

1 Задача 1

Структура и классификация механизмов.

Задание.

Для механизма, представленного на рисунке 1.1, необходимо провести структурное исследование и определить класс механизма по классификации Ассура-Артоболевского.

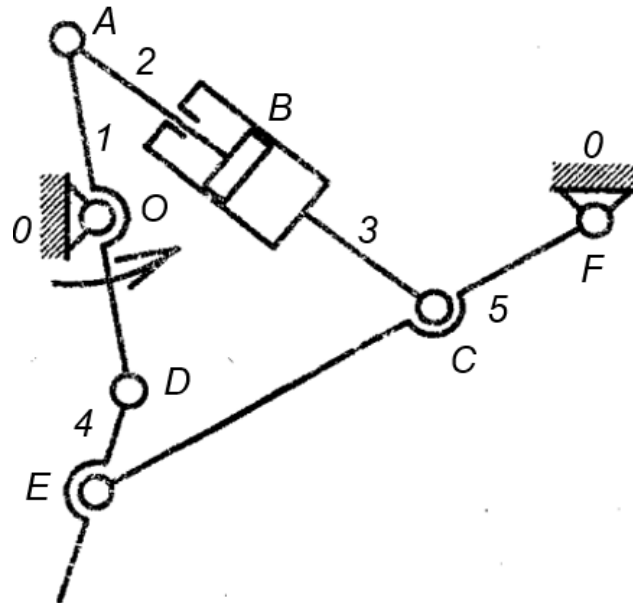


Рисунок 1.1 – Схема механизма

Решение.

Механизм предназначен для преобразования вращательного движения кривошипа 1 в поступательное движение поршня 2 относительно звена 3.

1 Наименование звеньев

Таблица 1.1 - Звенья механизма

№ п/п	Обозначение звена	Название звена	Вид движения звена
0	O, F	стойка	неподвижная
1	AD	кривошип	вращательное
2	AB	поршень	сложное
3	BC	шатун	сложное
4	DE	шатун	сложное
5	FE	коромысло	вращательное

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	Лист	1

Вывод: Число подвижных звеньев $n = 5$.

2. Кинематические пары и их модификация.

Таблица 1.2 – Кинематические пары механизма

Обозначение кинематической пары	Звенья составляющие кинематическую пару	Вид относительно движения в паре	Число условных связей (класс)
<i>O</i>	0-1	вращательное	5 (V кл.)
<i>A</i>	1-2	вращательное	5 (V кл.)
<i>B</i>	2-3	поступательное	5 (V кл.)
<i>C</i>	3-5	вращательное	5 (V кл.)
<i>D</i>	1-4	вращательное	5 (V кл.)
<i>E</i>	4-5	вращательное	5 (V кл.)
<i>F</i>	0-5	вращательное	5 (V кл.)

Вывод: Одноподвижных кинематических пар V кл. $p_5 = 7$, IV кл. $p_4 = 0$.

3. Степень подвижности механизма.

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 - 0 = 1.$$

где $n = 5$ – число подвижных звеньев;

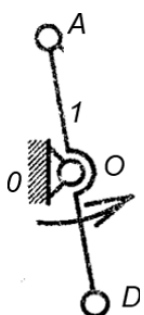
$p_5 = 7$ – число кинематических пар V класса.

$p_4 = 0$ – число кинематических пар IV класса.

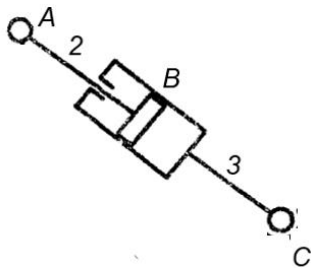
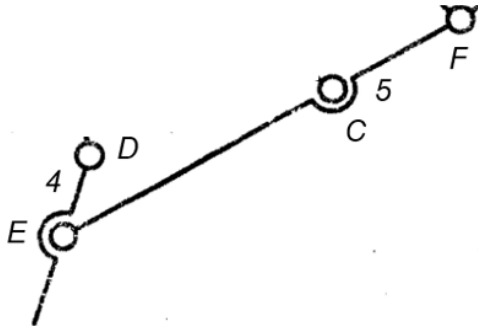
Вывод: так как $W = 1$, механизм имеет одно ведущее звено – 1.

4. Разделение механизма на структурные группы (группы Ассура).

Таблица 1.3. – Структурные группы механизма.

Группа	Эскиз группы	Звенья, составляющие группу	Пары, входящие в группу	Класс, и вид группы
Ведущая (начальный механизм)		0-1	поступательная	1 класс

Име. № подл.	Подп. и дата	Име. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	Лист

2 группа Ассура		2-4	враща- тельная	2 класс 2 поряд- док
3 группа Ассура		5-6	враща- тельная - сложное	2 класс 2 поряд- док

Вывод: механизм – 2-го класса.

5. Структурная формула механизма (порядок сборки).

Структурная формула составляется, начиная ведущего звена и присоеди-
единением последующих групп Ассура по порядку.

Вывод: 1 кл. (нач. мех.) —→ 3 кл. 2п. (2-4)

↙ ↘
2 кл. 2п. (5-6).

Инв. № подл	Подп. и дата	Лист			
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
	Подп. и дата				
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	3

2. Задача 2.

