

## 2 КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ МЕХАНИЗМОВ

### 2.1 Кинематический анализ плоских рычажных механизмов

#### *Задачи и методы кинематического анализа механизмов*

Кинематический анализ механизмов изучает движение звеньев с геометрической точки зрения, то есть независимо от сил, вызывающих это движение.

Исходными данными являются: схема механизма, размеры звеньев и закон движения входного (начального) звена. Как правило, задается равномерное вращение входного (начального) звена.

#### *Задачи кинематического анализа:*

- определение положений звеньев и траекторий, описываемых точками механизма;
- определение скоростей точек и угловых скоростей звеньев;
- определение ускорений точек и угловых ускорений звеньев.

Движение механизма обычно повторяется, то есть наблюдается периодичность изменения положений, скоростей и ускорений. Поэтому кинематический анализ проводят для одного периода, который совпадает с одним оборотом начального звена.

Кинематический анализ механизма ведется по структурным группам (группам Ассура) в порядке, соответствующем их присоединения при образовании механизма.

Применяются три метода исследования: аналитический, графоаналитический (метод планов) и графический.

Для графического изображения длин звеньев, скоростей и ускорений пользуются масштабными коэффициентами  $\mu_l$ ,  $\mu_v$ ,  $\mu_a$ , которые показывают сколько единиц той или иной величины приходится на один миллиметр отрезка, изображающего эту величину. При выборе масштабных коэффициентов рекомендуется придерживаться соответствующих чертежных стандартов.

#### *Графоаналитический метод (метод планов)*

Задачей графоаналитического метода является построение планов положений, скоростей и ускорений механизма.

Графическое изображение взаимного расположения звеньев, соответствующее заданному значению обобщенной координаты, называется *планом механизма*.

Построение плана механизма начинают с выбора масштабного коэффициента  $\mu_l$  и изображения на чертеже неподвижных точек и направляющих. Затем изображают начальное звено в заданном положении. После этого определяют положения звеньев групп Ассура.

*Планом скоростей (ускорений)* называется графическое построение в виде пучка лучей – абсолютных скоростей (ускорений) точек звеньев меха-

низма и отрезков, соединяющих концы лучей, – относительных скоростей (ускорений) соответствующих точек в данном положении механизма.

Для построения планов скоростей и ускорений необходимо знать основные зависимости по определению величин скоростей и ускорений, направления их векторов и уметь составлять векторные уравнения для скоростей и ускорений для различных видов движения звеньев механизма.

Рассмотрим основные положения из курса теоретической механики.

1. Звено движется *поступательно* (рисунок 2.1).

При поступательном движении звена скорости и ускорения его точек имеют одинаковую величину и направление.

$$\bar{\vartheta}_A = \bar{\vartheta}_B = \bar{\vartheta}_C;$$

$$\bar{a}_A = \bar{a}_B = \bar{a}_C.$$

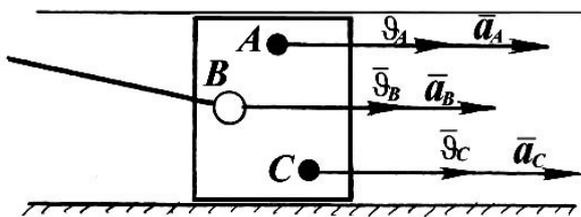


Рисунок 2.1 – Поступательное движение тела

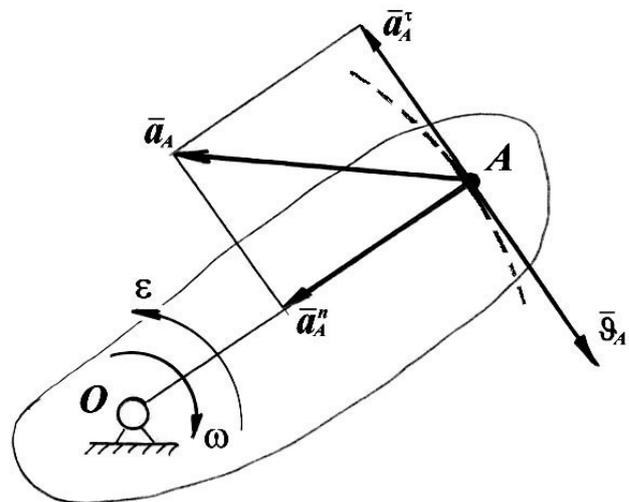


Рисунок 2.2 – Вращательное движение тела

2. Звено совершает *вращательное движение* вокруг неподвижной оси  $O$  (рисунок 2.2).

Линейная скорость точки  $A$

$$\vartheta_A = \omega l_{OA}.$$

Вектор скорости перпендикулярен радиусу и направлен в сторону движения (вращения) точки  $A$ .

Вектор ускорения точки  $A$  равен векторной сумме нормального  $\bar{a}_A^n$  и тангенциального  $\bar{a}_A^\tau$  ускорений

$$\bar{a}_A = \bar{a}_A^n + \bar{a}_A^\tau.$$

Величина нормального ускорения точки  $A$

$$a_A^n = \omega^2 l_{OA} = \frac{\mathfrak{G}_A^2}{l_{OA}}.$$

Вектор нормального ускорения всегда направлен по радиусу к центру вращения – от точки  $A$  к точке  $O$ .

Касательное ускорение точки  $A$

$$a_A^{\tau} = \varepsilon l_{OA}.$$

Вектор касательного ускорения перпендикулярен радиусу, и его направление определяется направлением углового ускорения  $\varepsilon$ .

По величине полное ускорение точки  $A$

$$a_A = l_{OA} \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}.$$

3. Две точки принадлежат одному звену, совершающему *сложное плоскопараллельное движение*, и удалены друг от друга на расстояние  $l_{AB}$  (рисунок 2.3).

Движение точки  $B$  можно представить состоящим из двух составляющих: из поступательного движения точки  $A$  и из вращательного движения точки  $B$  вокруг точки  $A$ . В соответствии с этим векторное уравнение, описывающее скорости обеих точек, имеет вид

$$\bar{\mathfrak{G}}_B = \bar{\mathfrak{G}}_A + \bar{\mathfrak{G}}_{BA},$$

где  $\bar{\mathfrak{G}}_B$  – вектор скорости точки  $B$ ;

$\bar{\mathfrak{G}}_A$  – вектор скорости точки  $A$ ;

$\bar{\mathfrak{G}}_{BA}$  – вектор скорости точки  $B$  в ее движении относительно точки  $A$ .

Точка  $B$  движется относительно точки  $A$  по дуге окружности, описанной из точки  $A$ , радиусом  $AB$ . Поэтому вектор скорости  $B$  относительно точки  $A$  –  $\bar{\mathfrak{G}}_{BA}$  направлен по касательной к этой дуге, то есть перпендикулярен линии  $AB$ , соединяющей эти точки.

