

Перв. примен.	СОДЕРЖАНИЕ					Стр.
	ВВЕДЕНИЕ					3
Справ. №	Задание 1 – Геометрический синтез и проектирование прямозубого эвольвентного зацепления.....					4
	1.1 Исходные данные					4
	1.2 Определение геометрических размеров колес					4
	Задача 2 – Кинематический и силовой анализ рычажного механизма					9
	2.1 Характеристика исполнительного механизма					9
	2. 2 Структура механизма, подвижность.....					9
	2.3 Определение крайних положений механизма					11
	2.4 Построение плана механизма и плана скоростей.....					12
	2.5 Результаты кинематического исследования					19
	2.6 Построение плана ускорений					21
	2.7 Определение активных сил, сил и моментов сил инерции звеньев механизма					33
	2.8 Силовой расчет группы Ассура (4-5)					34
	2.9 Силовой расчет группы звеньев 2-3					36
	2.10 Силовой расчёт ведущего первичного механизма					39
	2.11 Определение уравнивающей силы с помощью рычага Жуковского					41
	2.12 Определение погрешности силового расчета					43
	Задание 3 – Кинематический синтез и проектирование кулачковых механизмов с роликовым толкателем.....					44
	3.1 Таблица исходных данных					44
	3.2 Построение кинематических диаграмм графическим методом.....					44
	3.3 Синтез кулачкового механизма с роликовым толкателем					46
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....					49
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
	Разраб.					
Инв. № подл.	Пров.					Лит.
						Лист
	Н.контр.					2
	Утв.					Листов

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной курсовой работы является исследование и проектирование рычажного механизма.

Проект содержит задачи по исследованию, проектированию и синтезу простых в структурном отношении механизмов таких как шарнирно – рычажных, кулачковых, зубчатых.

Курсовое проектирование способствует закреплению, углублению и обобщению теоретических данных, а также по исследованию этих знаний к комплексному решению конкретной инженерной задачи по исследованию и расчёту механизмов и машин, кроме того развивает навыки научно – исследовательской работы.

В состав проектных заданий входят, кроме шарнирно – рычажного механизма, кулачковый и зубчатый, предназначенный для передачи движения к исполнительному органу.

Цель курсового проектирования развивать навыки использования общих методов проектирования и исследования механизмов для создания конкретных машин в приборов разнообразного назначения.

Курсовое проектирование ставит задачи:

1. Проектирование зубчатого механизма и расчёт оптимальной геометрии зубчатого зацепления;
2. Анализ структурной схемы механизма и отдельно кинематических пар;
3. Анализ структурной и кинематической схемы рычажного механизма графическим способом;
4. Силовой анализ механизма с учетом геометрии масс звеньев при движении их с ускорением;
5. Проектирование кулачкового механизма и построение рабочего профиля кулачка

Целесообразность принятия конкретных решений при проектировании механизмов обосновываются функциональным назначением данной машины.

Подп.	Дата			
Инв. № дубл.				
Взам. инв. №				
Подп.	Дата			
Инв. № подл.				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
				3

Задание 1 – Геометрический синтез и проектирование прямозубого эвольвентного зацепления

Цель: Для заданных параметров цилиндрической зубчатой передачи провести геометрический расчёт и выполнить чертеж эвольвентной цилиндрической зубчатой передачи внешнего зацепления.

1.1 Исходные данные

$$z_4 = 14, z_5 = 21 - \text{числа зубьев колес;}$$

$m = 4$ мм – модуль зубчатой передачи;

$f_a^* = 1$ – коэффициент высоты головки зуба;

$c^* = 0,25$ – коэффициент радиального зазора;

$\alpha = 20^\circ$ – угол профиля исходного контура;

1.2 Определение геометрических размеров колес

1. Определим радиус делительной окружности шестерни и колеса

$$r_1 = \frac{m \cdot z_4}{2} = \frac{4 \cdot 14}{2} = 28 \text{ mm},$$

$$r_2 = \frac{m \cdot z_5}{2} = \frac{4 \cdot 21}{2} = 42 \text{ mm},$$

2. Коэффициенты x_1 и x_2 смещения исходного контура определим в зависимости от числа зубьев z_4 и z_5 (по формулам ISO):

Число зубьев колес	Коэффициент смещения	
	x_1	x_2
$z_1 < 30, (z_1 + z_2) \geq 60$	$x_1 = 0,03(30 - z_1)$	$x_2 = -x_1$
$z_1 < 30, 30 \leq (z_1 + z_2) \leq 60$	$x_1 = 0,03(30 - z_1)$	$x_2 = 0,03(30 - z_2)$
$(z_1 + z_2) \leq 30$	$x_1 = 0,9 z_2 / (z_1 + z_2)$	$x_2 = 0.9 - x_1$

3. Смещение исходного контура

у шестерни $x_1 \cdot m = 0,48 \cdot 4 = 1,92$ мм.

12. Высота делительной ножки зуба (высота головки):

У шестерни

$$h_{a1} = m \cdot (f_a^* + x_1 - \Delta y) = 4 \cdot (1 + 0,48 - 0,0607) = 5,6772 \text{ мм},$$

У колеса

$$h_{a2} = m \cdot (f_a^* + x_2 - \Delta y) = 4 \cdot (1 + 0,27 - 0,0607) = 4,8372 \text{ мм}.$$

13. Высота делительной ножки зуба (высота ножки):

$$h_{f1} = m \cdot (f_a^* + c^* - x_1) = 4 \cdot (1 + 0,25 - 0,48) = 3,08 \text{ мм},$$

$$h_{f2} = m \cdot (f_a^* + c^* - x_2) = 4 \cdot (1 + 0,25 - 0,27) = 3,92 \text{ мм}.$$

14. Определим радиусы вершин зубьев шестерни и колеса:

$$r_{a1} = m \cdot \left(\frac{z_4}{2} - f_a^* + x_1 - c^* \right) = 4 \cdot \left(\frac{14}{2} - 1 + 0,48 - 0,25 \right) = 33,67 \text{ мм}$$

$$r_{a2} = m \cdot \left(\frac{z_5}{2} - f_a^* + x_2 - c^* \right) = 4 \cdot \left(\frac{21}{2} - 1 + 0,27 - 0,25 \right) = 46,83 \text{ мм}$$

15. Окружной делительный шаг:

$$p = \pi \cdot m = 3,14 \cdot 4 = 12,56 \text{ мм}$$

16. Толщина зуба по делительной окружностям шестерни и колеса:

$$S_1 = m \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot x_1 \cdot \tan a \right) = 4 \cdot \left(\frac{3,14}{2} + 2 \cdot 0,48 \cdot \tan 20^\circ \right) = 7,68 \text{ мм}$$

$$S_2 = m \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot x_2 \cdot \tan a \right) = 4 \cdot \left(\frac{3,14}{2} + 2 \cdot 0,27 \cdot \tan 20^\circ \right) = 7,06 \text{ мм}$$

17. Углы профиля в точке на окружности вершин:

$$a_{a1} = \arccos \left(\frac{r_{b1}}{r_{a1}} \right) = \arccos \left(\frac{26,31}{33,67} \right) = 38,64^\circ$$

$$a_{a2} = \arccos \left(\frac{r_{b2}}{r_{a2}} \right) = \arccos \left(\frac{39,46}{46,83} \right) = 32,54^\circ$$

18. Окружная толщина зуба на окружности вершин:

$$S_{a1} = 2 \cdot r_{a1} \cdot \left(\frac{S_1}{d_1} + \text{inv} a - \text{inv} a_{a1} \right) = 2 \cdot 33,67 \cdot \left(\frac{7,68}{56} + \text{inv} 20^\circ - \text{inv} 38,64^\circ \right) \\ = 1,81 \text{ мм},$$

Подп.	Дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп.	Дата	Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	6
-------	------	--------------	--------------	-------	------	--------------	------	------	----------	-------	------	---

$$S_{a_2} = 2 \cdot r_{a_2} \cdot \left(\frac{S_2}{d_2} + inva - inva_{a_2} \right) = 2 \cdot 46,83 \cdot \left(\frac{7,06}{84} + inv20^\circ - inv32,54^\circ \right) = 2,7$$

MM.

19. Коэффициенты толщины зубьев по окружности вершин:

$$S_{a_1}^* = \frac{S_{a_1}}{m} = \frac{1,81}{4} = 0,452$$

$$S_{a_2}^* = \frac{S_{a_2}}{m} = \frac{2,7}{4} = 0,675$$

20. Определим радиусы окружностей впадин:

$$r_{f_1} = r_1 - h_{f_1} = 28 - 3,08 = 24,92 \text{ mm}$$

$$r_{f_2} = r_2 - h_{f_2} = 42 - 3,92 = 38,08 \text{ mm}$$

21. Для построения эвольвенты следует воспользоваться определением эвольвенты, по которому эвольвенту описывает любая точка нерастяжимой нити при разматывании её окружности. Пусть точка O – конец нити, намотанной на окружности r_0 . Будем разматывать её по кусочкам, на которых хорда близка к окружности. Отложим на окружности несколько отрезков и получим точки 1, 2, 3, 4, 5. В каждой точке проведём касательную. По этим касательным направлена разматываемая нить. Из точки 1 отложим один отрезок, из точки 2 два отрезка, из точки 3 – три и так далее. Получаемые точки 1', 2', 3', 4', 5' лежат на эвольвенте. Соединив их, получим эвольвенту.

При построении двух зубьев, находящихся в зацеплении в полюсе Р, необходимо провести через этот полюс две сопряжённые эвольвенты. Последовательность построения следующая:

- Отложить на чертеже межосевое расстояние O_1O_2 и провести две основные окружности радиусами r_{b_1} и r_{b_2}
- Отложить от межосевой линии углы зацепления α_w и провести радиусы до пересечения с основной окружностью. Обозначить точки пересечения N_1 и N_2 .

- Соединить прямой линией точки N_1 и N_2 (линия зацепления). Она должна пройти через полюс зацепления Р.
- Разбиваем отрезок N_1P на 5 частей и, наматывая этот кусок нити на основную окружность, получить точки 0, 1, 2, 3, 4, 5.
- В точках 1...5 проведем касательные прямые и отложим на них соответственно 1...5 отрезков. Получим точки эвольвенты и соединим их лекало.
- Аналогично разбиваем отрезок N_2P на 5 частей и, наматывая нить на основную окружность, получаем точки 0...9 для окружности r_{b4} .
- В ранее упомянутых точках проводим касательные прямые аналогичным способом строим эвольвенту сопряженного профиля зуба.

Инв. № подл.	Подп.				дата
	Инв. № дудл.				
	Взам. инв. №				
Подп.				дата	
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	8

Задача 2 – Кинематический и силовой анализ рычажного механизма

2.1 Характеристика исполнительного механизма

В исполнительном механизме входным звеном является звено 1, выходным – 5 звено. При работе механизма происходит преобразование вращательного движения входного звена в возвратно поступательное движение выходного звена. На выходное звено действует сила сопротивления, возникающая при совершении работы выходным звеном над полезной нагрузкой.