Кинематический анализ рычажных механизмов.

Дана схема механизма.

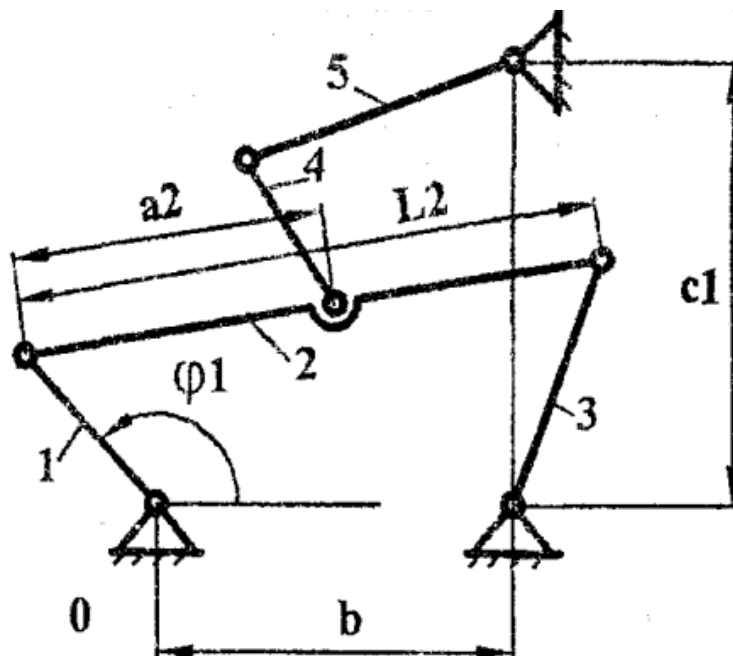


Рисунок 2.1 – Исходные данные

Задание.

Для заданного положения механизма (φ_1) построить планы положений, скоростей и ускорений. Определить положение, скорость и ускорение последнего по номеру звена.

Задачу выполнить:

- графическим методом – методом планов;
- аналитическим методом – погруппным-векторным методом.

Таблица 2.1 – Исходные данные

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	a	b	c	φ_1	ω_1
м								град	c^{-1}
0,04	0,18	0,12	0,12	0,12	0,09	0,12	0,24	135	20

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл

Лист

4

Решение.

1. Метрический синтез.

План положений механизма – это графическое изображение взаимного расположения звеньев механизма за рассматриваемый промежуток времени, выполненное в определенном масштабном коэффициенте.

Построение плана положения начинают с изображения элементов стойки, т.е. шарнирно-неподвижных опор и направляющих. Далее последовательно изображают ведущие звенья в заданных положениях и структурные группы звеньев. Положение подвижных характерных точек определяются с помощью метода засечек.

Для построения кинематической схемы плоского рычажного механизма выберем масштабный коэффициент длин μ_l .

Масштабный коэффициент длин – это отношение какой-либо действительной величины l , взятой в метрах, к длине отрезка l , измеряемого в миллиметрах и изображающего эту величину в составе кинематической схемы.

$$\mu_l = \frac{l_{OA}}{|OA|} = \frac{0,04}{16} = 0,0025 \frac{\text{м}}{\text{мм}},$$

где l_{OA} – действительная длина кривошипа, м;

$|OA|$ – произвольно выбранная длина кривошипа на чертеже, мм.

Отрезок $|OA|$ принимаем равным 16 мм.

Далее переводим длины оставшихся звеньев в мм через масштабный коэффициент длин, используя формулу:

$$|l_i| = \frac{l_i}{\mu_l};$$

где i – обозначение звена, для которого вычисляется длина на кинематической схеме.

Т.к. $L_1 + L_2 + a = 0,31 \text{ м} > L_3 + b = 0,24 \text{ м}$, то при заданных числовых данных механизм заданной схемы не возможно собрать. Поэтому меняем значения: $L_2 = 0,12 \text{ м}$, $L_3 = 0,18 \text{ м}$. Получаем: $L_1 + L_2 + a = 0,25 \text{ м} < L_3 + b = 0,30 \text{ м}$. Дальнейшие расчёты ведём по изменённым данным.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	Лист
						5				

плана скоростей проводим прямую перпендикулярную звену AB , а из полюса p проводим прямую перпендикулярно звену BC . Точка пересечения этих прямых даст нам точку b .

Скорость точки D найдём по теореме подобия:

$$\frac{|ad|}{|ab|} = \frac{a}{L_2+a} = \frac{0,09}{0,12+0,09} = \frac{0,09}{0,21} = \frac{3}{7};$$

$$|ad| = \frac{3}{7} \cdot |ab| = \frac{3}{7} \cdot 78,9 = 33,8 \text{ мм.}$$

Откладываем отрезок $|pd|$ на плане скоростей.

Скорость точки E найдём по формуле:

$$\vec{V}_E = \vec{V}_D + \vec{V}_{ED}. \quad (2.2)$$

Скорость \vec{V}_D нам известна. Вектор ED направлен перпендикулярно звену DE , а вектор \vec{V}_E направлен перпендикулярно звену FE . Поэтому в уравнении (2.2) 2 неизвестных, для которых мы знаем направление. Следовательно, его можно решить графически. Из точки d проведём прямую перпендикулярно звену DE , из полюса p проводим прямую перпендикулярно звену FE . Пересечение этих прямых даст точку e . Соединяем её с p . Получаем вектор $|pe|$.