Величина скорости  $\mathfrak{G}_{BA}$  и угловой скорости  $\omega$  звена  $AB$  взаимосвязаны зависимостью

$$\mathfrak{G}_{BA} = \omega l_{AB}.$$

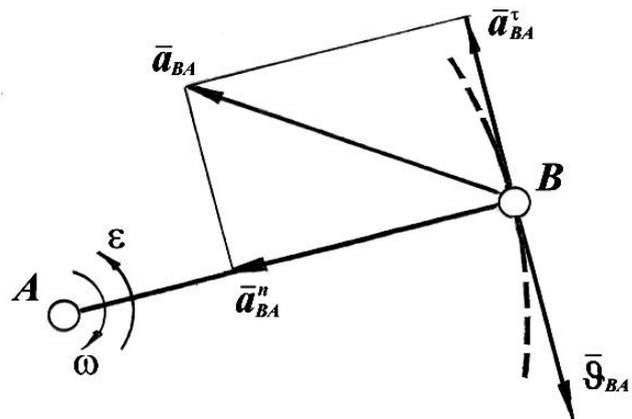


Рисунок 2.3 – Сложное плоскопараллельное движение тела

Зная величины  $\omega$  и  $l_{AB}$  можно определить по этой зависимости  $\vartheta_{BA}$ , и наоборот, если известно значение  $\vartheta_{BA}$ , то можно определить угловую скорость  $\omega$

$$\omega = \frac{\vartheta_{BA}}{l_{AB}}.$$

Направление  $\omega$  определяется в соответствии с направлением  $\overline{\vartheta}_{BA}$  и наоборот.

Ускорение точки  $B$  также состоит из двух ускорений

$$\overline{a}_B = \overline{a}_A + \overline{a}_{BA},$$

где  $\overline{a}_B$  – вектор ускорения точки  $B$ ;

$\overline{a}_A$  – вектор ускорения точки  $A$ ;

$\overline{a}_{BA}$  – вектор ускорения точки  $B$  относительно точки  $A$ .

Относительное ускорение  $\overline{a}_{BA}$  в свою очередь состоит из двух ускорений – нормального  $\overline{a}_{BA}^n$  и тангенциального  $\overline{a}_{BA}^\tau$

$$\overline{a}_{BA} = \overline{a}_{BA}^n + \overline{a}_{BA}^\tau.$$

На основании этого векторное уравнение для ускорения точки  $B$  имеет вид

$$\overline{a}_B = \overline{a}_A + \overline{a}_{BA}^n + \overline{a}_{BA}^\tau.$$

Нормальное ускорение  $\overline{a}_{BA}^n$  направлено от точки  $B$  к точке  $A$ , то есть к центру относительно вращения.

По величине

$$a_{BA}^n = \omega^2 l_{AB} = \frac{\vartheta_{BA}^2}{l_{AB}}.$$

Касательное ускорение  $\overline{a}_{BA}^\tau$  направлено по касательной к дуге, то есть перпендикулярно отрезку  $AB$ . Касательное ускорение  $\overline{a}_{BA}^\tau$  и угловое ускорение  $\varepsilon$  взаимосвязаны уравнением

$$a_{BA}^\tau = \varepsilon l_{AB}.$$

Если известно  $a_{BA}^\tau$ , то по этому уравнению можно определить угловое ускорение  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{a_{BA}^\tau}{l_{AB}}.$$

По направлению  $\bar{a}_{BA}^\tau$  можно определить направление  $\varepsilon$  и наоборот.

4. Две точки  $A_1$  и  $A_2$  принадлежат двум звеньям 1 и 2, соединенным в поступательную кинематическую пару, и в данный момент совпадают (рисунок 2.4).

Движение точки  $A_2$  состоит из двух движений: из переносного движения вместе с точкой  $A_1$  и движения относительно точки  $A_1$ . В соответствии с этим векторное уравнение движения точки  $A_2$  имеет вид

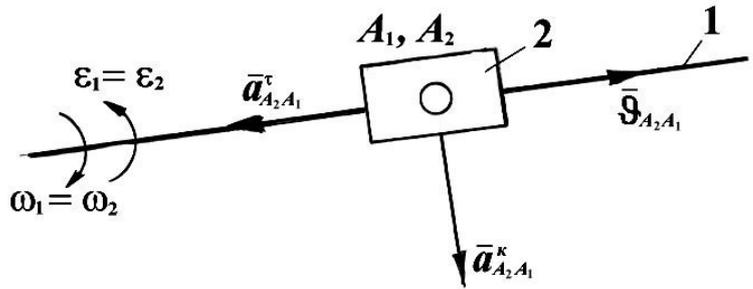


Рисунок 2.4 – Движение точки, принадлежащей двум подвижным звеньям

$$\bar{v}_{A_2} = \bar{v}_{A_1} + \bar{v}_{A_2, A_1},$$

где  $\bar{v}_{A_2}$  – вектор скорости точки  $A_2$ ;

$\bar{v}_{A_1}$  – вектор скорости точки  $A_1$ ;

$\bar{v}_{A_2, A_1}$  – вектор скорости точки  $A_2$  в ее движении относительно точки  $A_1$  (он направлен параллельно звену 1).

Ускорение точки  $A_2$ , как известно из теоретической механики, состоит из трех ускорений: ускорения точки  $A_1$ , поворотного (кориолисова) ускорения и ускорения относительно точки  $A_1$ . Векторное уравнение для ускорения точки  $A_2$  будет иметь вид

$$\bar{a}_{A_2} = \bar{a}_{A_1} + \bar{a}_{A_2, A_1}^k + \bar{a}_{A_2, A_1}^\tau.$$

Вектор касательного ускорения  $\bar{a}_{A_2, A_1}^\tau$  направлен параллельно звену 1.

Поворотное (кориолисово) ускорение, появляющееся в результате переносного (вращательного) и относительного движений, по величине:

$$a_{A_2, A_1}^k = 2\omega_1 v_{A_2, A_1}.$$

Вектор поворотного (кориолисова) ускорения  $\bar{a}_{A_2, A_1}^k$  направлен в ту сторону, куда окажется направленным вектор относительной скорости  $\bar{v}_{A_2, A_1}$ , если его повернуть на  $90^\circ$  по направлению угловой скорости  $\omega_1$ .

**Пример 1.** Построить планы скоростей и ускорений кривошипно-ползунного механизма (рисунок 2.5, а). Определить скорости и ускорения точек  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , угловую скорость и угловое ускорение шатуна 2, если известны:  $\angle \varphi_1 = 60^\circ$ ,  $l_{AB} = 0,03$  м,  $l_{BC} = 0,10$  м,  $l_{BD} = 0,03$  м, угловая скорость кривошипа  $AB$  постоянна и равна  $\omega_1 = 100$  с<sup>-1</sup>.