2.2 Структура механизма, подвижность

Для проведения структурного анализа механизма, необходимо: определить подвижность механизма, определить механизм, разложить механизм на структурные группы.

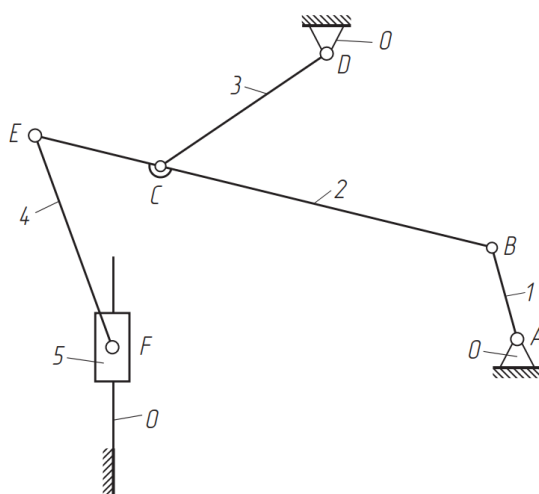


Рис.1 Схема механизма.

Пронумеруем звенья механизма, при этом нулевым звеном обозначим неподвижное звено (стойку). Так как звенья механизма совершают движения параллельно одной плоскости, то его можно отнести к плоским механизмам. Определим подвижность механизма, используя формулу Чебышева П. Л.:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4, \quad (2.1)$$

где n – количество подвижных звеньев,

p_5 – количество кинематических пар пятого класса,

Инв. № подл.	Подп.	Дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	Дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
						9

p_4 – количество кинематических пар четвертого класса.

Посчитаем количество кинематических пар пятого класса:

1. 0-1 вращательная пара,
2. 1-2 вращательная пара,
3. 2-4 вращательная пара,
4. 3-0 вращательная пара,
5. 3-4 вращательная пара,
6. 4-5 вращательная пара,
7. 5-0 поступательная пара.

Таким образом, $n = 5$, $p_5 = 7$, $p_4 = 0$. Подставим эти значения в формулу Чебышева П.Л.:

$$W = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 - 0 = 15 - 14 = 1.$$

Полученный результат означает, что заданное движение одного звена, однозначно определяет движение всех остальных звеньев.

В качестве первичного механизма (входного звена) примем звено 1. За обобщенную координату в этом случае можно принять угол поворота первого звена. Звенья механизма будут совершать следующие движения:

Звено 1 – кривошип, совершает вращательное движение вокруг неподвижной точки;

Звено 2 – шатун, совершает плоское движение;

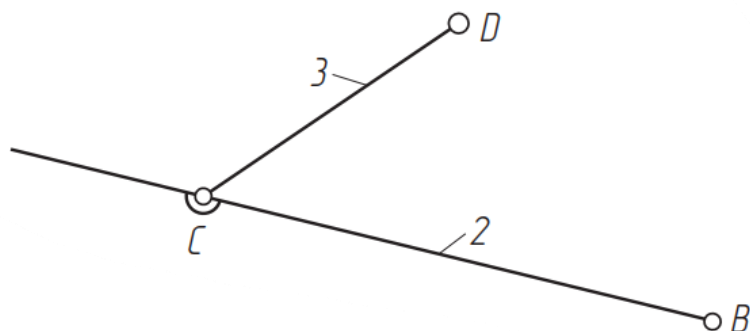
Звено 3 – коромысло, совершает возвратно вращательное движение вокруг точки D;

Звено 4 – шатун, совершает плоское движение;

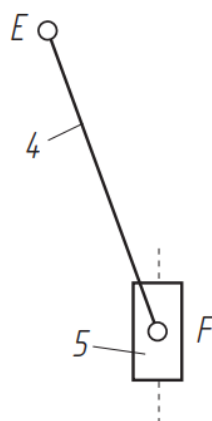
Звено 5 – ползун, совершает возвратно поступательное движение вдоль направляющей движения точки F.

Инв. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	Дата	<p>В качестве первичного механизма (входного звена) примем звено 1. За обобщенную координату в этом случае можно принять угол поворота первого звена. Звенья механизма будут совершать следующие движения:</p> <p>Звено 1 – кривошип, совершает вращательное движение вокруг неподвижной точки;</p> <p>Звено 2 – шатун, совершает плоское движение;</p> <p>Звено 3 – коромысло, совершает возвратно вращательное движение вокруг точки D;</p> <p>Звено 4 – шатун, совершает плоское движение;</p> <p>Звено 5 – ползун, совершает возвратно поступательное движение вдоль направляющей движения точки F.</p>
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	10

группа Ассура звенья 2-3
первая в порядке
присоединения 2 класс 1 вид



группа Ассура звенья 4-5
вторая в порядке
присоединения 2 класс 2 вид



Первичный механизм
1 класс

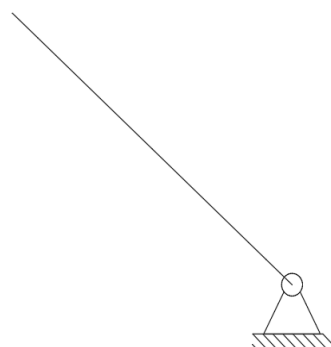


Рис. 2 Структурна механизма.

Разложение механизма приведено на (рис.2). Класс механизма определяется по наивысшему классу структурной компоненты входящей в состав механизма. Таким образом, класса механизма 2, так как в его состав входит структурная группа второго класса.

2.3 Определение крайних положений механизма

Определим крайние положение механизма, соответствующие началу и концу рабочего хода механизма. Крайние положения определяем по верхней и нижней мертвой точке выходного звена (звено 5 поршень прессы). Для этого воспользуемся тем, что скорость точки F будет равна нулю тогда, когда

Инв. № подл.	Подп.	дата
Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.
Подп.	дата	
Инв. № подл.	Подп.	дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

скорость точки Е будет равна нулю, так как звено 3 совершает возвратно вращательное движение.

Определим крайние положения для звена 3. Для этого воспользуемся тем, что звено 3 займёт крайнее положение тогда, когда точки АВС будут лежать на одной прямой.

Используя крайние положения механизма и направление силы сопротивления, определим направление угловой скорости кривошипа. Рабочий ход соответствует большему углу поворота кривошипа при переходе от одного крайнего положения к второму. Направление вращения входного звена (звено 1 кривошип) указано на чертеже.

Углы рабочего и холостого хода будут равны:

$$\varphi_{\text{раб.ход}} = 199^\circ, \varphi_{\text{хол.ход}} = 161^\circ$$

2.4 Построение плана механизма и плана скоростей

Для проведения кинематического исследования построим совмещённый план механизма, приняв за первое положение соответствующее началу рабочего хода.

Выберем масштаб плана механизма равным:

$$\mu_l = \frac{l_{AB}}{54 \text{ мм}} = \frac{0,135 \text{ м}}{54 \text{ мм}} = 0,0025 \frac{\text{м}}{\text{мм}}$$

Тогда длины отрезков соответствующих звеньям и механизма и расстояниям между точками крепления будут равны:

$$\begin{aligned} BE &= \frac{l_{BE}}{\mu_l} = \frac{0,53}{0,0025} = 212 \text{ мм}; & D_y &= \frac{y_D}{\mu_l} = \frac{0,35}{0,0025} = 140 \text{ мм} \\ EF &= \frac{l_{EF}}{\mu_l} = \frac{0,52}{0,0025} = 208 \text{ мм}; & D_x &= \frac{x_D}{\mu_l} = \frac{0,18}{0,0025} = 72 \text{ мм} \\ BC &= \frac{l_{BC}}{\mu_l} = \frac{0,44}{0,0025} = 176 \text{ мм}; & F_x &= \frac{x_F}{\mu_l} = \frac{0,39}{0,0025} = 156 \text{ мм} \\ DC &= \frac{l_{DC}}{\mu_l} = \frac{0,25}{0,0025} = 100 \text{ мм}; \end{aligned}$$

При построении совмещенного плана механизма выберем положение точки А на чертеже, далее из полученной точки А проведём окружность радиусом $r = AB = 54 \text{ мм}$. Построим положения точки В на чертеже,

Подп.	дата				
Инв. № дубл.					
Взам. инв. №					
Подп.	дата				
Инв. № подл.					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	12

начиная с крайнего соответствующему началу рабочего хода механизма, выполнив разбивку на 12 положений в направлении вращения угловой скорости первого звена. Определим положение точки D на чертеже используя заданные её координаты. Из полученной точки проведем дугу окружности радиусом $r = DC = 100$ мм. Из точек B сделаем засечки радиусом $r = BC = 176$ мм на проведенной дуге C. Соединив между собой полученные точки B и C определим положение второго звена в процессе движения.

Далее для каждого из положений отметим положения точек E на звене BC. Восстановим положение направляющей движения точки F. Для этого проведем вертикальную прямую на расстоянии x_F до точки A как указано в задании и сделаем на ней засечки дугой радиусом $r = EF = 208$ мм с центром в соответствующих точках E. Полученные точки F и будут описывать положения занимаемые ползуном в процессе движения кривошипа AB.

Положения центров масс линейных звеньев примем в их серединах.

Для определения кинематических параметров, построим планы скоростей и ускорений.

При построении плана скоростей воспользуемся следующими соотношениями:

1. Рассматривая группу Ассура, звенья 2-3 запишем:

$$\begin{cases} \vec{V}_C = \vec{V}_B + \vec{V}_{CB} \\ \vec{V}_C = \vec{V}_D + \vec{V}_{CD} \end{cases} \quad (2.2)$$

где $V_B = \omega_1 \cdot l_{AB}$ – скорость точки B;

$V_D = 0$ – скорость точки D (равна нулю, так как точка неподвижна);

V_{CB} – скорость точки C принадлежащей второму звену относительно точки B как точки, принадлежащей второму звену.

2. Рассматривая группу Ассура, звенья 4-5 запишем:

Инв. № подл.	Подп.	Дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	Дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							

$$\begin{cases} \overrightarrow{V_F} = \overrightarrow{V_E} + \overrightarrow{V_{FE}} \\ \overrightarrow{V_F} = \overrightarrow{V_{F_0}} + \overrightarrow{V_{F \mp F_0}^r} \end{cases} \quad (2.3)$$

где V_F – скорость точки F;

V_E – скорость точки Е;

$V_{F_0} = 0$ – скорость точки F как точки, принадлежащей стойке (нулевое звено);

$V_{F_5 F_0}^r$ – скорость точки F как точки, принадлежащей пятому звену, относительно точки F как точки принадлежащей стойки.

