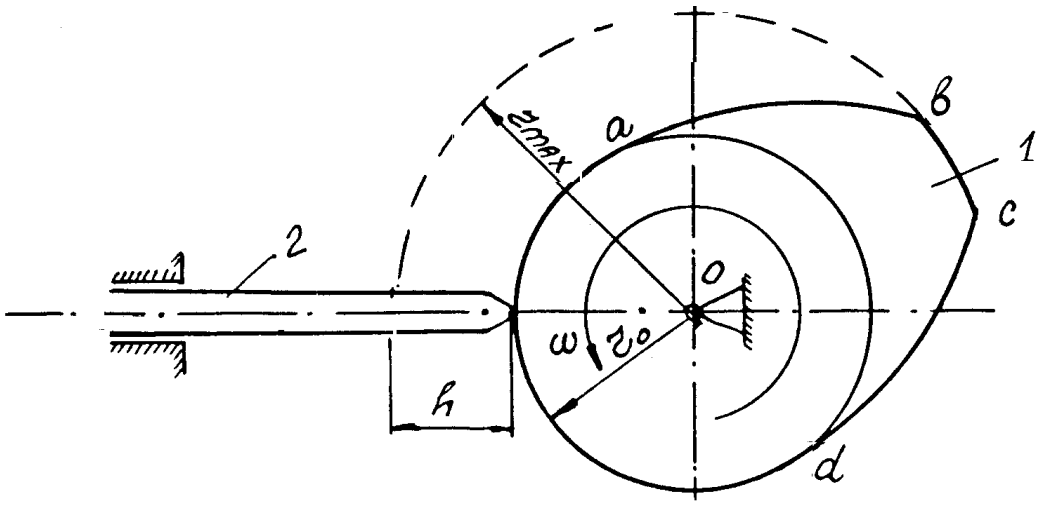
КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛОСКОГО КУЛАЧКОВОГО МЕХАНИЗМА

Цель работы: кинематическое исследование кулачкового механизма, включающее в себя определение закона движения толкателя (коромысла), который выражается графиками перемещения, скорости и ускорения толкателя в зависимости от угла φ или времени t поворота кулачка.

Основные понятия

Кулачковый механизм (рис. 3.1) представляет собой механизм с высшей кинематической парой. Ведущим звеном механизма является кулачок 1, профиль которого определяет закон движения ведомого звена – толкателя 2.

Рис. 3.1



Различают толкатели остроконечные, роликовые, грибовидные и плоские (тарельчатые) (рис. 3.2).

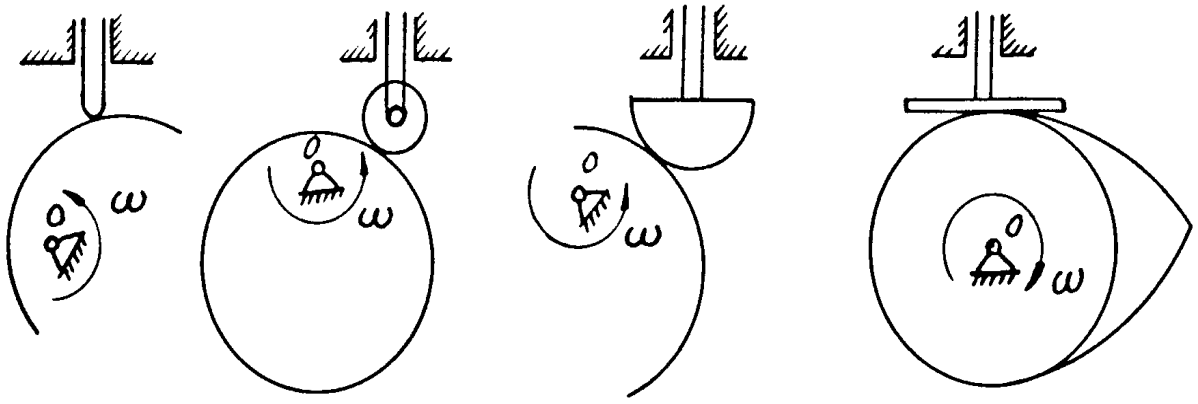


Рис. 3.2

По виду движения ведомого звена различают кулачковые механизмы с поступательно движущимся толкателем и с качающимся толкателем.

Рассмотрим кулачковый механизм (рис. 3.1) с центральным поступательно движущимся толкателем. Линия движения толкателя в таком механизме проходит через ось вращения кулачка. Различают элементы кулачка.

1. Окружность основной шайбы, очерченная наименьшим радиусом r_0.