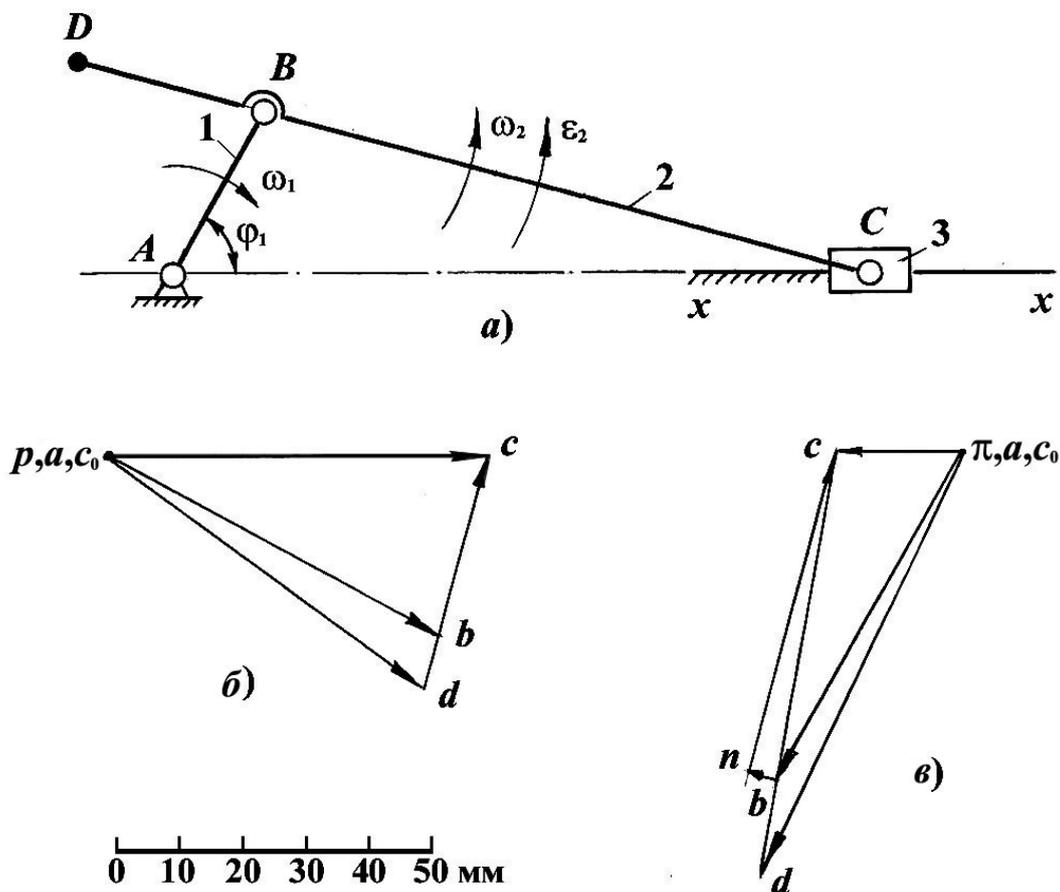


Рисунок 2.5 – Кинематический анализ кривошипно-ползунного механизма:  
а) кинематическая схема; б) план скоростей; в) план ускорений

*Решение.* Проводим структурный анализ и устанавливаем класс заданного механизма. Число подвижных звеньев  $n = 3$ , число кинематических пар  $V$  класса  $p_5 = 4$ . Число степеней свободы механизма:

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1.$$

Механизм образован присоединением к начальному звену  $AB$  группы Ассура второго класса второго вида, состоящей из звеньев 2, 3.

Строим план положения механизма (рисунок 2.5, а). Задаемся длиной отрезка  $AB = 30$  мм, вычисляем масштабный коэффициент схемы механизма

$$\mu_l = \frac{l_{AB}}{AB} = \frac{0,03}{30} = 0,001 \frac{\text{м}}{\text{мм}},$$

и по нему находим длины отрезков  $BC$  и  $BD$ :

$$BC = \frac{l_{BC}}{\mu_l} = \frac{0,10}{0,001} = 100 \text{ мм}; \quad BD = \frac{l_{BD}}{\mu_l} = \frac{0,03}{0,001} = 30 \text{ мм}.$$

По полученным размерам и заданному углу  $\varphi_1$ , на рисунке 2.5а строим план положения механизма.

Переходим к построению плана скоростей. Вначале определяем линейную скорость точки  $B$

$$\vartheta_B = \omega_1 l_{AB} = 100 \times 0,03 = 3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Выбираем масштабный коэффициент  $\mu_\vartheta = 0,05 \frac{\text{м} \cdot \text{с}^{-1}}{\text{мм}}$ . Тогда длина вектора ( $\overline{pb}$ )

$$(\overline{pb}) = \frac{\vartheta_B}{\mu_\vartheta} = \frac{3}{0,05} = 60 \text{ мм}.$$

Из полюса  $p$  плана скоростей проводим вектор скорости точки  $B$  ( $\overline{pb}$ ) перпендикулярно звену  $AB$ , направленный в сторону вращения звена 1 (рисунк 2.5, б).

Определим скорость точки  $C$ , принадлежащей группе Ассур 2, 3. Рассмотрим движение точки  $C$  относительно точки  $B$  и относительно точки  $C_0$ , принадлежащей неподвижному звену. Запишем векторные уравнения, которые решим графически

$$\begin{aligned} \overline{\vartheta}_C &= \overline{\vartheta}_B + \overline{\vartheta}_{CB}; \\ \overline{\vartheta}_C &= \overline{\vartheta}_{C_0} + \overline{\vartheta}_{CC_0}. \end{aligned}$$

Согласно первому уравнению через точку  $b$  на плане скоростей проводим прямую, перпендикулярную звену  $BC$ , а согласно второму – через полюс  $p$  (так как  $\vartheta_{C_0} = 0$ ) проводим прямую, параллельную направляющей  $x-x$ . Пересечение этих прямых определит положение точки  $c$ , изображающей конец векторов  $\overline{\vartheta}_C$  и  $\overline{\vartheta}_{CB}$ . Из плана скоростей имеем

$$\vartheta_C = \mu_\vartheta (pc) = 0,05 \times 60 = 3,0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$\vartheta_{CB} = \mu_\vartheta (bc) = 0,05 \times 30 = 1,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Скорость точки  $D$  определим по теореме подобия:

$$\frac{BC}{BD} = \frac{(bc)}{(bd)},$$

откуда

$$(bd) = \frac{BD}{BC}(bc) = \frac{30}{100} \times 30 = 9 \text{ мм.}$$

Из точки  $b$  плана скоростей на продолжении вектора  $(bc)$  откладываем рассчитанную длину  $(bd)$  и соединяем точку  $d$  с полюсом  $p$ .

Следовательно

$$\vartheta_D = \mu_\vartheta(pd) = 0,05 \times 63 = 3,15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Определяем угловую скорость звена 2

$$\omega_2 = \frac{\vartheta_{CB}}{l_{BC}} = \frac{1,5}{0,1} = 15 \text{ с}^{-1}.$$

Для определения направления угловой скорости звена 2 мысленно переносим вектор  $(\overline{bc})$  скорости точки  $C$  относительно  $B$  параллельно самому себе в точку  $C$  на схеме механизма и устанавливаем направление вращения звена  $BC$  относительно точки  $B$  под действием этого вектора. В рассматриваемом случае угловая скорость  $\omega_2$  направлена против вращения часовой стрелки. На звене  $BC$  показана круговой стрелкой.

Переходим к построению плана ускорений.

Вначале определяем ускорение точки  $B$ . При постоянной угловой скорости начального звена 1 точка  $B$  имеет только нормальное ускорение:

$$a_B = a_B^n = \omega_1^2 l_{AB} = 100^2 \times 0,03 = 300 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Ускорение точки  $B$  на плане ускорений (рисунок 2.5, в) изобразим вектором  $(\overline{\pi b}) = 60 \text{ мм}$ , который направлен по звену  $AB$  от точки  $B$  к точке  $A$ . Определим масштабный коэффициент плана ускорений:

$$\mu_a = \frac{a_B}{(\pi b)} = \frac{300}{60} = 5 \frac{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}}{\text{мм}}.$$

Для определения ускорения точки  $C$  составим два векторных уравнения, рассматривая движение точки  $C$  относительно точек  $B$  и  $C_0$  (точка  $C_0$  принадлежит неподвижному звену):

$$\overline{a}_C = \overline{a}_B + \overline{a}_{CB}^n + \overline{a}_{CB}^\tau;$$

$$\overline{a}_C = \overline{a}_{C_0} + \overline{a}_{CC_0}^k + \overline{a}_{CC_0}^\tau.$$

Ускорение точки  $C_0$  равно нулю и кориолисово ускорение  $\overline{a}_{CC_0}^k = 0$ , так как направляющая  $x - x$  неподвижна ( $\omega_0 = 0$ ).