Результаты расчётов заносим в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчётов скоростей

Обозначение скорости	Обозначение скорости на чертеже	Величина вектора скорости на чертеже, мм	Величина скорости, м/с	Обозначение скорости	Обозначение скорости на чертеже	Величина вектора скорости на чертеже, мм	Величина скорости, м/с
V_A	pa	80,0	0,80	V_D	pd	87,5	0,88
V_{BA}	ab	78,9	0,79	V_{ED}	de	86,7	0,87
V_B	pb	113,6	1,14	V_E	pe	11,8	0,12

Зная линейные скорости определим угловые:

$$\omega_2 = \frac{V_{BA}}{L_2+a} = \frac{0,79}{0,12+0,09} = 3,76 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\omega_3 = \frac{V_B}{L_3} = \frac{1,14}{0,18} = 6,31 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата						Лист
										7
					Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	

$$\omega_4 = \frac{V_{ED}}{L_4} = \frac{0,87}{0,12} = 7,23 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\omega_5 = \frac{V_E}{L_5} = \frac{0,12}{0,12} = 1,00 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

3. Определение ускорений точек.

Порядок построения плана ускорений аналогичен плану скоростей. То есть, построив план ускорений ведущего звена, строим последовательно план ускорений для всех структурных групп Ассура, входящих в состав механизма.

Ускорение точки A кривошипа определяем по формуле:

$$a_A = a_A^n = (\omega_1)^2 \cdot l_{OA} = (20)^2 \cdot 0,04 = 16,0 \text{ м/с}^2.$$

Выбираем отрезок $\overline{\pi a}$, изображающий на плане ускорение точки A и вычисляем масштаб ускорений.

$$\mu_a = \frac{a_A}{\overline{\pi a}} = \frac{16,0}{2,0} = 8,0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{мм}}.$$

Ускорение точки B найдём по формуле:

$$\begin{cases} \vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{BA} = \vec{a}_A + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^\tau \\ \vec{a}_B = \vec{a}_C + \vec{a}_{BC} = \vec{a}_{BC}^n + \vec{a}_{BC}^\tau \end{cases} \quad (2.3)$$

$$a_{BA}^n = (L_2 + a) \cdot (\omega_2)^2 = (0,12 + 0,09) \cdot (3,76)^2 = 2,96 \text{ м/с}^2 \text{ (в масштабе – 14,8 мм)};$$

$$a_{BC}^n = L_3 \cdot (\omega_3)^2 = 0,18 \cdot (6,31)^2 = 7,17 \text{ м/с}^2 \text{ (в масштабе – 35,8 мм)}.$$

Ускорение \vec{a}_A нам известно, ускорение \vec{a}_{BA}^n параллельно звену AB и направлено от точки B к точке A , ускорение \vec{a}_{BA}^τ перпендикулярно звену AB . Ускорение \vec{a}_C равно нулю, ускорение \vec{a}_{BC}^n параллельно звену BC и направлено от точки B к точке C , ускорение \vec{a}_{BC}^τ перпендикулярно звену BC . Поэтому в уравнении (2.3) 2 неизвестных с известными направлениями. Решаем уравнение графически. Из точки a проводим отрезок an_2 , изображающий на плане ускорение \vec{a}_{BA}^n , а из его конца проводим прямую перпендикулярно звену AB . Из полюса π проводим отрезок πn_4 , изображающий на плане ускорение \vec{a}_{BC}^n , а из его конца проводим прямую перпендикулярно звену BC . Точка пересечения этих прямых даст нам точку b .

Ускорение точки D найдём из теоремы подобия:

Инв. № подл	Подп. и дата				Лист 8
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
	Подп. и дата				
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	

$a_{BA}^n = (L_2 + a) \cdot (\omega_2)^2 = (0,12 + 0,09) \cdot (3,76)^2 =$
 $= 2,96 \text{ м/с}^2 \text{ (в масштабе – 14,8 мм);}$

$a_{BC}^n = L_3 \cdot (\omega_3)^2 = 0,18 \cdot (6,31)^2 = 7,17 \text{ м/с}^2 \text{ (в масштабе – 35,8 мм).}$

Ускорение \vec{a}_A нам известно, ускорение \vec{a}_{BA}^n параллельно звену AB и направлено от точки B к точке A , ускорение \vec{a}_{BA}^n перпендикулярно звену AB . Ускорение \vec{a}_C равно нулю, ускорение \vec{a}_{BC}^n параллельно звену BC и направлено от точки B к точке C , ускорение \vec{a}_{BC}^n перпендикулярно звену BC . Поэтому в уравнении (2.3) 2 неизвестных с известными направлениями. Решаем уравнение графически. Из точки a проводим отрезок an_2 , изображающий на плане ускорение \vec{a}_{BA}^n , а из его конца проводим прямую перпендикулярно звену AB . Из полюса π проводим отрезок πn_4 , изображающий на плане ускорение \vec{a}_{BC}^n , а из его конца проводим прямую перпендикулярно звену BC . Точка пересечения этих прямых даст нам точку b .