Исключая \vec{V}_C в системе (2.2), а в системе (2.3) \vec{V}_F получим уравнения:

$$\overrightarrow{V_B} + \overrightarrow{V_{CB}} = \overrightarrow{V_{CD}}; \quad (2.4)$$

$$\overrightarrow{V_E} + \overrightarrow{V_{FE}} = \overrightarrow{V_{F_5 F_0}^r}. \quad (2.5)$$

При этом скорость точки Е, входящую в уравнение (2.5), определим, используя подобие:

$$\frac{V_{CD}}{l_{BC}} = \frac{V_E}{l_{BE}}.$$

Откуда определим:

$$V_{EB} = \frac{V_{CD}}{l_{BC}} \cdot l_{BE} \rightarrow be = \frac{bc}{l_{BC}} \cdot l_{BE}.$$

Определим скорость точки В:

$$V_B = \omega_1 \cdot l_{AB} = 23,98 \cdot 0,135 = 3,24 \frac{\text{M}}{\text{C}}.$$

Выберем масштаб плана скоростей равным:

$$\mu_v = \frac{V_B}{85} = 0,03809 \frac{\text{М}}{\text{С} \cdot \text{ММ}}.$$

Отрезок соответствующий скорости точки В на плане скоростей равен 85 мм.

Построение плана скоростей начнем, выбрав полюс, точка p_v . Из полученной точки p_v отложим отрезок $p_v b$ в направлении скорости точки В. С конца вектора скорости точки В (из полученной точки b) проведём прямую

Инв. № подл.	Подп.	Дата		
Инв. № докл.				
Взам. инв. №				
Подп.	Дата			

$\frac{V_{CD}}{l_{BC}} = \frac{V_E}{l_{BE}}.$

Откуда определим:

$$V_{EB} = \frac{V_{CD}}{l_{BC}} \cdot l_{BE} \rightarrow be = \frac{bc}{l_{BC}} \cdot l_{BE}.$$

Определим скорость точки В:

$$V_B = \omega_1 \cdot l_{AB} = 23,98 \cdot 0,135 = 3,24 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Выберем масштаб плана скоростей равным:

$$\mu_v = \frac{V_B}{85} = 0,03809 \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{мм}}.$$

Отрезок соответствующий скорости точки В на плане скоростей равен 85 мм.

Построение плана скоростей начнем, выбрав полюс, точка p_v . Из полученной точки p_v отложим отрезок $p_v b$ в направлении скорости точки В. С конца вектора скорости точки В (из полученной точки b) проведём прямую

Инв. № подл.	Подп.	Дата		
Инв. № докл.				
Взам. инв. №				
Подп.	Дата			

$$\frac{V_{FE}}{l_{EF}} = \frac{V_{S_4E}}{l_{ES_4}} \rightarrow V_{S_4E} = \frac{l_{ES_4} \cdot V_{FE}}{l_{EF}}.$$

Следовательно, отрезки на плане скоростей соответствующие этим скоростям также будут равны:

$$bs_2 = \frac{l_{BS_2} \cdot bc}{l_{BC}}; \quad (2.6)$$

$$p_v s_3 = \frac{l_{DS_3} \cdot p_v c}{l_{DC}}; \quad (2.7)$$

$$es_4 = \frac{l_{ES_4} \cdot ef}{l_{EF}}. \quad (2.8)$$

Например для положений 0 и 5 получим:

Положение 0:

$$bs_2 = \frac{l_{BS_2} \cdot bc}{l_{BC}} = \frac{0,265 \cdot 85}{0,44} = 51 \text{ мм},$$

$$p_v s_3 = \frac{l_{DS_3} \cdot p_v c}{l_{DC}} = \frac{0,125 \cdot 0}{0,25} = 0 \text{ мм},$$

$$es_4 = \frac{l_{ES_4} \cdot ef}{l_{EF}} = \frac{0,26 \cdot 12}{0,52} = 6 \text{ мм}.$$

Положение 5:

$$bs_2 = \frac{l_{BS_2} \cdot bc}{l_{BC}} = \frac{0,265 \cdot 65}{0,44} = 39 \text{ мм},$$

$$p_v s_3 = \frac{l_{DS_3} \cdot p_v c}{l_{DC}} = \frac{0,125 \cdot 49}{0,25} = 25 \text{ мм},$$

$$es_4 = \frac{l_{ES_4} \cdot ef}{l_{EF}} = \frac{0,26 \cdot 34}{0,52} = 17 \text{ мм}.$$

Для нахождения скорости центра второго звена отложим найденный отрезок bs_2 из точки b вдоль отрезка bc . Полученную точку s_2 соединим с полюсом плана скоростей, найденный отрезок $p_v s_2$ соответствует скорости центра масс второго звена на плане скоростей.

Для нахождения скорости центра масс третьего звена отложим найденный отрезок $p_v s_3$ из полюса вдоль отрезка $p_v c$. Полученную точку s_3 соединим с полюсом плана скоростей, найденный отрезок $p_v s_3$ соответствует скорости центра масс пятого звена на плане скоростей.

Подп.	дата	Инв. № дудл.	Взам. инв. №	Подп.	дата	Инв. № подл.						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата								

Положение 5:

$$bs_2 = \frac{l_{BS_2} \cdot bc}{l_{BC}} = \frac{0,265 \cdot 65}{0,44} = 39 \text{ мм},$$
$$p_v s_3 = \frac{l_{DS_3} \cdot p_v c}{l_{DC}} = \frac{0,125 \cdot 49}{0,25} = 25 \text{ мм},$$
$$es_4 = \frac{l_{ES_4} \cdot ef}{l_{EF}} = \frac{0,26 \cdot 34}{0,52} = 17 \text{ мм}.$$

Для нахождения скорости центра второго звена отложим найденный отрезок bs_2 из точки b вдоль отрезка bc . Полученную точку s_2 соединим с полюсом плана скоростей, найденный отрезок $p_v s_2$ соответствует скорости центра масс второго звена на плане скоростей.

Для нахождения скорости центра масс третьего звена отложим найденный отрезок $p_v s_3$ из полюса вдоль отрезка $p_v c$. Полученную точку s_3 соединим с полюсом плана скоростей, найденный отрезок $p_v s_3$ соответствует скорости центра масс пятого звена на плане скоростей.

Например для положений 0 и 5 получим:

Положение 0:

$$\omega_2 = \frac{bc \cdot \mu_v}{l_{BC}} = \frac{85 \cdot 0,03809}{0,44} = 7,36 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_3 = \frac{p_v c \cdot \mu_v}{l_{DC}} = \frac{0 \cdot 0,03809}{0,25} = 0 \text{ c}^{-1};$$

$$\omega_4 = \frac{ef \cdot \mu_v}{l_{EF}} = \frac{12 \cdot 0,03809}{0,52} = 0,88 \text{ c}^{-1};$$

Положение 5:

$$\omega_2 = \frac{bc \cdot \mu_v}{l_{BC}} = \frac{65 \cdot 0,03809}{0,44} = 5,63 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_3 = \frac{p_v c \cdot \mu_v}{l_{DC}} = \frac{49 \cdot 0,03809}{0,25} = 7,47 \text{ c}^{-1};$$

$$\omega_4 = \frac{ef \cdot \mu_v}{l_{EF}} = \frac{34 \cdot 0,03809}{0,52} = 2,49 \text{ c}^{-1}.$$

Направление угловых скоростей определяем, используя направления найденных линейных скоростей \vec{V}_{CD} , \vec{V}_C и \vec{V}_{FE} мысленно перенеся их в точки С, С и F определив при этом направление вращения вокруг точек В, D и E соответственно.

Инв. № подл.	Подп.	дата	Взам. инв. №	Инв. № дудл.	Подп.	дата					
Инв. № подл.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						18	

2.5 Результаты кинематического исследования

Таблица 2.1 – Результаты кинематического исследования

Образ	Разм	0	1	2	3	4	5
Отрезки на плане скоростей							
cb	мм	85	23	5	25	44	65
$p_v c$	мм	0	67	87	87	73	49
$p_v e$	мм	17	64	88	88	74	49
fe	мм	12	3	22	42	47	34
$p_v f$	мм	11	65	89	82	59	35
$p_v s_2$	мм	34	74	86	85	75	58
$p_v s_3$	мм	0	34	44	44	37	25
$p_v s_4$	мм	13	64	88	82	62	40
Линейные скорости							
V_{CB}	м / с	3,24	0,88	0,19	0,95	1,68	2,48
V_C	м / с	0	2,55	3,31	3,31	2,78	1,87
V_E	м / с	0,65	2,44	3,35	3,35	2,82	1,87
V_{FE}	м / с	0,46	0,11	0,84	1,6	1,79	1,3
V_F	м / с	0,42	2,48	3,39	3,12	2,25	1,33
V_{S_2}	м / с	1,3	2,82	3,28	3,24	2,86	2,21
V_{S_3}	м / с	0	1,3	1,68	1,68	1,41	0,95
V_{S_4}	м / с	0,5	2,44	3,35	3,12	2,36	1,52
Угловые скорости							
ω_2	c^{-1}	7,36	1,99	0,43	2,16	3,81	5,63
ω_3	c^{-1}	0	10,21	13,26	13,26	11,12	7,47
ω_4	c^{-1}	0,88	0,22	1,61	3,08	3,44	2,49

Инв. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дудл.	Подп.	Дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Образ.	Разм.	6	7	8	9	10	11	12
Отрезки на плане скоростей								
cb	мм	81	85	83	60	1	99	158
$p_v c$	мм	19	0	12	44	84	129	113
$p_v e$	мм	24	17	20	42	84	145	142
fe	мм	9	7	17	41	64	57	9
$p_v f$	мм	22	16	12	10	61	144	139
$p_v s_2$	мм	39	34	36	56	85	103	68
$p_v s_3$	мм	10	0	6	22	42	65	57
$p_v s_4$	мм	23	17	14	23	66	141	140
Линейные скорости								
V_{CB}	м / с	3,09	3,24	3,16	2,29	0,04	3,77	6,02
V_C	м / с	0,72	0	0,46	1,68	3,2	4,91	4,3
V_E	м / с	0,91	0,65	0,76	1,6	3,2	5,52	5,41
V_{FE}	м / с	0,34	0,27	0,65	1,56	2,44	2,17	0,34
V_F	м / с	0,84	0,61	0,46	0,38	2,32	5,48	5,29
V_{S_2}	м / с	1,49	1,3	1,37	2,13	3,24	3,92	2,59
V_{S_3}	м / с	0,38	0	0,23	0,84	1,6	2,48	2,17
V_{S_4}	м / с	0,88	0,655	0,53	0,88	2,51	5,37	5,33
Угловые скорости								
ω_2	c^{-1}	7,01	7,36	7,19	5,19	0,09	8,57	13,68
ω_3	c^{-1}	2,89	0	1,83	6,7	12,8	19,65	17,22
ω_4	c^{-1}	0,66	0,51	1,25	3	4,69	4,18	0,66

Инв. № подл.	Подп.	Дата
	Взам. инв. №	Инв. № дудл.
	Подп.	Дата
	Инв. № подл.	Подп.