В первом уравнении нормальное ускорение  $\bar{a}_{CB}^n$  направлено по шатуну  $BC$  от точки  $C$  к точке  $B$ . Величина ускорения:

$$a_{CB}^n = \omega_2^2 l_{BC} = 15^2 \times 0,1 = 22,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Тангенциальное ускорение  $\bar{a}_{CB}^\tau$  направлено перпендикулярно звену  $BC$ , а величина его определяется построением плана ускорений (при завершении построения).

В соответствии с первым уравнением на плане ускорений через точку  $b$  проводим прямую, параллельную звену  $BC$ , и откладываем на ней в направлении от точки  $C$  к точке  $B$  вектор  $(\overline{bn})$ , представляющий в масштабе  $\mu_a$  ускорение  $\bar{a}_{CB}^n$ :

$$bn = \frac{a_{CB}^n}{\mu_a} = \frac{22,5}{5} = 4,5 \text{ мм}.$$

Через точку  $n$  проводим прямую в направлении вектора тангенциального ускорения  $\bar{a}_{CB}^\tau$  перпендикулярно к звену  $BC$ . Затем через полюс  $\pi$  и совпадающую с ним точку  $c_0$  проводим прямую в направлении ускорения  $\bar{a}_{CC_0}^\tau$  параллельно направляющей  $x-x$ . Точка пересечения этих прямых определяет конец вектора полного ускорения точки  $C$ .

Величины ускорений определим умножая длины соответствующих векторов на масштабный коэффициент

$$a_C = \mu_a(\pi c) = 5 \times 20 = 100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

$$a_{CB}^\tau = \mu_a(nc) = 5 \times 54 = 270 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Ускорение точки  $D$  определим из пропорции:

$$\frac{BC}{BD} = \frac{(bc)}{(bd)},$$

откуда

$$(bd) = \frac{BD}{BC}(bc) = \frac{30}{100} \times 54 = 16,2 \text{ мм}.$$

Из точки  $b$  плана ускорений на продолжении вектора  $(bc)$  откладываем рассчитанную длину  $(bd)$  и соединяем точку  $d$  с полюсом  $p$ .

Из плана ускорений определим ускорение точки  $D$ :

$$a_D = \mu_a(pd) = 5 \times 76 = 380 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Величина углового ускорения звена 2

$$\varepsilon_2 = \frac{a_{CB}^\tau}{l_{CB}} = \frac{270}{0,1} = 2700 \text{ с}^{-2}.$$

Направление углового ускорения  $\varepsilon_2$  шатуна 2 определим, если мысленно перенесем вектор  $(\overline{nc})$  из плана ускорений в точку  $C$  звена  $BC$ . Под действием этого вектора звено  $BC$  будет вращаться вокруг точки  $B$  против часовой стрелки.

**Пример 2.** Построить планы скоростей и ускорений шарнирного четырехзвенного механизма (рисунок 2.6, а). Определить скорости и ускорения точек  $A$ ,  $B$  и  $D$ , угловые скорости и ускорения звеньев 2 и 3, если известны:  $\angle \varphi_1 = 30^\circ$ ,  $l_{OA} = 0,05$  м,  $l_{AB} = 0,11$  м,  $l_{BC} = 0,20$  м,  $l_{OC} = 0,19$  м,  $l_{BD} = l_{CD} = 0,11$  м, угловая скорость кривошипа  $OA$  постоянна и равна  $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}$ .

*Решение.* Проводим структурный анализ и устанавливаем класс заданного механизма. Число подвижных звеньев  $n = 3$ , число кинематических пар  $V$  класса  $p_5 = 4$ . Число степеней свободы механизма:

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1.$$

Механизм образован присоединением к начальному звену  $OA$  группы Ассур второго класса первого вида, состоящей из звеньев 2, 3.

Строим план положения механизма (рисунок 2.6, а). Задаемся длиной отрезка  $OA = 25$  мм, вычисляем масштабный коэффициент схемы механизма:

$$\mu_l = \frac{l_{OA}}{OA} = \frac{0,05}{25} = 0,002 \frac{\text{м}}{\text{мм}},$$

и по нему находим длины отрезков:

$$AB = \frac{l_{AB}}{\mu_l} = \frac{0,11}{0,002} = 55 \text{ мм}; \quad BC = \frac{l_{BC}}{\mu_l} = \frac{0,2}{0,002} = 100 \text{ мм};$$

$$OC = \frac{l_{OC}}{\mu_l} = \frac{0,19}{0,002} = 95 \text{ мм}; \quad BD = CD = \frac{l_{BD}}{\mu_l} = \frac{0,11}{0,002} = 55 \text{ мм}.$$

По полученным размерам и заданному углу  $\varphi_1$  строим план положения механизма.

Построение плана скоростей.

Вначале определяем линейную скорость точки  $A$ :

$$v_A = \omega_1 l_{OA} = 40 \times 0,05 = 2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

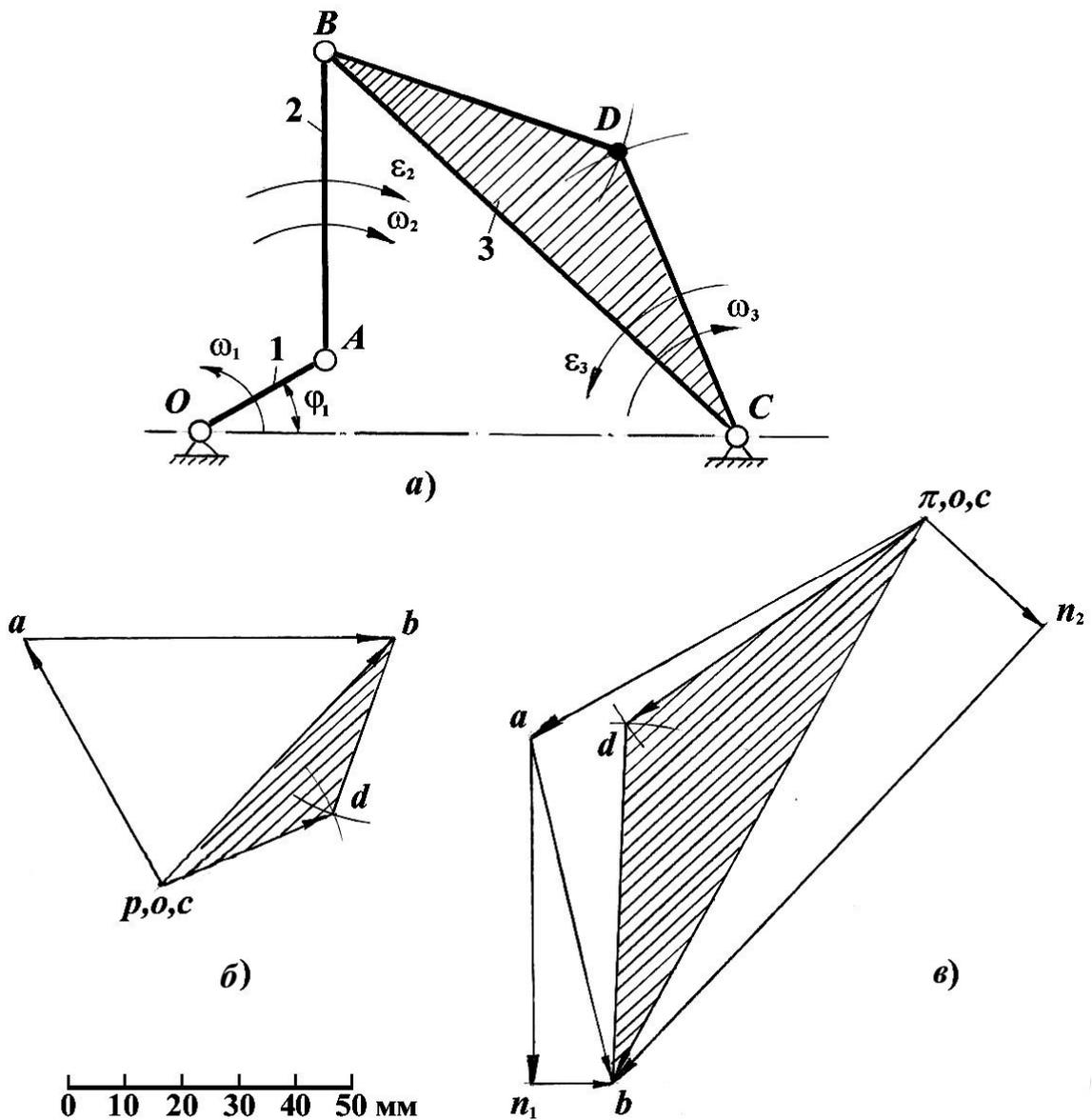


Рисунок 2.6 – Кинематический анализ шарнирного четырехзвенного механизма:  
 а) кинематическая схема; б) план скоростей; в) план ускорений