Ускорение точки D найдём из теоремы подобия:

$$|ad| = \frac{3}{7} \cdot |ab| = \frac{3}{7} \cdot 48,2 = 20,7 \text{ мм.}$$

Ускорение точки E найдём по формуле:

$$\begin{cases} \vec{a}_E = \vec{a}_D + \vec{a}_{ED} = \vec{a}_D + \vec{a}_{ED}^n + \vec{a}_{ED}^\tau \\ \vec{a}_E = \vec{a}_F + \vec{a}_{EF} = \vec{a}_{EF}^n + \vec{a}_{EF}^\tau \end{cases} \quad (2.4)$$

$$a_{ED}^n = L_4 \cdot (\omega_4)^2 = 0,12 \cdot (7,23)^2 = 6,26 \text{ м/с}^2 \text{ (в масштабе – 31,3 мм);}$$

$$a_{EF}^n = L_5 \cdot (\omega_5)^2 = 0,12 \cdot (0,98)^2 = 0,12 \text{ м/с}^2 \text{ (в масштабе – 0,6 мм).}$$

Ускорение \vec{a}_D нам известно, ускорение \vec{a}_{ED}^n перпендикулярно звену DE и направлено от точки E к точке D , ускорение \vec{a}_{ED}^τ перпендикулярно звену DE . Ускорение \vec{a}_C равно нулю, ускорение \vec{a}_{EF}^n параллельно звену FE и направлено от точки E к точке F , ускорение \vec{a}_{EF}^τ перпендикулярно звену FE . Поэтому в уравнении (2.4) 2 неизвестных с известными направлениями. Решаем уравнение графически. Из точки d проводим отрезок dn_4 , изображающий на плане ускорение \vec{a}_{ED}^n , а из его конца проводим прямую перпендикулярно звену DE . Из полюса π проводим отрезок πn_5 , изображающий на плане ускорение \vec{a}_{EF}^n , а из его конца проводим прямую перпендикулярно звену FE . Точка пересечения этих прямых даст нам точку e .

Результаты расчётов заносим в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты расчётов ускорений

Обозначение ускорения	Обозначение ускорения на чертеже	Величина вектора ускорения на чертеже, мм	Величина ускорения, м/с ²	Обозначение ускорения	Обозначение ускорения на чертеже	Величина вектора ускорения на чертеже, мм	Величина ускорения, м/с ²
a_A	pa	80,0	16,00	a_D	πd	60,9	12,18
a_{BA}^n	an_2	14,8	2,96	a_{ED}^n	dn_4	31,3	6,26
a_{BA}^τ	n_2b	45,8	9,16	a_{ED}^τ	n_4e	24,8	4,96
a_{BA}	ab	48,2	9,64	a_{ED}	de	40,0	8,00
a_{BC}^n	πn_3	12,5	2,50	a_{EF}^n	πn_5	0,6	0,12
a_{BC}^τ	n_3b	153,5	30,70	a_{EF}^τ	n_5e	87	17,40
a_B	πb	38,0	7,60	a_E	πe	87,0	17,40

Зная линейные ускорения определим угловые:

Инв. № подл	Подп. и дата				Лист 9
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
	Подп. и дата				
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	

$$\varepsilon_2 = \frac{a_{BA}^T}{L_2 + a} = \frac{9,16}{0,12 + 0,09} = 43,62 \text{ м/с}^2;$$

$$\varepsilon_3 = \frac{a_{BC}^T}{L_3} = \frac{30,70}{0,18} = 170,56 \text{ м/с}^2;$$

$$\varepsilon_4 = \frac{a_{ED}^T}{L_4} = \frac{4,96}{0,12} = 41,33 \text{ м/с}^2;$$

$$\varepsilon_5 = \frac{a_{EF}^T}{L_5} = \frac{17,40}{0,12} = 145,0 \text{ м/с}^2.$$

4. Аналитический метод.

Положение точки A :

$$a_x(\varphi) = -b + L_1 \cdot \cos(\varphi);$$

$$a_y(\varphi) = L_1 \cdot \sin(\varphi).$$

Расстояние между точками A и C :

$$ac(\varphi) = \sqrt{(a_x(\varphi))^2 + (a_y(\varphi))^2}.$$

Угол α :

$$\alpha(\varphi) = \operatorname{atan}\left(\frac{a_y(\varphi)}{a_x(\varphi)}\right).$$

Угол β по теореме косинусов:

$$(L_2 + a)^2 = (L_3)^2 + (ac(\varphi))^2 - 2 \cdot L_3 \cdot ac(\varphi) \cdot \cos(\beta(\varphi));$$

$$\cos(\beta(\varphi)) = \frac{(L_3)^2 + (ac(\varphi))^2 - (L_2 + a)^2}{2 \cdot L_3 \cdot ac(\varphi)};$$

$$\beta(\varphi) = \arccos\left(\frac{(L_3)^2 + (ac(\varphi))^2 - (L_2 + a)^2}{2 \cdot L_3 \cdot ac(\varphi)}\right).$$

Положение точки B :

$$b_x(\varphi) = -L_3 \cdot \cos(\beta(\varphi));$$

$$b_y(\varphi) = L_3 \cdot \sin(\beta(\varphi)).$$

Ине. № подл	Подп. и дата	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата					
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат					
					Лист				
					10				