Инв. № подл.	Подп.	дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

	21
--	----

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

	21
--	----

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

$$\begin{cases} \overrightarrow{a_B} + \overrightarrow{a_{CB}^n} + \overrightarrow{a_{CB}^\tau} = \overrightarrow{a_{CD}^n} + \overrightarrow{a_{CD}^\tau} \\ \overrightarrow{a_E} + \overrightarrow{a_{FE}^n} + \overrightarrow{a_{FE}^\tau} = \overrightarrow{a_{F_5F_0}^r} \end{cases} \quad (2.11)$$

Используя уравнение (2.11) построим план ускорений, при этом необходимо учесть, что полное ускорение $\overrightarrow{a_E}$ определим, используя выражение:

$$\overrightarrow{a_E} = \overrightarrow{a_B} + \overrightarrow{a_{EB}^n} + \overrightarrow{a_{EB}^\tau} = \overrightarrow{a_B} + \overrightarrow{a_{EB}}.$$

Для определения a_{EB} , воспользуемся соотношением, которое следует из подобия:

$$\frac{a_{EB}}{l_{EB}} = \frac{a_{CB}}{l_{CB}} \rightarrow a_{EB} = \frac{a_{CB} \cdot l_{EB}}{l_{CB}}.$$

Тогда длина отрезка соответствующего ускорению a_{EB} на плане ускорений будет равна:

$$be = \frac{bc \cdot l_{BE}}{l_{BC}}.$$

Следовательно, построив часть плана ускорений по уравнению (2.11) определим ускорение a_E , что даст возможность использовать второе уравнение системы (2.11) для построения оставшейся части плана ускорений.

$$a_B = \omega_1^2 \cdot l_{AB} = 23,98^2 \cdot 0,135 = 77,63 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Определим известные ускорения для исследуемых положений 0 и 5:

Положение 0:

$$a_{CB}^n = \omega_2^2 \cdot l_{BC} = 7,36^2 \cdot 0,44 = 23,83 \frac{\text{м}}{\text{с}^2},$$

$$a_{CD}^n = \omega_3^2 \cdot l_{DC} = 0^2 \cdot 0,25 = 0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2},$$

$$a_{FE}^n = \omega_4^2 \cdot l_{EF} = 0,88^2 \cdot 0,52 = 0,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2},$$

Выберем масштабный коэффициент плана ускорений равным:

$$\mu_a = \frac{a_B}{85 \text{ мм}} = \frac{77,63 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{85 \text{ мм}} = 0,913 \frac{\text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{мм}}.$$

Тогда отрезки на плане ускорений соответствующие известным ускорениям будут равны:

Положение 0:

Инв. № подл.	Подп.	Дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	Дата					22
							Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

$$p_a b = \frac{a_B}{\mu_a} = \frac{77,63}{0,913} = 85 \text{ мм},$$

$$b n_{cb} = \frac{a_{CB}^n}{\mu_a} = \frac{23,83}{0,913} = 26 \text{ мм},$$

$$e n_{fe} = \frac{a_{FE}^n}{\mu_a} = \frac{0,4}{0,913} = 0 \text{ мм},$$

$$p_a n_c = \frac{a_C^n}{\mu_a} = \frac{0}{0,913} = 0 \text{ мм}.$$

Положение 5:

$$p_a b = \frac{a_B}{\mu_a} = \frac{77,63}{0,913} = 85 \text{ мм},$$

$$b n_{cb} = \frac{a_{CB}^n}{\mu_a} = \frac{13,95}{0,913} = 26 \text{ мм},$$

$$e n_{fe} = \frac{a_{FE}^n}{\mu_a} = \frac{3,22}{0,913} = 4 \text{ мм},$$

$$p_a n_c = \frac{a_C^n}{\mu_a} = \frac{13,95}{0,913} = 15 \text{ мм}.$$

Для построения ускорений выберем полюс p_a . Отложим отрезок $p_a b$ в направлении ускорения $\overrightarrow{a_B}$, из полученной b точки отложим отрезок $b n_{cb}$ в направлении ускорения $\overrightarrow{a_{CB}^n}$ (в направлении от точки C к точке B параллельно BC на совмещенном плане механизма для каждого положения). Из полученной точки n_{cb} проведём прямую перпендикулярно BC (вдоль этой прямой направлено тангенциальное ускорение $\overrightarrow{a_{CB}^t}$). Дальнейшие построения проводим из полюса, отложим отрезок $p_a n_c$ в направлении ускорения $\overrightarrow{a_{CD}^n}$ (в направлении от точки C к точке D параллельно DC на совмещенном плане механизма для каждого положения). Из полученной точки n_c проведём прямую перпендикулярно DC (вдоль этой прямой направлено тангенциальное ускорение $\overrightarrow{a_{CD}^t}$). Определив точку пересечения с ранее проведённой прямой, найдём отрезок $p_a c$, который соответствует ускорению точки C на плане ускорений.

Подп.		дата		Инв. № дубл.		Взам. инв. №		Подп.		дата		Инв. № подл.							23		
Изм.		Лист		№ докум.		Подп.		Дата													

μ_a 0,913

Для построения ускорений выберем полюс p_a . Отложим отрезок $p_a b$ в направлении ускорения $\overrightarrow{a_B}$, из полученной b точки отложим отрезок bn_{cb} в направлении ускорения $\overrightarrow{a_{CB}^n}$ (в направлении от точки C к точке B параллельно BC на совмещенном плане механизма для каждого положения). Из полученной точки n_{cb} проведём прямую перпендикулярно BC (вдоль этой прямой направлено тангенциальное ускорение $\overrightarrow{a_{CB}^{\tau}}$). Дальнейшие построения проводим из полюса, отложим отрезок $p_a n_c$ в направлении ускорения $\overrightarrow{a_{CD}^n}$ (в направлении от точки C к точке D параллельно DC на совмещенном плане механизма для каждого положения). Из полученной точки n_c проведём прямую перпендикулярно DC (вдоль этой прямой направлено тангенциальное ускорение $\overrightarrow{a_{CD}^{\tau}}$). Определив точку пересечения с ранее проведённой прямой, найдём отрезок $p_a c$, который соответствует ускорению точки C на плане ускорений.

Используя построенную часть плана ускорений определим ускорение точки E, с помощью выражения (2.12). Для положений 0 и 5 получим:

Положение 0:

$$be = \frac{bc \cdot l_{BE}}{l_{BC}} = \frac{167 \cdot 0,53}{0,44} = 201 \text{ мм},$$

Положение 5:

$$be = \frac{bc \cdot l_{BE}}{l_{BC}} = \frac{42 \cdot 0,53}{0,44} = 51 \text{ мм}.$$

Для нахождения ускорений точки E на плане ускорений отложим найденный отрезок be из точки b на плане ускорений вдоль отрезка bc. Найденную точку e соединим с полюсом плана ускорений, тогда отрезок $p_a e$ будет соответствовать ускорению точки E на плане ускорений.

Дальнейшие построения проводим из точки E, отложив отрезок en_{fe} параллельно отрезку EF в направлении ускорения $\overrightarrow{a_{FE}^n}$. Из полученной точки n_{fe} проведём прямую перпендикулярно EF (вдоль этой прямой направлено ускорение $\overrightarrow{a_{FE}^\tau}$). Далее из полюса проведём вертикальную прямую (параллельно направляющей движения ползуна), определив точку пересечения с ранее проведённой прямой найдём точку n_{fe} . Найденный отрезок $p_a f$ соответствует полному ускорению точки F.

Для определения ускорений центров масс звеньев механизма, воспользуемся уравнениями:

$$\overrightarrow{a_{s_2}} = \overrightarrow{a_B} + \overrightarrow{a_{s_2B}^n} + \overrightarrow{a_{s_2B}^\tau} = \overrightarrow{a_B} + \overrightarrow{a_{s_2B}};$$

$$\overrightarrow{a_{s_3}} = \overrightarrow{a_D} + \overrightarrow{a_{s_3D}^n} + \overrightarrow{a_{s_3D}^\tau} = \overrightarrow{a_D} + \overrightarrow{a_{s_3D}};$$

$$\overrightarrow{a_{s_4}} = \overrightarrow{a_E} + \overrightarrow{a_{s_4E}^n} + \overrightarrow{a_{s_4E}^\tau} = \overrightarrow{a_E} + \overrightarrow{a_{s_4E}};$$

Для определения отрезков на плане ускорений соответствующих ускорениями $\overrightarrow{a_{s_2B}}$, $\overrightarrow{a_{s_3}}$ и $\overrightarrow{a_{s_4B}}$ воспользуемся подобием:

$$\frac{a_{s_2B}}{l_{BS_2}} = \frac{a_{CB}}{l_{BC}} \rightarrow a_{s_2B} = \frac{a_{CB} \cdot l_{BS_2}}{l_{BC}},$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Инв. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	Дата

$$\frac{a_{s_3D}}{l_{DS_3}} = \frac{a_{CD}}{l_{CD}} \rightarrow a_{s_3D} = \frac{a_{CD} \cdot l_{DS_3}}{l_{CD}},$$

$$\frac{a_{s_4E}}{l_{ES_4}} = \frac{a_{FE}}{l_{EF}} \rightarrow a_{s_4E} = \frac{a_{FE} \cdot l_{ES_4}}{l_{EF}}.$$

Воспользовавшись построенным планом ускорений, получим:

$$bs_2 = \frac{bc \cdot l_{BS_2}}{l_{BC}},$$

$$pa s_3 = \frac{pac \cdot l_{DS_3}}{l_{DC}},$$

$$es_4 = \frac{ef \cdot l_{ES_4}}{l_{EF}}.$$

Для положений 0 и 5 получим следующие значения:

Положение 0:

$$bs_2 = \frac{bc \cdot l_{BS_2}}{l_{BC}} = \frac{167 \cdot 0,265}{0,44} = 101 \text{ мм},$$

$$pa s_3 = \frac{pac \cdot l_{DS_3}}{l_{DC}} = \frac{198 \cdot 0,125}{0,25} = 99 \text{ мм},$$

$$es_4 = \frac{ef \cdot l_{ES_4}}{l_{EF}} = \frac{47 \cdot 0,26}{0,52} = 24 \text{ мм};$$

Положение 5:

$$bs_2 = \frac{bc \cdot l_{BS_2}}{l_{BC}} = \frac{42 \cdot 0,265}{0,44} = 25 \text{ мм},$$

$$pa s_3 = \frac{pac \cdot l_{DS_3}}{l_{DC}} = \frac{55 \cdot 0,125}{0,25} = 28 \text{ мм},$$

$$es_4 = \frac{ef \cdot l_{ES_4}}{l_{EF}} = \frac{40 \cdot 0,26}{0,52} = 20 \text{ мм}.$$

Для нахождения ускорения центра масс второго звена отложим найденный отрезок bs_2 из точки b вдоль отрезка bc . Полученную точку s_2 соединим с полюсом плана ускорений, найденный отрезок $pa s_2$ соответствует ускорению центра масс второго звена на плане ускорений.