Выбираем масштабный коэффициент  $\mu_g = 0,04 \frac{\text{м} \cdot \text{с}^{-1}}{\text{мм}}$ . Тогда длина вектора  $(\overline{pa})$

$$(\overline{pa}) = \frac{g_A}{\mu_g} = \frac{2}{0,04} = 50 \text{ мм.}$$

Из  $p$  полюса плана скоростей проводим вектор скорости точки  $A$   $(\overline{pa})$  перпендикулярно звену  $OA$ , направленный в сторону вращения звена 1 (рисунок 2.6, б).

Определим скорость точки  $B$ , принадлежащей группе Ассур 2, 3. Рассмотрим движение точки  $B$  относительно точки  $A$  и относительно точки  $C$ :

$$\begin{aligned}\overline{\vartheta}_B &= \overline{\vartheta}_A + \overline{\vartheta}_{BA}; \\ \overline{\vartheta}_B &= \overline{\vartheta}_C + \overline{\vartheta}_{BC}.\end{aligned}$$

Согласно первому уравнению через точку  $a$  на плане скоростей проводим прямую, перпендикулярную звену  $AB$ , а согласно второму – через полюс  $p$  (так как  $\vartheta_C = 0$ ) проводим прямую, перпендикулярную звену  $BC$ . Пересечение этих прямых определит положение точки  $b$ , изображающей конец векторов  $\overline{\vartheta}_B$  и  $\overline{\vartheta}_{BA}$ . Из плана скоростей имеем

$$\vartheta_B = \mu_g(pb) = 0,04 \times 60 = 2,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\vartheta_{BA} = \mu_g(ab) = 0,04 \times 65 = 2,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Скорость точки  $D$  определим по правилу подобия: треугольник звена  $B CD$  должен быть подобен треугольнику  $bcd$  плана скоростей. Для этого составим пропорцию

$$\frac{BC}{BD} = \frac{(bc)}{(bd)},$$

откуда

$$(bd) = \frac{BD}{BC}(bc) = \frac{110}{200} \times 60 = 33 \text{ мм}.$$

Для определения положения точки  $d$  на плане скоростей из точек  $c$  (совпадающей с полюсом  $p$ ) и  $b$  проводим дуги радиусом 33 мм. В точке пересечения этих дуг будет находиться точка  $d$ . Соединив эту точку с полюсом  $p$ , получим вектор скорости точки  $D$ .

Величина скорости точки  $D$ :

$$\vartheta_D = \mu_g(pd) = 0,04 \times 33 = 1,32 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Определяем угловые скорости звеньев 2 и 3:

$$\omega_2 = \frac{\vartheta_{BA}}{l_{AB}} = \frac{2,6}{0,11} = 23,64 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_3 = \frac{\vartheta_{BC}}{l_{BC}} = \frac{2,4}{0,2} = 12,0 \text{ с}^{-1}.$$

Направления этих угловых скоростей определим с помощью векторов  $(\overline{ab})$  и  $(\overline{pb})$ . Если мысленно перенести вектор  $(\overline{ab})$  в точку  $B$  на схеме механизма, то под действием этого вектора звено 2 будет вращаться вокруг точки  $A$  по часовой стрелке. Вектор  $(\overline{pb})$ , перенесенный в точку  $B$  на схеме механизма, вращает звено 3 вокруг точки  $C$  также по часовой стрелке.

Построение плана ускорений начнем с определения ускорения точки  $A$ . При постоянной угловой скорости начального звена 1 точка  $A$  имеет только нормальное ускорение

$$a_A = a_A^n = \omega_1^2 l_{OA} = 40^2 \times 0,05 = 80 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Ускорение точки  $A$  на плане ускорений (рисунок 2.6, в) изобразим вектором  $(\pi a) = 80 \text{ мм}$ , который направлен по звену  $OA$  от точки  $A$  к точке  $O$ . Определим масштабный коэффициент плана ускорений:

$$\mu_a = \frac{a_A}{(\pi a)} = \frac{80}{80} = 1 \frac{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}}{\text{мм}}.$$

Для определения ускорения точки  $B$  составим два векторных уравнения, рассматривая движение точки  $B$  относительно точек  $A$  и  $C$ :

$$\begin{aligned} \bar{a}_B &= \bar{a}_A + \bar{a}_{BA}^n + \bar{a}_{BA}^\tau; \\ \bar{a}_B &= \bar{a}_C + \bar{a}_{BC}^n + \bar{a}_{BC}^\tau. \end{aligned}$$

В первом уравнении нормальное ускорение  $\bar{a}_{BA}^n$  направлено по шатуну  $AB$  от точки  $B$  к точке  $A$ . Его величина

$$a_{BA}^n = \omega_2^2 l_{AB} = 23,64^2 \times 0,11 = 61,47 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Из точки  $a$  на плане ускорений проводим вектор этого ускорения длиной

$$an_1 = \frac{a_{BA}^n}{\mu_a} = \frac{61,47}{1} = 61,47 \text{ мм} \approx 62 \text{ мм}.$$

Через точку  $n_1$  проводим прямую в направлении вектора тангенциального ускорения  $\bar{a}_{BA}^\tau$  перпендикулярно к звену  $AB$ .

Во втором уравнении нормальное ускорение  $\bar{a}_{BC}^n$  направлено по коромыслу  $BC$  от точки  $B$  к точке  $C$ . Величина этого ускорения

$$a_{BC}^n = \omega_3^2 l_{BC} = 12^2 \times 0,2 = 28,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Из точки  $\pi$  (точка  $c$  совпадает с полюсом  $\pi$ , так как  $a_c = 0$ ) на плане ускорений проводим вектор этого ускорения длиной

$$\pi n_2 = \frac{a_{BC}^n}{\mu_a} = \frac{28,8}{1} = 28,8 \text{ мм} \approx 29 \text{ мм}.$$

Через точку  $n_2$  проводим прямую в направлении вектора тангенциального ускорения  $\bar{a}_{BC}^\tau$  перпендикулярно к звену  $BC$ .