Положение точки D :

$$d_x(\varphi) = a_x(\varphi) + \frac{a}{L_2+a} \cdot (b_x(\varphi) - a_x(\varphi));$$

$$d_y(\varphi) = a_y(\varphi) + \frac{a}{L_2+a} \cdot (b_y(\varphi) - a_y(\varphi)).$$

Расстояние между точками D и F :

$$df(\varphi) = \sqrt{(d_x(\varphi))^2 + (c - d_y(\varphi))^2}.$$

Угол λ :

$$\lambda(\varphi) = \operatorname{atan}\left(\frac{d_x(\varphi)}{c-d_y(\varphi)}\right).$$

Угол γ по теореме косинусов:

$$(L_4)^2 = (L_5)^2 + (df(\varphi))^2 - 2 \cdot L_5 \cdot df(\varphi) \cdot \cos(\gamma(\varphi));$$

$$\cos(\gamma(\varphi)) = \frac{(L_5)^2 + (df(\varphi))^2 - (L_4)^2}{2 \cdot L_5 \cdot df(\varphi)};$$

$$\gamma(\varphi) = \operatorname{acos}\left(\frac{(L_5)^2 + (df(\varphi))^2 - (L_4)^2}{2 \cdot L_5 \cdot df(\varphi)}\right).$$

Положение точки E угол φ_5 :

$$\varphi_5(\varphi) = \lambda(\varphi) + \gamma(\varphi).$$

Диаграмма положения звена 5 представлена на рисунке 2.2.

Скорость звена 5:

$$\omega_5(\varphi) = \frac{d\varphi_5(\varphi)}{d\varphi} \cdot \omega_1.$$

Диаграмма скорости звена 5 представлена на рисунке 2.3.

Ускорение звена 5:

$$\varepsilon_5(\varphi) = \frac{d\omega_5(\varphi)}{d\varphi} \cdot \omega_1.$$

Диаграмма ускорения звена 5 представлена на рисунке 2.4.

Инв. № подл	Подп. и дата				Лист
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
	Подп. и дата				
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	11

$$\gamma(\varphi) = a \cos \left(\frac{(L_5)^2 + (df(\varphi))^2 - (L_4)^2}{2 \cdot L_5 \cdot df(\varphi)} \right).$$

Положение точки E угол φ_5 :

$$\varphi_5(\varphi) = \lambda(\varphi) + \gamma(\varphi).$$

Диаграмма положения звена 5 представлена на рисунке 2.2.

Скорость звена 5:

$$\omega_5(\varphi) = \frac{d\varphi_5(\varphi)}{d\varphi} \cdot \omega_1.$$

Диаграмма скорости звена 5 представлена на рисунке 2.3.

Ускорение звена 5:

$$\varepsilon_5(\varphi) = \frac{d\omega_5(\varphi)}{d\varphi} \cdot \omega_1.$$

Диаграмма ускорения звена 5 представлена на рисунке 2.4.