Для нахождения ускорения центра масс третьего звена отложим найденный отрезок $pa s_3$ из полюса вдоль отрезка pac . Полученную точку s_3 соединим с полюсом плана ускорений, найденный отрезок $pa s_3$ соответствует ускорению центра масс третьего звена на плане ускорений.

Для нахождения ускорения центра масс четвертого звена отложим найденный отрезок es_4 из точки e вдоль отрезка ef . Полученную точку s_4

Инв. № подл.	Подп.	Дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Инв. № подл.	Подп.	Дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	25
--------------	-------	------	--------------	--------------	--------------	-------	------	------	------	----------	-------	------	----

Направление угловых ускорений определяем, используя направления найденных линейных ускорений $\overrightarrow{a_{CB}^T}$, $\overrightarrow{a_{CD}^T}$ и $\overrightarrow{a_{FE}^T}$ мысленно перенеся из в точки С, С и F, определив при этом направление вращения вокруг точек В, D, и E соответственно. Для остальных положений результаты вычислений представлены в таблице 2.2:

Таблица 2.2 – Результаты вычислений ускорений

Результаты вычислений ускорений, положение 0

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^T	a_C^n	a_C^T	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^T	a_F
$\mu_a, (\frac{м}{с^2 \cdot мм})$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	26	164	0	198	198	230	0	47	215
Значения, м/с ²	77,63	23,83	149,77	0	180,77	180,77	210	0,4	42,91	196,3
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	141	99	212	215	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	128,73	90,39	193,56	196,3	372,73	792	90,38	-	-

Результаты вычислений ускорений, положение 1

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^T	a_C^n	a_C^T	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^T	a_F
$\mu_a, (\frac{м}{с^2 \cdot мм})$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	2	76	29	71	76	83	0	17	85
Значения, м/с ²	77,63	1,74	69,39	26,1	64,82	69,39	75,8	0,03	15,52	77,61
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	71	38	87	85	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	64,82	34,69	79,4	77,61	172,73	284	32,69	-	-

Изм. № подл. Взам. инв. № Инв. № дубл. Подп. дата

Результаты вычислений ускорений, положение 2

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{м}{с^2 \cdot мм}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	0	164	48	14	50	45	1	45	13
Значения, м/с ²	77,63	0,08	37,43	43,9	12,78	45,65	41,1	1,35	41,09	11,87
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	63	25	27	13	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	57,52	22,83	24,6	11,87	93,18	56	90,38	-	-

Результаты вычислений ускорений, положение 3

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{м}{с^2 \cdot мм}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	2	35	48	15	50	43	5	27	34
Значения, м/с ²	77,63	2,05	31,96	43,9	13,7	45,65	39,3	4,93	24,65	31,04
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	64	25	38	34	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	58,43	22,83	34,7	31,04	79,55	60	51,92	-	-

Результаты вычислений ускорений, положение 4

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{м}{с^2 \cdot мм}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	7	39	34	37	50	50	7	9	50
Значения, м/с ²	77,63	6,39	35,61	30,9	33,78	45,65	45,65	6,15	8,22	45,65
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	63	25	54	50	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	57,52	22,83	49,3	45,65	88,64	148	17,31	-	-

Изм. № подл. Взам. инв. № Инв. № дубл. Подп. дата

Результаты вычислений ускорений, положение 5

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{мм}}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	15	39	15	53	55	51	4	40	35
Значения, м/с ²	77,63	13,95	35,61	13,9	48,39	50,22	46,5 6	3,22	36,52	31,96
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	66	28	42	35	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	60,26	25,56	38,3 5	31,96	88,64	212	76,92	-	-

Результаты вычислений ускорений, положение 6

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{мм}}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	24	21	2	59	59	54	0	50	18
Значения, м/с ²	77,63	21,62	19,17	2,09	53,87	53,87	49,3	0,23	45,65	16,43
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	69	30	30	18	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	63	27,39	27,3 9	16,43	47,73	236	96,15	-	-

Инв. № подл. Подп. дата Инв. № дубл. Взам. инв. № Подп. дата Инв. № подл.

Результаты вычислений, положение 7

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{м}{с^2 \cdot мм}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	26	0	0	59	59	54	0	49	19
Значения, м/с ²	77,63	23,83	0	0	53,87	53,87	49,3	0,14	44,74	17,35
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	69	30	30	19	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	63	27,39	27,3 9	17,35	0	236	94,23	-	-

Результат вычислений ускорений, положение 8

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{м}{с^2 \cdot мм}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	25	17	1	59	59	55	1	48	25
Значения, м/с ²	77,63	22,75	15,52	0,84	53,87	53,87	50,2	0,81	43,82	22,83
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	69	30	34	25	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	63	27,39	31,0 4	22,83	372,73	792	90,38	-	-

Подп. дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. дата

Инв. № подл.

Результат вычислений ускорений, положение 9

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{м}{с^2 \cdot мм}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	13	75	12	67	69	75	5	47	64
Значения, м/с ²	77,63	11,85	63,48	11,2	61,17	63	68,4 8	4,68	42,91	58,43
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	66	35	70	64	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	60,26	31,96	63,9	58,43	170,45	268	90,38	-	-

Результат вычислений ускорений, положение 10

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{м}{с^2 \cdot мм}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	0	156	45	86	98	126	13	32	138
Значения, м/с ²	77,63	0	142,43	40,9	78,52	89,47	115, 04	11,44	29,22	125,99
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	53	49	146	138	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	48,39	44,74	133, 3	125,99	354,55	344	61,54	-	-

Инв. № подл.	Подп. дата	Инв. № дубл.	Подп. дата	Взам. инв. №	Подп. дата	Инв. № подл.	Подп. дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. дата	Инв. № подл.	Подп. дата

Результат вычислений ускорений, положение 11

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{м}{с^2 \cdot мм}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	35	203	106	64	124	165	10	79	140
Значения, м/с ²	77,63	32,32	185,34	96,5 3	58,43	113,21	150, 65	9,09	71,13	127,82
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	44	62	143	140	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	40,17	56,61	130, 56	127,82	461,36	256	151,92	-	-

Результат вычислений ускорений, положение 12

Наименование величин	Ускорения характерных точек									
	a_B	a_{CB}^n	a_{CB}^τ	a_C^n	a_C^τ	a_C	a_E	a_{FE}^n	a_{FE}^τ	a_F
$\mu_a, \left(\frac{м}{с^2 \cdot мм}\right)$	0,913									
Отрезок, (мм)	85	90	34	81	158	178	197	0	105	192
Значения, м/с ²	77,63	82,34	31,04	74,1 3	144,25	162,51	179, 86	0,23	95,87	175,3
	Ускорения центров масс					Угловые ускорения				
	-	a_{S_2}	a_{S_3}	a_{S_4}	a_{S_5}	ε_2	ε_3	ε_4	-	-
Отрезок, (мм)	-	140	89	210	192	-	-	-	-	-
Значения, м/с ²	-	127,82	81,26	191, 73	175,73	77,27	632	201,92	-	-

Инв. № подл.

Подл. дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подл. дата

2.7 Определение активных сил, сил и моментов сил инерции звеньев механизма

Определение силы тяжести звеньев механизма:

$$G_1 = m_1 \cdot g = 53 \cdot 9,8 = 519,4 \text{ Н},$$

$$G_2 = m_2 \cdot g = 17,6 \cdot 9,8 = 172,48 \text{ Н},$$

$$G_3 = m_3 \cdot g = 14 \cdot 9,8 = 137,2 \text{ Н},$$

$$G_4 = m_4 \cdot g = 21 \cdot 9,8 = 205,8 \text{ Н},$$

$$G_5 = m_5 \cdot g = 105 \cdot 9,8 = 1029 \text{ Н}.$$

При определении сил инерции, учитываем что вращающееся первое звено уравновешено и его центра тяжести расположен на оси вращения. Используя построенный план ускорений, определим силы и моменты сил инерции, действующие на звенья механизма в процессе движения:

Положение 0:

$$F_{u_2} = m_2 \cdot a_{S_2} = 17,6 \cdot 128,73 = 2265,65 \text{ Н},$$

$$F_{u_3} = m_3 \cdot a_{S_3} = 14 \cdot 90,39 = 1265,46 \text{ Н},$$

$$F_{u_4} = m_4 \cdot a_{S_4} = 21 \cdot 193,56 = 4063,76 \text{ Н},$$

$$F_{u_5} = m_5 \cdot a_{S_5} = 105 \cdot 196,3 = 20611,5 \text{ Н},$$

$$M_{u_2} = I_{S_2} \cdot \varepsilon_2 = 0,378 \cdot 372,73 = 128,63 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{u_3} = I_{S_3} \cdot \varepsilon_3 = 0,097 \cdot 792 = 70,14 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{u_4} = I_{S_4} \cdot \varepsilon_4 = 0,473 \cdot 90,38 = 39,03 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Положение 5:

$$F_{u_2} = m_2 \cdot a_{S_2} = 17,6 \cdot 60,26 = 1060,58 \text{ Н},$$

$$F_{u_3} = m_3 \cdot a_{S_3} = 14 \cdot 25,56 = 357,84 \text{ Н},$$

$$F_{u_4} = m_4 \cdot a_{S_4} = 21 \cdot 38,35 = 805,35 \text{ Н},$$

$$F_{u_5} = m_5 \cdot a_{S_5} = 105 \cdot 31,96 = 3355,8 \text{ Н},$$

Инв. № подл.	Подп.	Дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	Дата	Инв. № подл.	Подп.	Дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		33

$$ab = \frac{Q}{\mu_F} = \frac{0}{75} = 0 \text{ мм},$$

$$bc = \frac{F_{u5}}{\mu_F} = \frac{3355,8}{75} = 45 \text{ мм},$$

$$cd = \frac{\overrightarrow{G_5}}{\mu_F} = \frac{1029}{75} = 14 \text{ мм},$$

$$de = \frac{F_{u4}}{\mu_F} = \frac{4064,76}{75} = 54 \text{ мм},$$

$$ef = \frac{G_4}{\mu_F} = \frac{205,8}{75} = 3 \text{ мм},$$

$$fg = \frac{R_{42}^T}{\mu_F} = \frac{249,7}{75} = 3 \text{ мм}.$$

Из плана сил определим:

$$R_{50} = ka \cdot \mu_l = 55 \cdot 75 = 4125 \text{ Н},$$

$$R_{42}^n = gk \cdot \mu_l = 318 \cdot 75 = 23850 \text{ Н},$$

$$R_{42} = fk \cdot \mu_l = 318 \cdot 75 = 23850 \text{ Н}.$$

Рассмотрим группу звеньев 5-0 и составим уравнение суммы сил:

$$\sum F_i = \overrightarrow{R_{50}} + \overrightarrow{Q} + \overrightarrow{F_{u5}} + \overrightarrow{R_{54}} + \overrightarrow{G_5} = 0. \quad (2.15)$$

В уравнении (2.15) неизвестна по модулю и направлению сила $\overrightarrow{R_{54}}$. Так как, в уравнении (2.15) две неизвестные, то его можно решить, построив план сил. Используя построенный план сил по уравнению (2.14) определим силу R_{54} :

$$R_{54} = dk \cdot \mu_l = 267 \cdot 75 = 20025 \text{ Н}.$$

Положение 5:

$$\sum M(F_i) = -R_{42}^T \cdot l_{EF} + F_{u4} \cdot h_{u4} \cdot \mu_l - G_4 \cdot h_4 \cdot \mu_l - M_4 = 0.$$

Определим R_{42}^T :

$$R_{42}^T = \frac{F_{u4} \cdot h_{u4} \cdot \mu_l - G_4 \cdot h_4 \cdot \mu_l - M_4}{l_{EF}} = \frac{805,35 \cdot 48 \cdot 0,0025 - 205,8 \cdot 2 \cdot 0,0025 - 33,22}{0,52} = 119,99 \text{ Н}. \quad (2.16)$$

Рассмотрим группу Ассура 4-5, составим уравнение суммы сил:

$$\sum F_i = \overrightarrow{R_{50}} + \overrightarrow{G_5} + \overrightarrow{F_{u5}} + \overrightarrow{Q} + \overrightarrow{G_4} + \overrightarrow{F_{u4}} + \overrightarrow{R_{42}^T} + \overrightarrow{R_{42}^n} = 0. \quad (2.17)$$

В уравнении (2.17) неизвестны силы $\overrightarrow{R_{50}}$ и $\overrightarrow{R_{42}^n}$, их можно определить, построив план сил.