Точка пересечения тангенциальных ускорений определит положение точки  $b$  на плане ускорений. Для определения положения вектора абсолютного ускорения точки  $\bar{a}_B$  соединим точку  $b$  с полюсом  $\pi$ . Величина ускорения точки  $B$  определяется

$$a_B = \mu_a(\pi b) = 1 \times 116 = 116 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Величины тангенциальных ускорений

$$\begin{aligned} a_{BA}^\tau &= \mu_a(n_1 b) = 1 \times 15 = 15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}; \\ a_{BC}^\tau &= \mu_a(n_2 b) = 1 \times 112 = 112 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}. \end{aligned}$$

Ускорение точки  $D$  определим по правилу подобия треугольников  $BCD$  и  $bcd$

$$\frac{BC}{BD} = \frac{(bc)}{(bd)},$$

откуда

$$(bd) = \frac{BD}{BC}(bc) = \frac{110}{200} \times 116 = 63,8 \text{ мм} \approx 64 \text{ мм}.$$

Для определения положения точки  $d$  на плане ускорений из точек  $c$  (совпадающей с полюсом  $\pi$ ) и  $b$  проводим дуги радиусом 64 мм. В точке пересечения этих дуг будет находиться точка  $d$ . Соединив эту точку с полюсом  $\pi$ , получим вектор ускорения точки  $D$ .

Величина ускорения точки  $D$ :

$$a_D = \mu_a(\pi d) = 1 \times 63,8 = 63,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Определим величины угловых ускорений звеньев 2 и 3:

$$\varepsilon_2 = \frac{a_{BA}^\tau}{l_{AB}} = \frac{15}{0,11} = 136,36 \text{ с}^{-2};$$

$$\varepsilon_3 = \frac{a_{BC}^\tau}{l_{BC}} = \frac{112}{0,2} = 560 \text{ с}^{-2}.$$

Направление углового ускорения  $\varepsilon_2$  шатуна 2 определим, если мысленно перенесем вектор  $(\overline{n_1 b})$  из плана ускорений в точку  $B$  звена  $AB$ . Под действием этого вектора звено  $AB$  будет вращаться вокруг точки  $A$  по часовой стрелке.

Направление углового ускорения  $\varepsilon_3$  шатуна 3 определим, если мысленно перенесем вектор  $(\overline{n_2 b})$  из плана ускорений в точку  $B$  звена  $BC$ . Под действием этого вектора звено  $BC$  будет вращаться вокруг точки  $C$  против часовой стрелки.

**Пример 3.** Построить планы скоростей и ускорений рычажного механизма (рисунок 2.7, *a*). Определить скорости и ускорения точек  $B, D, E$ , угловые скорости и ускорения звеньев 3 и 4, если известны:  $\angle \varphi_1 = 20^\circ$ ,  $l_{AB} = 0,064$  м,  $l_{AC} = 0,11$  м,  $l_{CD} = 0,22$  м,  $l_{DE} = 0,18$  м, угловая скорость кривошипа  $AB$  постоянна и равна  $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}$ .

*Решение.* Проводим структурный анализ и устанавливаем класс механизма. Число подвижных звеньев  $n = 5$ , число кинематических пар  $V$  класса  $p_5 = 7$ . Число степеней свободы механизма

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

Механизм образован присоединением к начальному звену 1 группы Ассур второго класса третьего вида (звенья 2, 3) и последующим присоединением группы Ассур второго класса второго вида (звенья 4, 5).

Строим план положения механизма (рисунок 2.7, *a*). Задаемся длиной отрезка  $AB = 32$  мм, вычисляем масштабный коэффициент схемы механизма и по нему находим длины отрезков

$$\mu_l = \frac{l_{AB}}{AB} = \frac{0,064}{32} = 0,002 \frac{\text{м}}{\text{мм}},$$

$$AC = \frac{l_{AC}}{\mu_l} = \frac{0,11}{0,002} = 55 \text{ мм}; \quad CD = \frac{l_{CD}}{\mu_l} = \frac{0,22}{0,002} = 110 \text{ мм};$$

$$DE = \frac{l_{DE}}{\mu_l} = \frac{0,18}{0,002} = 90 \text{ мм}.$$

По полученным размерам и заданному углу  $\varphi_1$ , строим план положения механизма (рисунок 2.7, *a*).

Построение плана скоростей.

Вначале определим скорость точки  $B$ , принадлежащей звену 1, то есть

$$\mathfrak{V}_{B_1} = \omega_1 l_{AB} = 50 \times 0,064 = 3,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

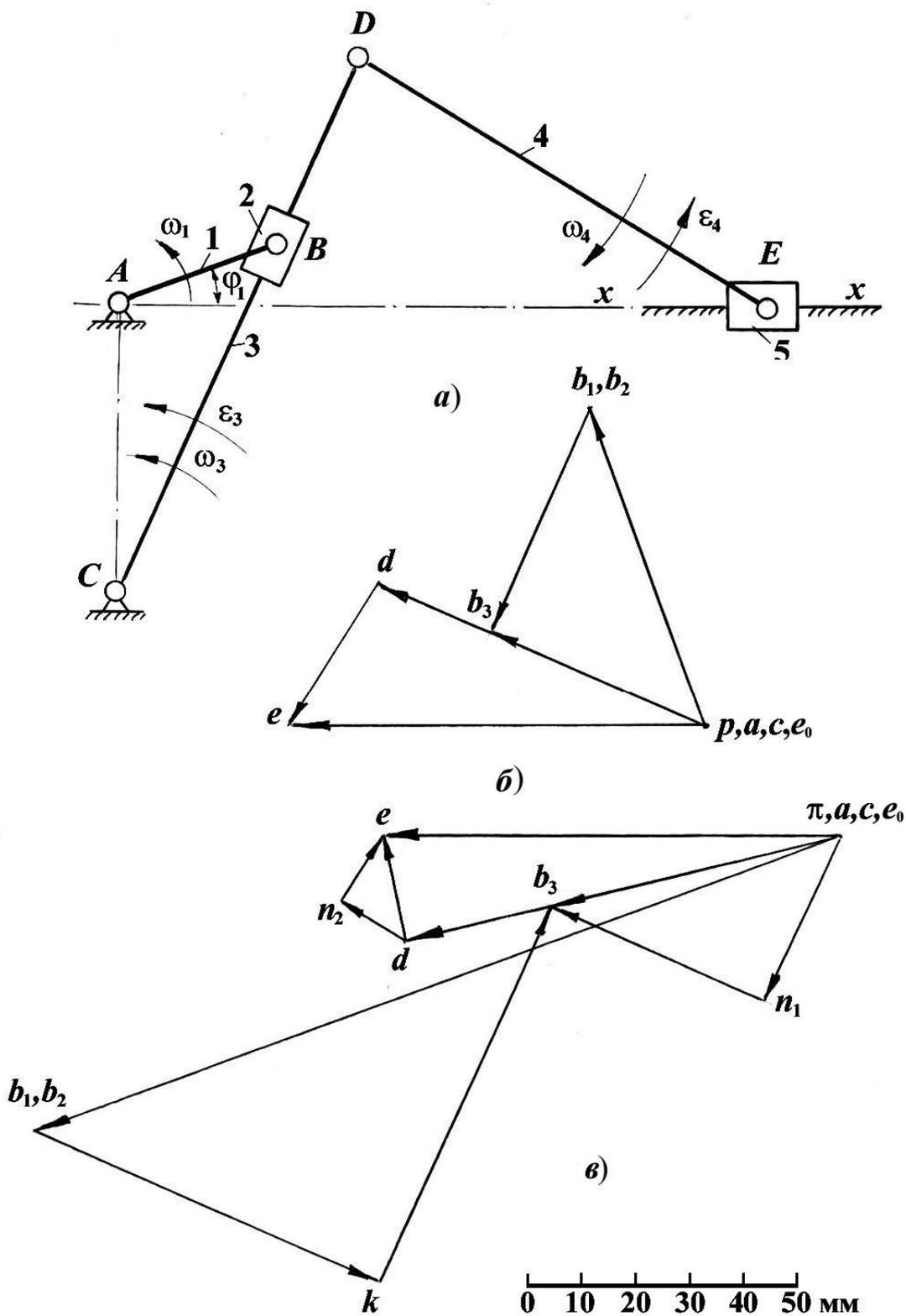


Рисунок 2.7 – Кинематический анализ рычажного механизма:  
 а) кинематическая схема; б) план скоростей; в) план ускорений