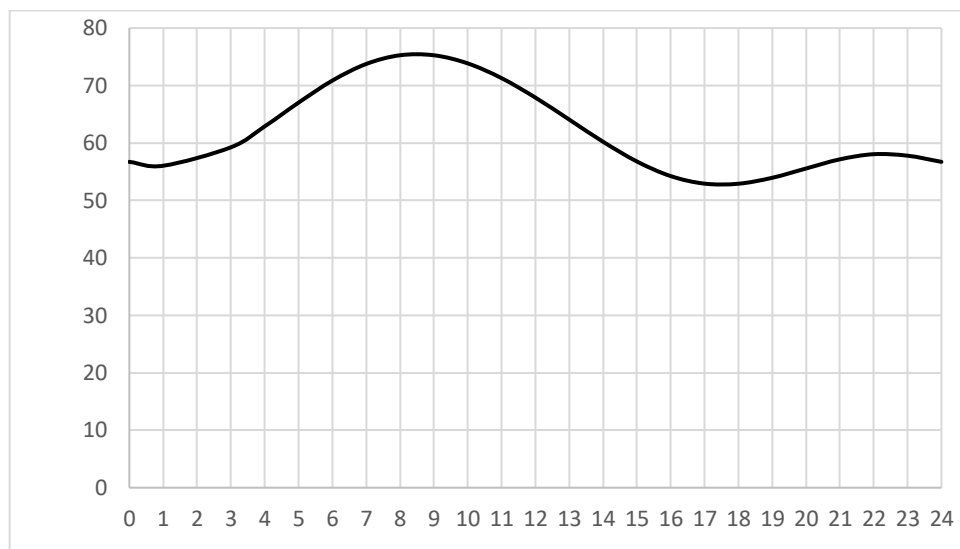


Рисунок 2.2 – Диаграмма положения звена 5

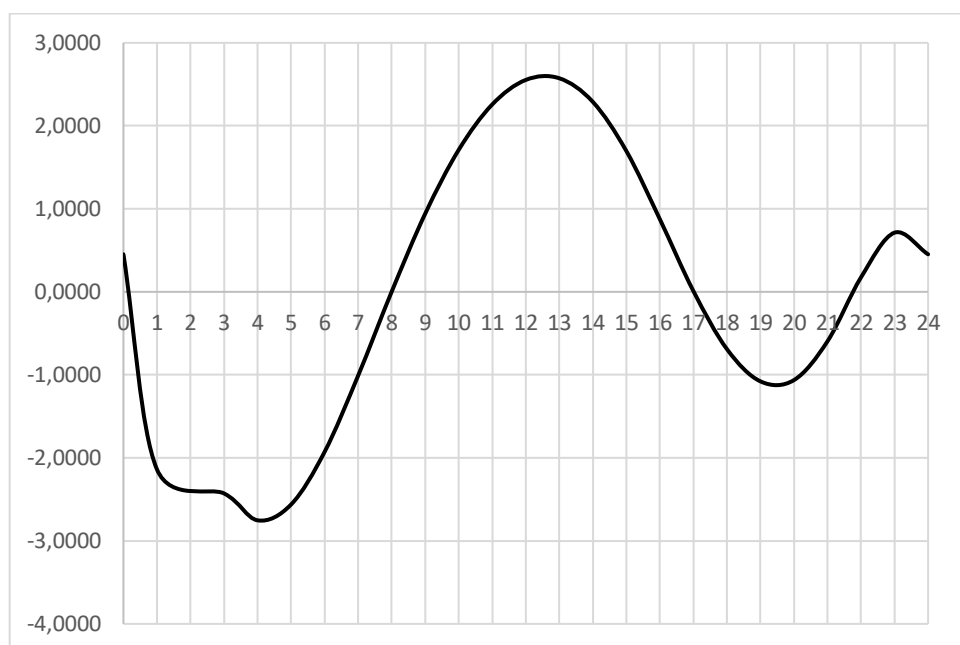


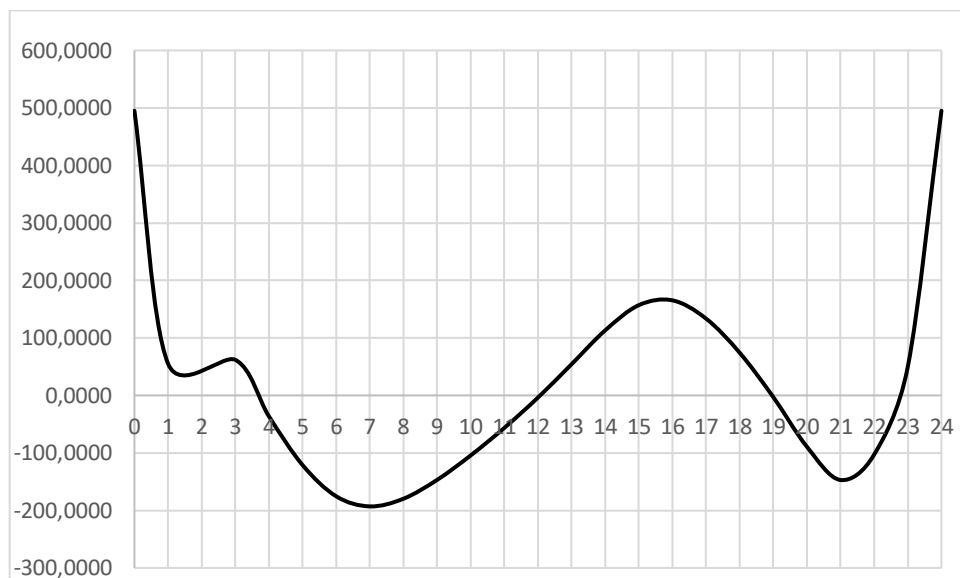
Рисунок 2.3 – Диаграмма скорости звена 5

Сравним полученные данные двумя способами. Результаты сравнения приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Сравнение результатов

Параметр	Метод планов	Аналитический способ	Погрешность ε , %
Положение	75,52	75,27	0,33
Скорость	0,98	0,94	4,26
Ускорение	145,00	146,95	1,34

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		Лист
Ине. № подл	Подп. и дата	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата		

[illegible]

3 Задача 3

Кинематический анализ передач.

Дана схема механизма.

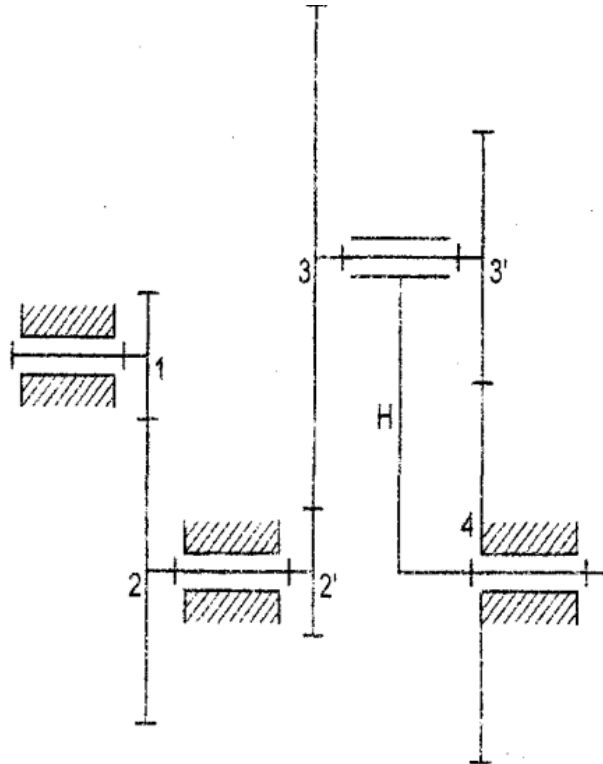


Рисунок 3.1 – Исходные данные

Задание.