Подп.	дата	Инв. № дудл.	Взам. инв. №	Подп.	дата	Инв. № подл.
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	35	

$$\mu_F = \frac{F_{u_5}}{bc} = \frac{3355,8}{275} = 75 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

Тогда длины отрезков соответствующих известным силам на плане сил будут равны:

$$ab = \frac{Q}{\mu_F} = \frac{23220}{75} = 310 \text{ мм},$$

$$bc = \frac{F_{u_5}}{\mu_F} = \frac{3355,8}{75} = 45 \text{ мм},$$

$$cd = \frac{\overrightarrow{G_5}}{\mu_F} = \frac{1029}{75} = 14 \text{ мм},$$

$$de = \frac{F_{u_4}}{\mu_F} = \frac{805,35}{75} = 11 \text{ мм},$$

$$ef = \frac{G_4}{\mu_F} = \frac{205,8}{75} = 3 \text{ мм},$$

$$fg = \frac{R_{42}^T}{\mu_F} = \frac{119,99}{75} = 2 \text{ мм}.$$

Из плана сил определим:

$$R_{50} = ka \cdot \mu_l = 7 \cdot 75 = 525 \text{ Н},$$

$$R_{42}^n = gk \cdot \mu_l = 239 \cdot 75 = 17925 \text{ Н},$$

$$R_{42} = fk \cdot \mu_l = 239 \cdot 75 = 17925 \text{ Н}.$$

Рассмотрим группу звеньев 5-0 и составим уравнение суммы сил:

$$\sum F_i = \overrightarrow{R_{50}} + \vec{Q} + \overrightarrow{F_{u_5}} + \overrightarrow{R_{54}} + \overrightarrow{G_5} = 0. \quad (2.15)$$

В уравнении (2.18) неизвестна по модулю и направлению сила $\overrightarrow{R_{54}}$. Так как, в уравнении (2.18) две неизвестные, то его можно решить, построив план сил. Используя построенный план сил по уравнению (2.17) определим силу R_{54} :

$$R_{54} = dk \cdot \mu_l = 251 \cdot 75 = 18825 \text{ Н}.$$

2.9 Силовой расчет группы звеньев 2-3

Рассмотрим первую в порядке присоединения группу Ассура 2-3. При этом учитывая, что $\overrightarrow{R_{24}} = -\overrightarrow{R_{42}}$. Запишем уравнение суммы моментов относительно точки С для звеньев 2 и 3:

Для звена 3:

Инв. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	Дата						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

$$\sum M(F_i) = F_{u_3} \cdot h_{u_3} \cdot \mu_l - G_3 \cdot h_3 \cdot \mu_l - M_{u_3} - R_{30}^\tau \cdot l_{DC} = 0.$$

Откуда определим R_{30}^τ :

$$R_{30}^\tau = \frac{F_{u_3} \cdot h_{u_3} \cdot \mu_l - G_3 \cdot h_3 \cdot \mu_l - M_{u_3}}{l_{DC}}, \quad (2.19)$$

$$R_{30}^\tau = \frac{1265,46 \cdot 50 \cdot 0,0025 - 137,2 \cdot 50 \cdot 0,0025 - 128,63}{0,25} = 283,57 \text{ Н}$$

Для звена 2:

$$\sum M(F_i) = F_{u_2} \cdot h_{u_2} \cdot \mu_l - G_2 \cdot h_2 \cdot \mu_l - R_{24} \cdot h_{24} \cdot \mu_l + R_{21}^\tau + l_{BC} = 0,$$

Откуда определим R_{21}^τ :

$$R_{21}^\tau = \frac{-F_{u_2} \cdot h_{u_2} \cdot \mu_l + G_2 \cdot h_2 \cdot \mu_l + R_{24} \cdot h_{24} \cdot \mu_l}{l_{BC}}, \quad (2.20)$$

$$R_{21}^\tau = \frac{-2265,65 \cdot 49 \cdot 0,0025 - 172,48 \cdot 52 \cdot 0,0025 - 128,63 - 23850 \cdot 22 \cdot 0,0025}{0,135} = 2693,77 \text{ Н.}$$

Запишем уравнение суммы сил для группы Ассуры 2-3:

$$\sum F_i = \overrightarrow{R_{30}^n} + \overrightarrow{R_{30}^\tau} + \overrightarrow{F_{u_3}} + \overrightarrow{G_3} + \overrightarrow{R_{24}} + \overrightarrow{F_{u_2}} + \overrightarrow{G_2} + \overrightarrow{R_{21}^\tau} + \overrightarrow{R_{21}^n} = 0. \quad (2.21)$$

В уравнении (2.21) неизвестны по модулю силы R_{30} и R_{21}^n , построим план сил, откуда и определим R_{30} и R_{21}^n .

Длину отрезка для реакции R_{24} примем равно $de = 159$ мм, тогда масштабный коэффициент плана сил будет равным:

$$\mu_F = \frac{R_{24}}{de} = \frac{23850}{159} = 150 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

Тогда отрезки соответствующих известных сил будут равны:

$$ab = \frac{R_{21}^\tau}{\mu_F} = \frac{2693,77}{150} = 18 \text{ мм},$$

$$bc = \frac{G_2}{\mu_F} = \frac{172,48}{150} = 1 \text{ мм},$$

$$cd = \frac{F_{u_2}}{\mu_F} = \frac{2265,65}{150} = 15 \text{ мм},$$

$$de = \frac{R_{24}}{\mu_F} = \frac{23850}{150} = 159 \text{ мм},$$

$$ef = \frac{F_{u_3}}{\mu_F} = \frac{1265,46}{150} = 8 \text{ мм},$$

$$fg = \frac{G_3}{\mu_F} = \frac{137,2}{150} = 1 \text{ мм},$$

$$gk = \frac{R_{30}^\tau}{\mu_F} = \frac{283,57}{150} = 2 \text{ мм}.$$

Инв. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дудл.	Подп.	Дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	37

Построив план сил, определяем:

$$R_{30}^n = ky \cdot \mu_F = 229 \cdot 150 = 34350 \text{ Н},$$

$$R_{30} = gy \cdot \mu_F = 229 \cdot 150 = 34350 \text{ Н},$$

$$R_{21}^n = ya \cdot \mu_F = 330 \cdot 150 = 49500 \text{ Н},$$

$$R_{21} = yb \cdot \mu_F = 330 \cdot 150 = 49500 \text{ Н}.$$

Рассмотрим звено 2 группы Ассуры 2-3, записав уравнение суммы сил:

$$\sum F_i = \overrightarrow{R_{21}} + \overrightarrow{F_{u_2}} + \overrightarrow{G_2} + \overrightarrow{R_{23}} = 0. \quad (2.22)$$

В уравнении (2.22) неизвестен модуль и направление силы R_{23} .

Определим, построив план сил.

$$R_{23} = ye \cdot \mu_F = 229 \cdot 150 = 34350 \text{ Н}.$$

Положение 5:

Для звена 3 получим сумму моментов:

$$\sum M(F_i) = -F_{u_3} \cdot h_{u_3} \cdot \mu_l - G_3 \cdot h_3 \cdot \mu_l + M_{u_3} + R_{30}^r \cdot l_{DC} = 0.$$

Откуда определим R_{30}^r :

$$R_{30}^r = \frac{F_{u_3} \cdot h_{u_3} \cdot \mu_l + G_3 \cdot h_3 \cdot \mu_l - M_{u_3}}{l_{DC}}, \quad (2.23)$$

$$R_{30}^r = \frac{357,84 \cdot 48 \cdot 0,0025 + 137,2 \cdot 26 \cdot 0,0025 - 30,59}{0,25} = 132,32 \text{ Н},$$

Для звена 2 получим сумму моментов:

$$\sum M(F_i) = -F_{u_2} \cdot h_{u_2} \cdot \mu_l - G_2 \cdot h_2 \cdot \mu_l + M_{u_2} + R_{21}^r \cdot l_{BC} - R_{24} \cdot h_{24} \cdot \mu_l = 0$$

Откуда определяем R_{21}^r :

$$R_{21}^r = \frac{F_{u_2} \cdot h_{u_2} \cdot \mu_l + G_2 \cdot h_2 \cdot \mu_l - M_{u_2} + R_{24} \cdot h_{24} \cdot \mu_l}{l_{BC}} =$$

$$\frac{1060,58 \cdot 27 \cdot 0,0025 + 172,48 \cdot 56 \cdot 0,0025 - 30,59 + 17925 \cdot 29 \cdot 0,0025}{0,135} = 3240,66 \text{ Н},$$

Запишем уравнение суммы сил для группы Ассура 2-3:

$$\sum F_i = \overrightarrow{R_{30}^n} + \overrightarrow{R_{30}^r} + \overrightarrow{F_{u_3}} + \overrightarrow{G_3} + \overrightarrow{R_{24}} + \overrightarrow{F_{u_2}} + \overrightarrow{G_2} + \overrightarrow{R_{21}^r} + \overrightarrow{R_{21}^n} = 0. \quad (2.25)$$

В уравнении (2.25) неизвестны по модулю силы R_{30} и R_{21}^n . Определим эти силы, построив план сил.