Скорость точки  $B$ , принадлежащей звену 2 будет равна скорости точки  $B_1$ , то есть

$$\vartheta_{B_1} = \vartheta_{B_2} = 3,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Выбираем масштабный коэффициент  $\mu_g = 0,05 \frac{\text{м} \cdot \text{с}^{-1}}{\text{мм}}$ . Тогда длина вектора ( $\overline{pb_1}$ ) будет равна

$$(\overline{pb_1}) = (\overline{pb_2}) = \frac{\vartheta_{B_1}}{\mu_g} = \frac{3,2}{0,05} = 64 \text{ мм.}$$

Из полюса плана скоростей  $p$  проводим вектор скорости точки  $B_1$  ( $\overline{pb_1}$ ) перпендикулярно звену  $AB$ , направленный в сторону вращения звена 1 (рисунок 2.7, б).

Определим скорость точки  $B$ , принадлежащей звену 3. Рассмотрим движение точки  $B_3$  относительно точки  $B_2$  и относительно точки  $C$  ( $\vartheta_C = 0$ ).

Запишем векторные уравнения, которые решим графически:

$$\overline{\vartheta}_{B_3} = \overline{\vartheta}_{B_2} + \overline{\vartheta}_{B_3B_2};$$

$$\overline{\vartheta}_{B_3} = \overline{\vartheta}_C + \overline{\vartheta}_{B_3C}.$$

В соответствии с первым уравнением через точку  $b_2$  на плане скоростей проводим прямую, параллельную линии  $BC$  звена 3 (направление  $\overline{\vartheta}_{B_3B_2}$ ). В соответствии со вторым уравнением через точку  $c$  на плане скоростей проводим прямую, перпендикулярную линии  $BC$  звена 3 (направление  $\overline{\vartheta}_{B_3C}$ ). Пересечение этих прямых определит положение точки  $b_3$ , изображающей конец векторов  $\overline{\vartheta}_{B_3}$  и  $\overline{\vartheta}_{B_3B_2}$ . Из плана скоростей имеем

$$\vartheta_{B_3} = \mu_g(\overline{pb_3}) = 0,05 \times 40 = 2,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\vartheta_{B_3B_2} = \mu_g(\overline{b_2b_3}) = 0,05 \times 46 = 2,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Скорость точки  $D$  определим по правилу подобия: точка  $d$  на плане скоростей будет находиться на продолжении отрезка ( $\overline{cb_3}$ ).

Составим пропорцию:

$$\frac{CD}{CB} = \frac{(cd)}{(bc)},$$

откуда

$$(cd) = \frac{CD}{CB}(bc) = \frac{110}{72} \times 44 = 67,22 \text{ мм} \approx 67 \text{ мм.}$$

Скорость точки  $D$

$$\vartheta_D = \mu_g(\overline{pd}) = 0,05 \times 67 = 3,35 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Определяем скорость точки  $E$ , принадлежащую группе Ассура, состоящей из звеньев 4, 5. Рассмотрим движение точки  $E$  относительно точки  $D$  и относительно  $E_0$ , принадлежащей неподвижному звену. Запишем векторные уравнения, которые решим графически

$$\begin{aligned}\overline{\mathfrak{V}}_E &= \overline{\mathfrak{V}}_D + \overline{\mathfrak{V}}_{ED}; \\ \overline{\mathfrak{V}}_E &= \overline{\mathfrak{V}}_{E_0} + \overline{\mathfrak{V}}_{EE_0}.\end{aligned}$$

Согласно первому уравнению через точку  $d$  на плане скоростей проводим прямую, перпендикулярную звену  $DE$ , а согласно второму – через полюс  $p$  (так как  $\mathfrak{V}_{E_0} = 0$ ) проводим прямую, параллельную направляющей  $x - x$ . Пересечение этих прямых определит положение точки  $e$ , изображающей конец векторов  $\overline{\mathfrak{V}}_E$  и  $\overline{\mathfrak{V}}_{ED}$ . Из плана скоростей имеем

$$\begin{aligned}\mathfrak{V}_E &= \mu_9(pe) = 0,05 \times 78 = 3,9 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \mathfrak{V}_{ED} &= \mu_9(de) = 0,05 \times 32 = 1,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.\end{aligned}$$

Определяем угловые скорости звеньев 3 и 4:

$$\omega_3 = \frac{\mathfrak{V}_{B_3C}}{l_{BC}} = \frac{\mathfrak{V}_{B_3C}}{(BC)\mu_l} = \frac{2,2}{72 \times 0,002} = 15,28 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_4 = \frac{\mathfrak{V}_{ED}}{l_{ED}} = \frac{1,6}{0,18} = 8,89 \text{ с}^{-1}.$$

Для определения направления угловой скорости звена 3 мысленно переносим вектор ( $\overline{cb_3}$ ) скорости точки  $B_3$  относительно  $C$  параллельно самому себе в точку  $B$  на схеме механизма и устанавливаем направление вращения звена  $BC$  относительно точки  $C$  под действием этого вектора. В рассматриваемом случае угловая скорость  $\omega_3$  направлена против вращения часовой стрелки. На звене  $BC$  показана круговой стрелкой.

Направление угловой скорости  $\omega_4$  звена  $DE$  определим с помощью вектора ( $\overline{de}$ ), мысленно перенесенного из плана скоростей параллельно самому себе в точку  $E$ . Под действием этого вектора звено 4 вращается относительно точки  $D$  по часовой стрелке.

Построение плана ускорений.

Вначале определяем ускорение точки  $B_1$ . При постоянной угловой скорости начального звена 1 точка  $B_1$  имеет только нормальное ускорение:

$$a_{B_1} = a_{B_1}^n = \omega_1^2 l_{AB} = 50^2 \times 0,064 = 160 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Ускорение точки  $B$ , принадлежащей звену 2 будет равно ускорению точки  $B_1$ , то есть

$$a_{B_2} = a_{B_1} = 160 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Ускорение точек  $B_1$  и  $B_2$  изобразим вектором  $(\overline{\pi b_1}) = (\overline{\pi b_2}) = 160 \text{ мм}$ , который направлен параллельно звену  $AB$  от точки  $B$  к точке  $A$  (рисунок 2.7, в). Определим масштабный коэффициент плана ускорений:

$$\mu_a = \frac{a_{B_1}}{(\pi b_1)} = \frac{160}{160} = 1 \frac{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}}{\text{мм}}.$$

Определим ускорение точки  $B_3$ , принадлежащей звену 3. Рассмотрим движения точки  $B_3$  относительно точки  $B_2$  и относительно точки  $C$  ( $a_C = 0$ , находится в полюсе  $\pi$ ) Запишем векторные уравнения:

$$\overline{a}_{B_3} = \overline{a}_{B_2} + \overline{a}_{B_3 B_2}^k + \overline{a}_{B_3 B_2}^r;$$

$$\overline{a}_{B_3} = \overline{a}_C + \overline{a}_{B_3 C}^n + \overline{a}_{B_3 C_0}^\tau.$$

В первом уравнении  $\overline{a}_{B_3 B_2}^k$  – кориолисово ускорение в движении точки  $B_3$  относительно звена 2, по модулю равно

$$a_{B_3 B_2}^k = 2\omega_2 \mathfrak{V}_{B_3 B_2} = 2 \times 15,28 \times 2,3 = 70,29 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

(так как  $\omega_2 = \omega_3$  и  $\omega_3 = 15,28 \text{ с}^{-1}$ ) и имеющего направление вектора относительной скорости  $\overline{\mathfrak{V}}_{B_3 B_2}$ , повернутого на  $90^\circ$  в направлении угловой скорости  $\omega_2$  переносного движения (движения звена 2). Из точки  $b_2$  плана ускорений проводим вектор  $(b_2 k)$  кориолисова ускорения длиной

$$b_2 k = \frac{a_{B_3 B_2}^k}{\mu_a} = \frac{70,29}{1} = 70,29 \text{ мм}.$$

Через точку  $k$  проводим прямую, параллельную звену 3 (направление  $\overline{a}_{B_3 B_2}^r$  – относительное (релятивное) ускорение точки  $B_3$  относительно точки  $B_2$ ).