2. Профиль удаления – участок $\breve{ab}$ с возрастающими радиусами-векторами. Угол поворота кулачка, соответствующий прохождению этого кулачка под острием толкателя, называется *углом удаления* и обозначается $\varphi_{уд}$. Толкатель за это время поднимается из крайнего нижнего положения в крайнее верхнее положение и проходит путь h, называемый *ходом толкателя.*

3. Профиль верхнего останова – участок $\breve{bc}$, очерченный максимальным радиусом r_{max}. Ему соответствует угол поворота кулачка $\varphi_{в.о}$, называемый *углом верхнего останова.* Толкатель в это время остается неподвижным в крайнем верхнем положении.

4. Профиль приближения – участок $\breve{cd}$ с уменьшающимися радиусами-векторами. При прохождении под острием толкателя этого участка, толкатель опускается из крайнего верхнего в крайнее нижнее положение, а кулачок поворачивается на *угол приближения* $\varphi_{пр}$.

5. Профиль нижнего останова – участок $\breve{ad}$, очерченный наименьшим радиусом r_0 . Во время прохождения этого участка под острием толкателя последний остается неподвижным в крайнем нижнем положении. Угол поворота кулачка, соответствующий этому участку профиля, называется *углом нижнего останова* и обозначается $\varphi_{н.о.}$

6. Профиль кулачка, очерченный кривыми $\breve{ab}$, $\breve{bc}$ и $\breve{cd}$ называется *рабочим профилем,* а сумма углов поворота кулачка, соответствующих этому профилю, называется *рабочим углом*, то есть $\varphi_{раб}=\varphi_{уд}+\varphi_{в.о}+\varphi_{пр}$.

Медленно поворачивая кулачок, засекаем момент, когда толкатель начинает подниматься вверх. Отсчитывая углы поворота кулачка φ, замеряем величину перемещения толкателя S от крайнего положения и составляем табл. 3.1.

Таблица 3.1

Экспериментальные данные

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
φ	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195
S,мм														

Пользуясь табл. 3.1, строим график $S(\varphi)$ (рис. 3.3). Задавшись масштабом углов поворота K_{φ} (например, в 1 см чертежа 10°), откладываем по оси абсцисс углы поворота кулачка и разбиваем их на равные интервалы.

По оси ординат в масштабе K_S откладываем соответствующие перемещения толкателя S. Концы полученных ординат соединяем плавной линией.

Если выходное звено является коромыслом, то есть совершает качательное движение, то табл. 3.1 является сводной таблицей зависимости угла поворота коромысла φ_2 от угла поворота кулачка φ_1.