Инв. № подл.	Подп.	Дата	Взам. инв. №	Инв. № дудл.	Подп.	Дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							
											38

Длину отрезка для реакции R_{24} примем равной $de = 239$ мм, тогда масштабный коэффициент плана сил будет равным:

$$\mu_F = \frac{R_{24}}{de} = \frac{17925}{239} = 75 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

Тогда отрезки соответствующие известным силам будут равны:

$$ab = \frac{R_{21}^T}{\mu_F} = \frac{3240,66}{75} = 43 \text{ мм},$$

$$bc = \frac{G_2}{\mu_F} = \frac{172,48}{75} = 2 \text{ мм},$$

$$cd = \frac{F_{u2}}{\mu_F} = \frac{1060,58}{75} = 14 \text{ мм},$$

$$de = \frac{R_{24}}{\mu_F} = \frac{17925}{75} = 239 \text{ мм},$$

$$ef = \frac{F_{u3}}{\mu_F} = \frac{357,84}{75} = 5 \text{ мм},$$

$$fg = \frac{G_3}{\mu_F} = \frac{137,2}{75} = 2 \text{ мм},$$

$$gk = \frac{R_{30}^T}{\mu_F} = \frac{132,32}{75} = 2 \text{ мм}.$$

Построив план сил, определяем:

$$R_{30}^n = ky \cdot \mu_F = 226 \cdot 75 = 16950 \text{ Н},$$

$$R_{30} = gy \cdot \mu_F = 226 \cdot 75 = 16950 \text{ Н},$$

$$R_{21}^n = ya \cdot \mu_F = 101 \cdot 75 = 7575 \text{ Н},$$

$$R_{21} = yb \cdot \mu_F = 110 \cdot 75 = 8250 \text{ Н}.$$

Рассмотрим звено 2 группы Ассуры 2-3, записав уравнение суммы сил:

$$\sum F_i = \overrightarrow{R_{21}} + \overrightarrow{F_{u2}} + \overrightarrow{G_2} + \overrightarrow{R_{23}} = 0. \quad (2.26)$$

В уравнении (2.22) неизвестен модуль и направление силы R_{23} .

Определим, построив план сил.

$$R_{23} = ye \cdot \mu_F = 229 \cdot 75 = 17175 \text{ Н}.$$

2.10 Силовой расчёт ведущего первичного механизма

Рассмотрим ведущее звено. Составим уравнение суммы моментов относительно точки А:

Положение 0:

Инв. № подл.	Взам. инв. №	Инв. № дудл.	Подп.	Дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	39

$$\sum M(F_i) = R_{12} \cdot h_{12} \cdot \mu_l - M_{yp} = 0. \quad (2.27)$$

Выражаем уравновешивающий момент, подставляя значения, учитывая, что по модулю $R_{12} = -R_{21}$:

$$M_{yp} = R_{12} \cdot h_{12} \cdot \mu_l = 49500 \cdot 2,9 \cdot 0,0025 = 358,88 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Запишем уравнение суммы сил:

$$\sum F_i = \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{G_1} + \overrightarrow{R_{10}} = 0. \quad (2.28)$$

В уравнении (2.28) неизвестна по модулю и направлению сила R_{10} . Определим эту силу, построив план сил.

Длину отрезка для реакции R_{12} примем равной $ab = 330$ мм, тогда масштабный коэффициент плана сил будет равным:

$$\mu_F = \frac{R_{12}}{ab} = \frac{49500}{330} = 150 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

Тогда отрезки соответствующие известным силам будут равны:

$$ab = \frac{R_{12}}{\mu_F} = \frac{49500}{150} = 330 \text{ мм},$$

$$bc = \frac{G_1}{\mu_F} = \frac{519,4}{150} = 3 \text{ мм}.$$

Построив план сил, определяем:

$$R_{10} = ca \cdot \mu_F = 327 \cdot 150 = 49050 \text{ Н}.$$

Положение 5:

$$\sum M(F_i) = -R_{12} \cdot h_{12} \cdot \mu_l + M_{yp} = 0. \quad (2.29)$$

Определим уравновешивающий момент, подставляя известные величины:

$$M_{yp} = R_{12} \cdot h_{12} \cdot \mu_l = 8250 \cdot 45,9 \cdot 0,0025 = 946,69 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Запишем уравнение суммы сил:

$$\sum F_i = \overrightarrow{R_{12}} + \overrightarrow{G_1} + \overrightarrow{R_{10}} = 0. \quad (2.30)$$

В уравнении (2.30) неизвестна по модулю и направлению сила R_{10} . Определим эту силу, построив план сил.

Длину отрезка для реакции R_{12} примем равной $ab = 198$ мм, тогда масштабный коэффициент плана сил будет равным:

$$\mu_F = \frac{R_{12}}{ab} = \frac{8250}{198} = 250 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

Инв. № подл.	Подп.	дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
						40

Тогда отрезки соответствующие известным силам будут равны:

$$ab = \frac{R_{12}}{\mu_F} = \frac{8250}{250} = 198 \text{ мм},$$

$$bc = \frac{G_1}{\mu_F} = \frac{519,4}{250} = 2.$$

Построив план сил, определим R_{10} :

$$R_{10} = ca \cdot \mu_F = 196 \cdot 250 = 3750 \text{ Н}.$$

2.11 Определение уравнивающей силы с помощью рычага Жуковского

Выберем масштабный коэффициент для построения плана сил:

$$\mu_v = \frac{V_B}{2} = \frac{0,03809}{2} = 0,019045 \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{мм}},$$

Положение 0:

Соответствующие моменты сил инерции разложим на пары сил. Для момента M_{u_2} второго звена 2, для момента M_{u_3} для звена 3, для момента сил инерции M_{u_4} звена 4. Определим значения сил для каждого из звеньев:

$$F_{M_{u_2}} = \frac{M_{u_2}}{l_{BE}} = \frac{128,63}{0,53} = 242,7 \text{ Н},$$

$$F_{M_{u_3}} = \frac{M_{u_3}}{l_{DC}} = \frac{70,14}{0,25} = 280,56 \text{ Н},$$

$$F_{M_{u_4}} = \frac{M_{u_4}}{l_{EF}} = \frac{39,03}{0,52} = 75,06 \text{ Н}.$$

Определим сумму моментов сил на плане скоростей относительно полюса, получим:

$$\begin{aligned} \sum M(F_i) = & -F_{M_{yp}} \cdot p_v b + G_2 \cdot h_2 - F_{u_2} \cdot h_{u_2} + F_{M_{u_2}} \cdot be + G_3 \cdot h_3 - F_{u_3} \cdot \\ & h_{u_3} - F_{M_{u_3}} \cdot p_v c - G_4 \cdot h_4 + F_{u_4} \cdot h_{u_4} + F_{M_{u_4}} \cdot ef - G_5 \cdot p_v f + F_{u_5} \cdot p_v f - Q \cdot \\ & p_v f = 0. \end{aligned}$$

Определим уравнивающую силу $F_{M_{yp}}$:

$$F_{M_{yp}} = \frac{G_2 \cdot h_2 - F_{u_2} \cdot h_{u_2} + F_{M_{u_2}} \cdot be + G_3 \cdot h_3 - F_{u_3} \cdot h_{u_3} - F_{M_{u_3}} \cdot p_v c}{p_v b} +$$

					инерции M_{u_4} звена 4. Определим значения сил для каждого из звеньев:				
					$F_{M_{u_2}} = \frac{M_{u_2}}{l_{BE}} = \frac{128,63}{0,53} = 242,7 \text{ Н},$				
					$F_{M_{u_3}} = \frac{M_{u_3}}{l_{DC}} = \frac{70,14}{0,25} = 280,56 \text{ Н},$				
					$F_{M_{u_4}} = \frac{M_{u_4}}{l_{EF}} = \frac{39,03}{0,52} = 75,06 \text{ Н}.$				
					Определим сумму моментов сил на плане скоростей относительно полюса, получим:				
					$\sum M(F_i) = -F_{M_{yp}} \cdot p_v b + G_2 \cdot h_2 - F_{u_2} \cdot h_{u_2} + F_{M_{u_2}} \cdot be + G_3 \cdot h_3 - F_{u_3} \cdot h_{u_3} - F_{M_{u_3}} \cdot p_v c - G_4 \cdot h_4 + F_{u_4} \cdot h_{u_4} + F_{M_{u_4}} \cdot ef - G_5 \cdot p_v f + F_{u_5} \cdot p_v f - Q \cdot p_v f = 0.$				
					Определим уравновешивающую силу $F_{M_{yp}}$:				
					$F_{M_{yp}} = \frac{G_2 \cdot h_2 - F_{u_2} \cdot h_{u_2} + F_{M_{u_2}} \cdot be + G_3 \cdot h_3 - F_{u_3} \cdot h_{u_3} - F_{M_{u_3}} \cdot p_v c}{p_v b} +$				

$$\frac{-G_4 \cdot h_4 + F_{u4} \cdot h_{u4} + F_{Mu4} \cdot ef - G_5 \cdot p_{vf} + F_{u5} \cdot p_{vf} - Q \cdot p_{vf}}{p_{vb}} =$$

$$\frac{172,48 \cdot 50 - 2265,65 \cdot 47 + 242,7 \cdot 205 + 137,2 \cdot 0 - 1265,46 \cdot 0 - 280,56 \cdot 0}{170} +$$

$$\frac{-205,8 \cdot 23 + 4064,76 \cdot 22 + 75,06 \cdot 24 - 1029 \cdot 21 + 20611,5 \cdot 21 - 0 \cdot 21}{170} = 2644,81 \text{ Н.}$$

Уравновешивающий момент будет равен:

$$M_{yp} = F_{yp} \cdot l_{AB} = 2644,81 \cdot 0,135 = 357,05 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Положение 5:

Соответствующие моменты сил инерции разложим на пары сил. Для момента M_{u2} второго звена 2, для момента M_{u3} для звена 3, для момента сил инерции M_{u4} звена 4. Определим значения сил для каждого из звеньев:

$$F_{Mu2} = \frac{M_{u2}}{l_{BE}} = \frac{30,59}{0,53} = 57,72 \text{ Н,}$$

$$F_{Mu3} = \frac{M_{u3}}{l_{DC}} = \frac{18,78}{0,25} = 75,12 \text{ Н,}$$

$$F_{Mu4} = \frac{M_{u4}}{l_{EF}} = \frac{33,22}{0,52} = 63,88 \text{ Н.}$$

Определим сумму моментов сил на плане скоростей относительно полюса, получим:

$$\sum M(F_i) = F_{M_{yp}} \cdot p_{vb} + G_2 \cdot h_2 + F_{u2} \cdot h_{u2} - F_{Mu2} \cdot be + G_3 \cdot h_3 + F_{u3} \cdot h_{u3} + F_{Mu3} \cdot p_{vc} + G_4 \cdot h_4 + F_{u4} \cdot h_{u4} + F_{Mu4} \cdot ef + G_5 \cdot p_{vf} + F_{u5} \cdot p_{vf} - Q \cdot p_{vf} = 0.$$

Определим уравновешивающую силу $F_{M_{yp}}$:

$$F_{M_{yp}} =$$

$$\frac{G_2 \cdot h_2 + F_{u2} \cdot h_{u2} - F_{Mu2} \cdot be + G_3 \cdot h_3 + F_{u3} \cdot h_{u3} + F_{Mu3} \cdot p_{vc}}{p_{vb}} -$$

$$\frac{G_4 \cdot h_4 + F_{u4} \cdot h_{u4} + F_{Mu4} \cdot ef + G_5 \cdot p_{vf} + F_{u5} \cdot p_{vf} - Q \cdot p_{vf}}{p_{vb}} =$$

$$\frac{172,48 \cdot 10 + 1060,58 \cdot 66 - 57,72 \cdot 156 + 137,2 \cdot 25 + 357,84 \cdot 47 + 75,12 \cdot 98}{170} -$$

$$\frac{205,8 \cdot 71 + 805,35 \cdot 47 + 63,88 \cdot 68 + 1029 \cdot 71 + 3355,8 \cdot 71 - 23220 \cdot 71}{170} = 7000,96 \text{ Н.}$$

Уравновешивающий момент M_{yp} будет равен:

Подп.	дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп.	дата	Инв. № подл.						42

Задание 3 – Кинематический синтез и проектирование кулачковых механизмов с роликовым толкателем

Для одного и того же движения выполним синтез двух кулачковых механизмов с роликовым поступательно движущимся толкателем.