Для заданной схемы редуктора подсчитать его передаточное отношение и вычислить угловые скорости всех звеньев.

Таблица 3.1 – Исходные данные

n_1	z_1	z_2	$z_{2'}$	z_3	$z_{3'}$	z_4
об/мин	-					
500	20	48	20	80	40	60

Решение.

1. Структурный анализ.

Число подвижных звеньев $n = 4$.

Число кинематических пар V класса $p_5 = 4$.

Число кинематических пар IV класса $p_4 = 3$.

Степень подвижности механизма:

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат					
					Лист				
					14				

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 4 - 3 = 12 - 8 - 3 = 1.$$

2. Передаточное отношение механизма.

Передаточное отношение находится как произведение передаточных отношений составных частей:

$$u_{1H} = u_{12} \cdot u_{2'H}^{(4)}.$$

Первая ступень - простая передача с внешним зацеплением:

$$u_{12} = -\frac{z_2}{z_1} = -\frac{48}{20} = -\frac{12}{5} = -2,4.$$

Вторая ступень - двухрядная планетарная передача с двумя внешними зацеплениями:

$$u_{2'H}^{(4)} = 1 - \frac{z_3 \cdot z_4}{z_2' \cdot z_3'} = 1 - \frac{80 \cdot 60}{20 \cdot 40} = 1 - 6 = -5,0.$$

Общее передаточное число:

$$u_{1H} = \left(-\frac{12}{5}\right) \cdot (-5,0) = 12,0.$$

3. Кинематический анализ.

Найдём угловые скорости и частоты вращения звеньев.

3.1. Первая ступень.

Колесо 1:

$$\omega_1 = \frac{n_1 \cdot \pi}{30} = \frac{500 \cdot 3,14}{30} = 52,36 \text{ рад/с.}$$

Колесо 2:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{u_{12}} = \frac{52,36}{-2,4} = -21,82 \text{ рад/с;}$$

$$n_2 = \frac{n_1}{u_{12}} = \frac{500}{-2,4} = -208,33 \text{ об/мин.}$$

Знак “-” показывает, что колесо 2 вращается противоположно колесу 1.

3.2. Вторая ступень.

Скорости колёса 2 равно скорости колеса 2':

$$\omega_2 = \omega_{2'} = -21,82 \text{ рад/с; } n_2 = n_{2'} = -208,33 \text{ об/мин.}$$

Колесо 4: $\omega_4 = 0, n_4 = 0$.

Водило планетарной передачи:

$$\omega_H = \frac{\omega_{2'}}{u_{2'H}^{(4)}} = \frac{-21,82}{-5,0} = 4,36 \text{ рад/с;}$$

Инв. № подл	Подп. и дата				Лист
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
Инв. № подл	Подп. и дата				Лист
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	15

3.1. Первая ступень.

Колесо 1:

$$\omega_1 = \frac{n_1 \cdot \pi}{30} = \frac{500 \cdot 3,14}{30} = 52,36 \text{ рад/с.}$$

Колесо 2:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{u_{12}} = \frac{52,36}{-2,4} = -21,82 \text{ рад/с;}$$
$$n_2 = \frac{n_1}{u_{12}} = \frac{500}{-2,4} = -208,33 \text{ об/мин.}$$

Знак “-“ показывает, что колесо 2 вращается противоположно колесу 1.

3.2. Вторая ступень.

Скорости колёса 2 равно скорости колеса 2':

$$\omega_2 = \omega_{2'} = -21,82 \text{ рад/с; } n_2 = n_{2'} = -208,33 \text{ об/мин.}$$

Колесо 4: $\omega_4 = 0, n_4 = 0$.

Водило планетарной передачи:

$$\omega_H = \frac{\omega_{2'}}{u_{2'H}^{(4)}} = \frac{-21,82}{-5,0} = 4,36 \text{ рад/с;}$$

$$n_H = \frac{n_{2'}}{u_{2'H}^{(4)}} = \frac{-208,33}{-5,0} = 41,67 \text{ об/мин.}$$

Скорости колёс 3 и 3' равны:

$$u_{3'4}^{(H)} = -\frac{z_4}{z_{3'}} = -\frac{60}{40} = -1,5;$$

$$u_{3'4}^{(H)} = \frac{n_{3'} - n_H}{n_4 - n_H} = \frac{n_{3'} - n_H}{-n_H} = 1 - \frac{1}{n_H} \cdot n_{3'};$$

$$n_{3'} = n_3 = n_H \cdot (1 - u_{3'4}^{(H)}) = 41,67 \cdot (1 - (-1,5)) = 104,17 \text{ об/мин.};$$

$$\omega_{3'} = \omega_3 = \frac{n_{3'} \cdot \pi}{30} = \frac{104,17 \cdot 3,14}{30} = 10,91 \text{ рад/с.}$$

Инв. № подл	Подп. и дата				Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Инв. № подл	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат					Лист
									16

$$A_d = A_c. \quad (4.1)$$

Работу сил сопротивления можно найти по графику моментов сил сопротивления, вычислив площадь фигуры, ограниченной осями диаграммы и самой линией графика:

$$A_c = 2\pi \cdot \frac{1}{2} \cdot M_{c \max} = \pi \cdot M_{c \max}. \quad (4.2)$$

Момент движущих сил неизменен, поэтому работу движущих сил можно найти:

$$A_d = 2\pi \cdot M_d. \quad (4.3)$$

Подставим (4.2) и (4.3) в (4.1) и вычислим величину момента движущих сил:

$$2\pi \cdot M_d = \pi \cdot M_{c \max};$$

$$M_d = \frac{1}{2} \cdot M_{c \max} = \frac{1}{2} \cdot 80 = 40 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Кинетическая энергия.