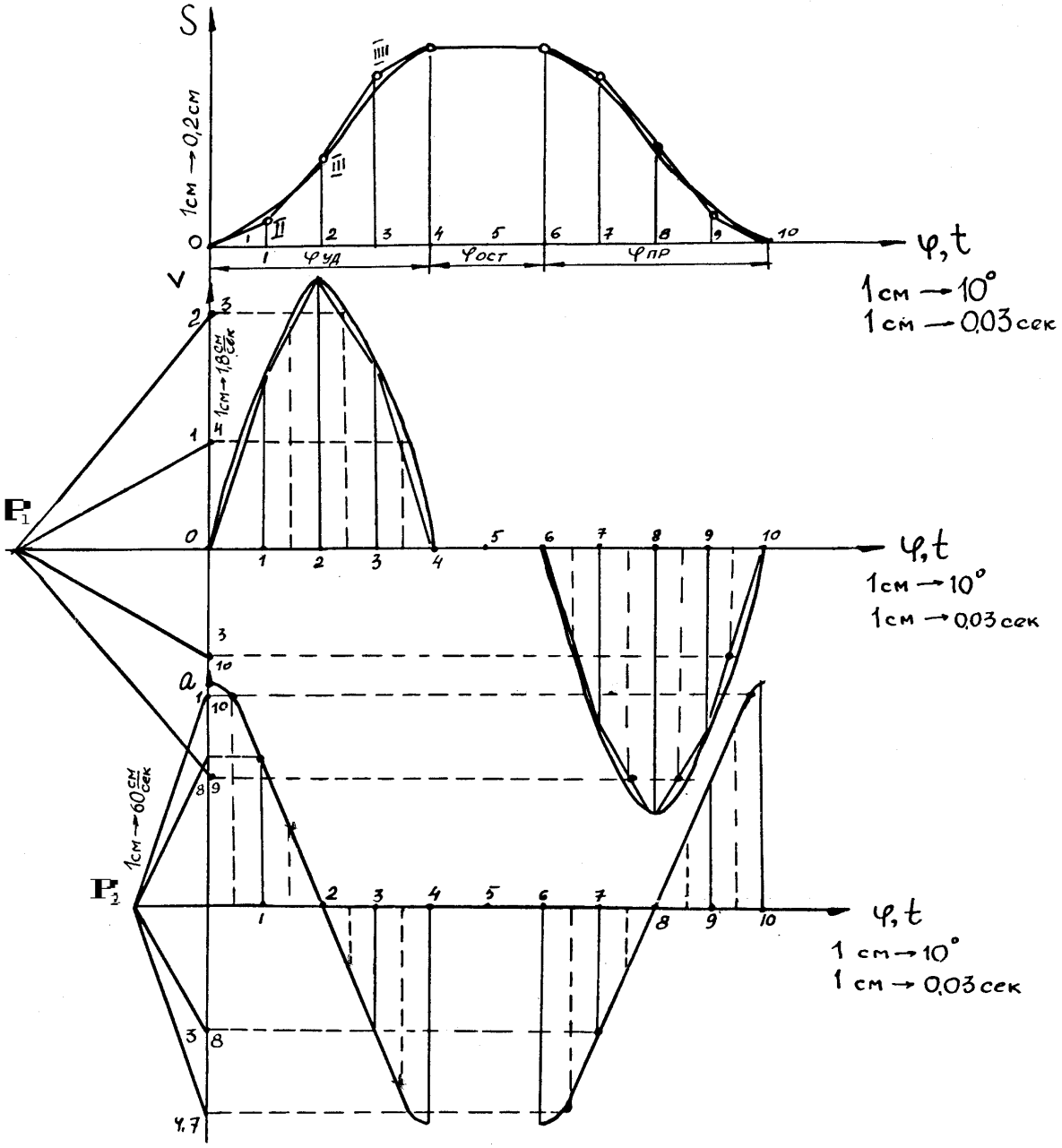


Рис. 3.3

При равномерном вращении кулачка углы поворота φ пропорциональны времени поворота *t*. Поэтому отрезки по оси абсцисс, изображающие углы φ, будут также изображать соответствующее время с учетом масштабного коэффициента

$$K_t = \frac{K\varphi}{6n}, \ {}^{c}\!/_{мм}.$$

где *n* – число оборотов кулачка, *об/мин*.

По графику перемещения методом графического дифференцирования строим график скорости.

Метод графического дифференцирования *(см. рис. 3.3)*

1. Точки пересечения ординат с кривой перемещения соединяем хордами I, II, III и т.д., тангенсы углов наклона которых с осью абсцисс пропорциональны средним скоростям за соответствующие промежутки времени.

2. В осях координат V-t на продолжении оси t влево от начала координат откладываем полюсное расстояние OP_1, величина которого берется произвольно, но с таким расчетом, чтобы график скорости получился нормальных размеров.

3. Из полюса параллельно хордам I, II, III и т.д. проводим лучи P_1-1, P_1-2, P_1-3 и т.д., отсекающие на оси отрезки 01, 02, 03 и т.д., которые в масштабе $K_V = \frac{K_S}{OP_1 \cdot K_t}, \ \frac{{}^{м}\!/_{с}}{мм}$, изображают средние скорости перемещения толкателя за соответствующие промежутки времени.

Так как средние скорости совпадают с истинными приблизительно в серединах промежутков времени, то сносим точки 1,2,3,4 и т.д. с оси V на ординаты, восстановленные из середин интервалов времени t, и соединяем полученные точки плавной линией.

Дифференцируя график скорости подобным же методом, получим график ускорения толкателя в масштабе $K_a = \frac{K_V}{OP_2 \cdot K_t}, \ \frac{{}^{м}\!/_{с^2}}{мм}$.

Порядок выполнения работы

1. Начертить кинематическую схему механизма.

2. Проворачивая механизм, заполнить табл. 3.1, построить график перемещения толкателя (график угла поворота толкателя).

3. Методом графического дифференцирования построить график скорости толкателя и график ускорения толкателя.

4. Подсчитать масштабные коэффициенты.

Форма отчета

Название лабораторной работы.
Цель лабораторной работы.
Краткие теоретические сведения.
Экспериментальная часть.
Кинематическая схема механизма в масштабе.
Таблица зависимости перемещения от угла поворота кулачка.
Кинематические диаграммы перемещения, скорости и ускорения.
Выводы.