3.1 Таблица исходных данных

Таблица 3.3 – Исходные данные

Характеристика	Максимальных ход толкателя S_{max}	Фазовые углы кулачка			Допускаемые углы	
		Угол подъема $\varphi_{п}$	Угол опускания $\varphi_{о}$	Угол дальнего стояния $\varphi_{д.с.}$	Фаза подъём а γ_{min}	Фаза опуск ания γ_{min}
Значение	0.117	60°	60°	8°	22°	22°

Угол нижнего выстоя:

$$\varphi_{\text{H.B.}} = 360^\circ - \varphi_{\Pi} - \varphi_0 - \varphi_{\text{J.C.}} = 360^\circ - 60^\circ - 60^\circ - 8^\circ = 232^\circ.$$

3.2 Построение кинематических диаграмм графическим методом

Для рабочего угла поворота кулачка строим заданную диаграмму аналога ускорения толкателя $a = f(\varphi)$, задавая значение:

$$a_1 = 90 \text{ мм},$$

$$a_2 = 60 \text{ мм.}$$

По оси абсцисс откладываем фазовые углы кулачка. Масштабный коэффициент по оси φ будет равен:

$$\mu_{\varphi} = \frac{60^{\circ} + 60^{\circ} + 8^{\circ} \cdot \pi}{255,9 \cdot 180} = 0,008725 \frac{\text{рад.}}{\text{мм.}}$$

Для получения диаграммы аналога скорости толкателя $V(\varphi) = f(\varphi)$ диаграмму аналога ускорения $a = f(\varphi)$ интегрируем методом хорд.

Для этого:

- Разбиваем фазовые углы в пределах одного знака на равные интервалы: на участках подъёма φ_n по 8° и 9° . На участках опускания φ_o по 8° и 9° ;
- Назначаем полюсное расстояние $H_a = 50$ мм;
- Из середины каждого интервала проводим вертикальную линию до пересечения с графиком;
- Полученную точку горизонтально проецируем на ось ординат;
- Найденную на вертикальной оси точки соединяем с полюсом интегрирования;
- Полученные отрезки параллельно переносим на новый график в пределах своего интервала, соединяя последовательно конец предыдущего отрезка с началом следующего. В итоге получаем диаграмму аналога скорости толкателя $V = f(\varphi)$.

Для получения диаграммы перемещения толкателя $S = f(\varphi)$ диаграмму аналога скорости толкателя $V = f(\varphi)$ интегрируем методом хорд, проделывая те же действия. При этом полюсное расстояние принимаем равным $H_v = 114,6$ мм.

Для расчета масштабного коэффициента μ_S определяем на диаграмме $S = f(\varphi)$ максимальное значение $h_{max} = 45$ мм.

$$\mu_S = \frac{S_{max}}{h_{max}} = \frac{0,117 \text{ м}}{40 \text{ мм}} = 0,002925 \frac{\text{м}}{\text{мм}}.$$

Масштабные коэффициенты скорости, ускорения и их аналогов подсчитываем по формулам:

$$\mu_{\frac{dS}{dt}} = \frac{\mu_S}{\mu_\varphi \cdot H_v} = \frac{0,002925}{0,008725 \cdot 114,6} = 0,002925 \frac{\text{м}}{\text{мм}},$$

$$\mu_{\frac{d^2S}{dt^2}} = \frac{\mu_{\frac{dS}{dt}}}{\mu_\varphi \cdot H_a} = \frac{0,002925}{0,008725 \cdot 50} = 0,0067 \frac{\text{м}}{\text{мм}}.$$

Инв. № подл.	Подп.	Дата	Взам. инв. №	Инв. № дудл.	Подп.	Дата				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				45		

Таблица 3.4 – Перемещение толкателя

Перемещение на фазе подъёма									
Обоз.	разм.	0	1	2	3	4	5	6	7
S_i	мм	0	1.7	7.2	16	26,5	34	38,5	40
$h_i = \mu_s \cdot S_i \cdot 10^3$	мм	0	5	21	46,8	77,51	99,45	112,61	117

Перемещение на опускания									
Обоз.	разм.	8	9	10	11	12	13	14	15
S_i	мм	40	38,5	34	26,5	16	7.2	1.7	0
$h_i = \mu_s \cdot S_i \cdot 10^3$	мм	117	112,61	99,45	77,51	46,8	20,8	5,2	0

3.3 Синтез кулачкового механизма с роликовым толкателем

Определяем основные размеры кулачкового механизма с роликовым толкателем ($r_{0\min}$ – минимальный радиус кулачка и e – эксцентриситет) из условия обеспечения углов передачи движения при подъёме и опускании толкателя больших, чем допустимые заданные углы γ_n и $\gamma_{оп}$.

$$\text{Масштабный коэффициент } \mu_l = \frac{r_{0\min} \cdot \mu_s}{127,4} = \frac{196 \cdot 0,002925}{127,4} = 0,0045 \frac{\text{м}}{\text{мм}}$$

Для этого:

- Строим диаграмму зависимости перемещения толкателя от аналога скорости $S = f(\varphi)$. Основным требованием построения данной диаграммы является равенство масштабных коэффициентов по обеим осям $\mu_s = \mu_{\frac{ds}{dt}}$. По оси абсцисс откладываем значение V , а по оси ординат – S . Полученные точки пересечения соединяем плавной линией;

- К крайним точкам диаграммы проводим касательные под углами передачи движения γ_{\min} . Точку пересечения касательных обозначим буквой Р;

- Определяем минимальный радиус кулачка как расстояние от точки Р до начала координат диаграммы.

$$r_{0\min} = PA_0 \cdot \mu_S = 196 \cdot 0,002925 = 0,5733 \text{ м} = 573,3 \text{ мм};$$

- Эксцентриситет кулачкового механизма находим как кратчайшее расстояние между осью ординат и точкой пересечения касательных (отрезок АК).

$$e = 0.$$

Строим окружность радиусом r_0 . Разбиваем её на фазовые углы $\varphi_{\text{п}}, \varphi_0, \varphi_{\text{д.с.}}, \varphi_{\text{н.в.}}$ и углы, соответствующие положениям толкателя 0, 1, 2, 3...15 из центра окружности. От радиуса r_0 в точках пересечения откладываем отрезки h_i , равные перемещению толкателя в соответствующем положении. Соединяем концы полученных отрезков. Полученный профиль – теоретический профиль кулачка.

Определяем минимальный радиус кривизны полученного профиля в зоне наибольшей кривизны с учётом масштаба. Для этого в месте наибольшего закругления в близлежащих точках проведём две касательные к профилю, далее восстанавливая к ним перпендикуляры определим их точку пересечения. Найденная точка будет центром кривизны найденным графически, а расстояние до точки касания ранее проведённой прямой будет радиусом кривизны.

$$\rho_{\min} = 67 \cdot 0,0045 = 268 \text{ мм.}$$

Определяем радиус ролика из условия:

$$R_{\text{рол}} = 0,7 \cdot \rho_{\min} = 0,7 \cdot 268 = 187,6 \text{ мм,}$$

$$R_{\text{рол}} = 0,4 \cdot r_0 = 0,4 \cdot 573,3 = 229,32 \text{ мм.}$$

Принимает $R_{\text{рол}} = 80 \text{ мм.}$

$$\text{На чертеже } R'_{\text{рол}} = \frac{R_{\text{рол}}}{\mu_l} = \frac{0,08}{0,0045} \approx 17,7 \text{ мм}$$

Для каждого положения толкателя строим окружность радиусом $R_{\text{рол}}$ с центром на теоретическом профиле. Проводим внутреннюю кривую,

Подп.	дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп.	дата	Инв. № подл.					47
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата							

профилю, далее восстанавливая к ним перпендикуляры определим их точку пересечения. Найденная точка будет центром кривизны найденным графически, а расстояние до точки касания ранее проведённой прямой будет радиусом кривизны.

$$\rho_{min} = 67 \cdot 0,0045 = 268 \text{ мм.}$$

Определяем радиус ролика из условия:

$$R_{рол} = 0,7 \cdot \rho_{min} = 0,7 \cdot 268 = 187,6 \text{ мм,}$$
$$R_{рол} = 0,4 \cdot r_0 = 0,4 \cdot 573,3 = 229,32 \text{ мм.}$$

Принимает $R_{рол} = 80 \text{ мм.}$

На чертеже $R'_{рол} = \frac{R_{рол}}{\mu_l} = \frac{0.08}{0,0045} \approx 17,7 \text{ мм}$

Для каждого положения толкателя строим окружность радиусом $R_{рол}$ с центром на теоретическом профиле. Проводим внутреннюю кривую,

касательную ко всем окружностям $R_{\text{рол}}$. Полученный профиль –
практический профиль кулачка.

Инв. № подл.	Подп.	дата	Взам. инв. №	Инв. № дудл.	Подп.	дата
Инв. № подл.	Подп.	дата	Взам. инв. №	Инв. № дудл.	Подп.	дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
					48	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артоболевский И.И. ТММ / И.И. Артоболевский 1975. ТММ. Курсовое проектирование. Учебное пособие – М. ИНФРА-М. (БФ МАДИ).
2. Чмиль В.П. ТММ: учебно – методическое пособие / В.П. Чмиль – 3-е изд. стер – СПб: Лань.
3. Гузев Н.В. Методические указания к курсовому проектированию по ТММ: учебное пособие / Н.В. Гузев, А.Н. Авуза, В.Т. Гришакин.
4. Курсовое проектирование по ТММ. Методические указания / Карелина М. Ю. Черепнина Т.Ю. и др. МАДИ (ГТУ) – М. 2016 – 40 с.

Инв. № подл.	Подп.	дата		
Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп.	дата	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
				49