Начальная кинетическая энергия:

$$T_0 = \frac{J_{\pi} \cdot (\omega_0)^2}{2} = \frac{0,4 \cdot (20)^2}{2} = 80 \text{ Дж}.$$

Кинетическая энергия в произвольном положении:

$$T_j = T_{j-1} + \mu_M \cdot \mu_{\varphi} \cdot F_{j-1}, \quad (4.4)$$

где j – номер положения ($j = 1..8$);

μ_M, μ_{φ} – масштабы диаграммы момента сил сопротивления;

F_{j-1} – площадь заштрихованной фигуры на рассматриваемом участке.

Результаты расчётов по формуле (4.4) занесём в таблицу 4.1. По результатам расчётов строим диаграмму изменения кинетической энергии. Масштаб диаграммы примем: $\mu_T = 3,0 \text{ Дж/мм}$.

3. Угловая скорость.

Угловую скорость в произвольном положении найдём по формуле:

$$\omega_j = \sqrt{\frac{2 \cdot T_j}{J_{\pi}}}. \quad (4.5)$$

Инв. № подл	Подп. и дата				
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
Подп. и дата					
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	

$$I_0 = \frac{\quad}{2} = \frac{\quad}{2} = 80 \text{ Дж.}$$

Кинетическая энергия в произвольном положении:

$$T_j = T_{j-1} + \mu_M \cdot \mu_\varphi \cdot F_{j-1}, \tag{4.4}$$

где j – номер положения ($j = 1..8$);

μ_M, μ_φ – масштабы диаграммы момента сил сопротивления;

F_{j-1} – площадь заштрихованной фигуры на рассматриваемом участке.

Результаты расчётов по формуле (4.4) занесём в таблицу 4.1. По результатам расчётов строим диаграмму изменения кинетической энергии. Масштаб диаграммы примем: $\mu_T = 3,0 \text{ Дж/мм}$.

3. Угловая скорость.

Угловую скорость в произвольном положении найдём по формуле:

$$\omega_j = \sqrt{\frac{2 \cdot T_j}{J_{\Pi}}}. \tag{4.5}$$

					Лист
					18

Результаты расчётов по формуле (4.5) занесём в таблицу 4.1. По результатам расчётов строим диаграмму изменения угловой скорости. Масштаб диаграммы примем: $\mu_{\omega} = 0,5 \text{ рад}/(\text{с}^{-1} \cdot \text{мм})$.

4. Угловое ускорение.

Угловую скорость в произвольном положении найдём по формуле:

$$\varepsilon_j = \frac{M_{\Delta j} - M_{\Sigma j}}{J_{\Pi}}. \quad (4.6)$$

Результаты расчётов по формуле (4.6) занесём в таблицу 4.1. По результатам расчётов строим диаграмму изменения углового ускорения. Масштаб диаграммы примем: $\mu_{\varepsilon} = 4,0 \text{ рад}/(\text{с}^{-2} \cdot \text{мм})$.

Таблица 4.1

№ п/п	$T, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\omega, \text{с}^{-1}$	$\varepsilon, \text{с}^{-2}$
0	80,00	20,00	100,00
1	87,85	20,96	0,00
2	80,00	20,00	-100,00
3	66,91	18,29	-66,67
4	59,06	17,18	-33,33
5	56,44	16,80	0,00
6	59,06	17,18	33,33
7	66,91	18,29	66,67
8	80,00	20,00	100,00

5. Коэффициент неравномерности движения.

Коэффициент неравномерности движения вычислим по формуле:

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\omega_{\text{max}} + \omega_{\text{min}}}{2} = \frac{20,96 + 16,80}{2} = 18,88 \text{ с}^{-1};$$

$$\delta = \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{\omega_{\text{ср}}} = \frac{20,96 - 16,80}{18,88} = 0,220.$$

6. Избыточная работа.

Избыточная работа на участке изменения угловых скоростей от ω_{max} до ω_{min} :

$$A_{\text{изб}} = T_1 - T_5 = 87,85 - 56,44 = 31,42 \text{ Дж}.$$

7. Допустимое значение коэффициента неравномерности движения:

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата					
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат					
					Лист				
					19				

$$[\delta] = 0,8 \cdot \delta = 0,8 \cdot 0,220 = 0,176.$$

8. Момент инерции маховика:

$$J_{\text{м}} = \frac{A_{\text{изб}}}{(\omega_{\text{ср}})^2 \cdot [\delta]} = \frac{31,42}{(18,88)^2 \cdot 0,176} = 0,500 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Инв. № подл	Подп. и дата		Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат	Лист 20