Лабораторная работа № 4

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УНИВЕРСАЛЬНОГО ШАРНИРА ГУКА

Цель работы: исследование кинематики универсального шарнира Гука, определение зависимости между углами поворота ведомого и ведущего валов.

Основные понятия

Универсальный шарнир (рис. 4.1) представляет собой сферический четырехзвенник, т.е. механизм, состоящий из четырех звеньев, соединенных вращательными парами, оси которых проходят через одну общую точку.

Механизм предназначен для передачи вращения между пересекающимися осями I и II с межосевым углом α, который в процессе работы может изменять свою величину.

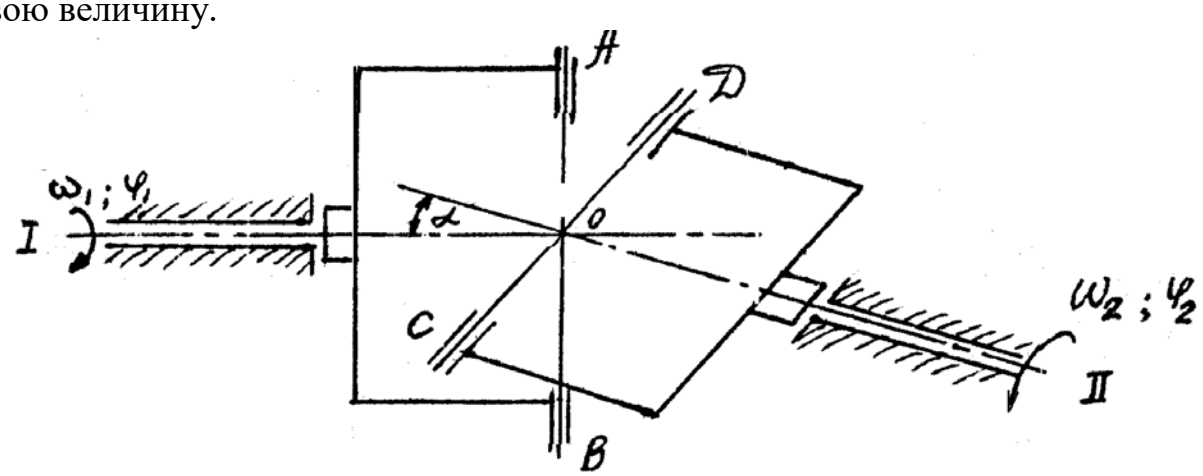


Рис. 4.1

Особенностью данной передачи является неравномерность вращения ведомого вала при постоянной угловой скорости ведущего вала. Зависимость между углами поворота валов φ_1 и φ_2’ определяется из выражения:

$$\operatorname{tg}\varphi_2' = \frac{\operatorname{tg}\varphi_1}{\cos\alpha}. \qquad (4.1)$$

Продифференцировав по времени выражение (4.1) и освободившись от угла φ_2', определим передаточное число шарнирного механизма:

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\cos^2\alpha \cdot \cos^2\varphi_1 + \sin^2\varphi_1}{\cos\alpha}, \qquad (4.2)$$

где ω_1, ω_2 – угловые скорости шарниров.

Из (4.2) следует, что передаточное число универсального шарнира – величина переменная. При увеличении угла α, как это видно из графика (рис. 4.2), неравномерность вращения возрастает.

Коэффициент неравномерности $\delta = \sin\alpha \cdot tg\alpha$.

Для передачи вращения под углом с одинаковыми угловыми скоростями применяют двойной универсальный шарнир, например, в силовой передаче автомобиля.

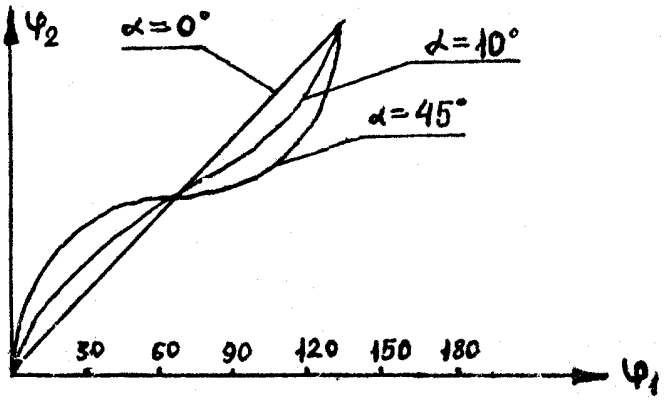


Рис. 4.2

Порядок выполнения работы

1. Установить ведущий вал I и ведомый вал II универсального шарнира так, чтобы: а) угол α равнялся 0° (на одной оси); б) угол $\alpha=10^o$; в) угол $\alpha=30^o$.

2. Сообщить вращение механизму, фиксировать углы поворота φ_2 ведомого вала через каждые 30° поворота ведущего вала.

3. Вычертить схему механизма. По (4.1) вычислить значения углов φ_2', соответствующие углам φ_1.

4. По (4.2) рассчитать коэффициент неравномерности и передаточные отношения i_{12} для различных значений φ_1.

5.Результаты расчетов занести в табл. 4.1 отчета о лабораторной работе.

6. По данным табл. 4.1 построить графики $\varphi_2 = f(\varphi_1), i_{12} = f(\varphi_1)$ (рис. 4.3).

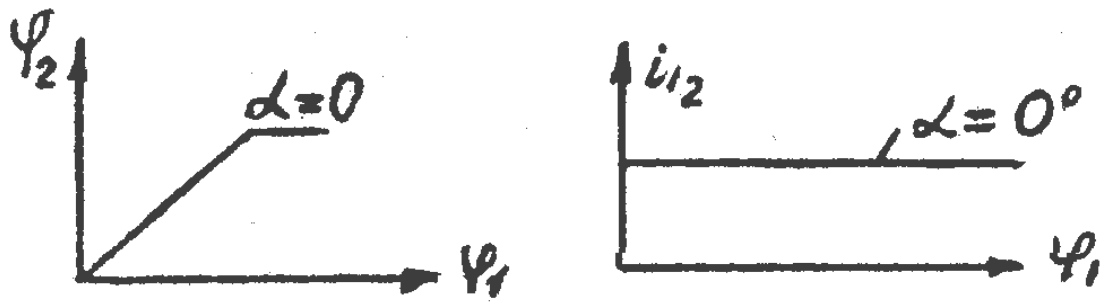


Рис.4.3

7. Определить погрешность эксперимента по формуле:

$$\delta = \frac{\varphi_2' - \varphi_2}{\varphi_2'} 100\% .$$

8. Рассчитать коэффициент неравномерности δ.

Форма отчета

Название лабораторной работы.
Цель лабораторной работы.
Краткие теоретические сведения.
Экспериментальные данные.
Табл. 4.1 для трех значений угла α_1^o (0°, 10°, 30°).

Таблица 4.1

Экспериментальные данные

α_1^o	φ_1^o	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
	φ_2													
	φ_2'													
	i_{12}													
	δ,%													

Графики $\varphi_2 = f(\varphi_1), i_{12} = f(\varphi_1)$.

Коэффициенты неравномерности δ.
Выводы.

Список рекомендуемой литературы

1. Теория механизмов и машин: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / М. З. Коловский, А. Н. Евграфов [и др.]. - 4-е изд., перераб. - М. : Издательский центр "Академия", 2013. - 560 с.
2. Тимофеев Г. А. Теория механизмов и машин : учеб. пособие / Г. А. Тимофеев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Изд-во Юрайт: ИД Юрайт, 2012.- 351 с.
3. Махова Н.С. и др. Основы теории механизмов и машин. М.: Владос, 2007.- 154 с.
4. Смелягин А.И. Теория механизмов и машин / А.И. Смелягин.- Новосибирск: Инфра-М, 2007.- 256 с.
5. Мамаев А.Н. Теория механизмов и машин/ А.Н. Мамаев, Т. А. Балабина.- М: Экзамен, 2008.- 254 с.
6. Белоконев И.М. Теория механизмов и машин/ И.М. Белоконев, С.А. Балан, К.И. Белоконев. Изд.2-е, испр. и доп., 2004.-214 с.
7. Левитский И.И. Теория механизмов и машин: Терминология/ И.И. Левитский, Ю.Я. Гуревич, В.Д. Плахтин.- М.: МГТУ им. Баумана, 2004.- 80с.
8. Артоболевский Н.Н. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов / Н.Н. Артоболевский. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука, 2000. - 640 с.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. ЧАСТЬ 1.
«СТРУКТУРНЫЙ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ
АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ СО
СЛОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗВЕНЬЕВ»

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Теория механизмов и машин»

Авторы: Потехина Лариса Николаевна
Милованова Людмила Руслановна
Легкоступ Алевтина Александровна
Земченков Владимир Степанович

Ответственный за выпуск Милованова Л.Р.
Оригинал-макет Легкоступ А.А.

Подписано в печать _____
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать RISO.
Объем 1,8 печ.л. Тираж 50 Заказ № ____

413100, Россия, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.