Во втором уравнении  $\overline{a}_{B_3 C_0}^n$  – нормальное ускорение точки  $B_3$  во вращении звена 3 относительно точки  $C$ , по модулю равно

$$a_{B_3C}^n = \omega_3^2 l_{BC} = \omega_3^2 (BC) \mu_l = 15,28^2 \times 72 \times 0,002 = 33,62 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2},$$

и направленное параллельно линии  $CB_3$  от точки  $B_3$  к точке  $C$ .

Из точки  $c$  плана ускорений, совпадающей с полюсом  $\pi$ , проводим вектор ( $cn_1$ ) ускорения  $a_{B_3C}^n$  длиной

$$cn_1 = \frac{a_{B_3C}^n}{\mu_a} = \frac{33,62}{1} = 33,62 \text{ мм.}$$

Через точку  $n_1$  проводим линию, перпендикулярную к звену 3 (направление  $\bar{a}_{B_3C}^\tau$  – тангенциального ускорения точки  $B_3$  относительно точки  $C$ ), до пересечения с ранее проведенной через точку  $k$  линией, параллельной  $BC$ . Точка пересечения  $b_3$  представляет собой конец вектора ускорения  $\bar{a}_{B_3}$ . Его величина

$$a_{B_3} = \mu_a (\pi b_3) = 56 \times 1 = 56 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Конец вектора ускорения точки  $D$  найдем по правилу подобия из соотношения

$$\frac{CD}{cd} = \frac{CB}{cb},$$

откуда

$$(cd) = \frac{CD}{CB} (cb) = \frac{110}{72} \times 56 = 85,5 \text{ мм.}$$

Ускорение точки  $E$  определим, рассмотрев ее движение относительно точки  $D$  и  $E_0$ , принадлежащей неподвижному звену ( $\mathfrak{G}_{E_0} = 0$ ).

Запишем векторные уравнения:

$$\bar{a}_E = \bar{a}_D + \bar{a}_{ED}^n + \bar{a}_{ED}^\tau;$$

$$\bar{a}_E = \bar{a}_E + \bar{a}_{EE_0}^k + \bar{a}_{EE_0}^r.$$

В первом уравнении  $\bar{a}_{ED}^n$  – нормальное ускорение точки  $E$  во вращении звена 4 относительно точки  $D$  (оно направлено параллельно линии  $DE$  от точки  $E$  к точке  $D$ ). Его величина

$$a_{ED}^n = \omega_3^2 l_{DE} = 8,89^2 \times 0,18 = 14,25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Из точки  $d$  проводим вектор ( $\overline{dn_2}$ ) нормального ускорения точки  $E$  относительно  $D$  длиной

$$dn_2 = \frac{a_{ED}^n}{\mu_a} = \frac{14,25}{1} = 14,25 \text{ мм.}$$

Через точку  $n_2$  проводим линию, перпендикулярную к звену 4 (направление  $\overline{a_{ED}^\tau}$  – тангенциального ускорения точки  $E$  относительно точки  $D$ ).

Во втором уравнении  $\overline{a_{EE_0}^k}$  – кориолисово ускорение точки  $E$  в движении ее относительно стойки или  $E_0$ ; оно равно нулю, так как угловая скорость стойки равна нулю.

Относительное (релятивное) ускорение  $\overline{a_{EE_0}^r}$  точки  $E$  относительно стойки направлено параллельно линии  $x - x$ . Поэтому из точки  $\pi$  (так как  $\overline{a_{E_0}^r} = 0$ ) проводим прямую, параллельную оси  $x - x$  до пересечения с линией, ранее проведенной из точки  $n_2$ . Точка пересечения  $e$  является концом вектора ускорения точки  $E$ .

Из плана ускорений определяем ускорения:

$$a_E = \mu_a(\pi e) = 85 \times 1 = 85 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

$$a_{ED}^\tau = \mu_a(n_2 e) = 15 \times 1 = 15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Определяем угловые ускорения звеньев 3 и 4:

$$\varepsilon_3 = \frac{a_{B_3C}^\tau}{l_{BC}} = \frac{(n_1 b_3) \mu_a}{\mu_l BC} = \frac{43 \cdot 1}{0,002 \times 72} = 298,61 \text{ с}^{-2}.$$

$$\varepsilon_4 = \frac{a_{ED}^\tau}{l_{DE}} = \frac{15}{0,18} = 83,3 \text{ с}^{-2}.$$

Направление углового ускорения  $\varepsilon_3$  кулисы 3 определим, если перенесем вектор ( $\overline{n_1 b_3}$ ) из плана ускорений в точку  $B_3$  звена  $BC$ . Под действием этого вектора звено 3 будет вращаться вокруг точки  $C$  против вращения часовой стрелки.

Направление углового ускорения  $\varepsilon_4$  шатуна 4 определим, если перенесем вектор ( $\overline{n_2 e}$ ) из плана ускорений в точку  $E$  звена  $DE$ . Под действием этого вектора звено 4 будет вращаться вокруг точки  $D$  против часовой стрелки.

## Задачи 2.1.1–2.1.141

При решении данной группы задач необходимо:

- провести структурный анализ механизма;
- для заданного положения начального звена (угол  $\varphi_1$ ) вычертить в выбранном масштабе  $\mu_l \left( \frac{\text{м}}{\text{мм}} \right)$  кинематическую схему механизма.
- построить планы скоростей и ускорений, определить величины линейных скоростей и ускорений всех точек механизма, угловые скорости и ускорения звеньев (на схеме механизма круговыми стрелками показать их направления).

*Примечание.* В некоторых задачах размеры звеньев не обеспечивают полный оборот входного звена. Поэтому кинематический анализ необходимо провести только для указанного положения механизма.

### 2.1.1.

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,4 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_3 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 10 \text{ с}^{-1}.$

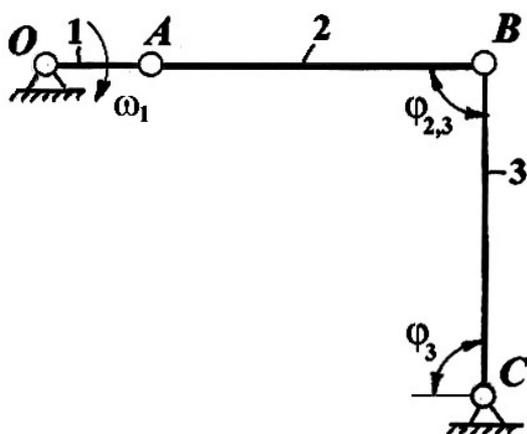


Рисунок 2.1.1

### 2.1.2.

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,4 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ; \angle \varphi_3 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

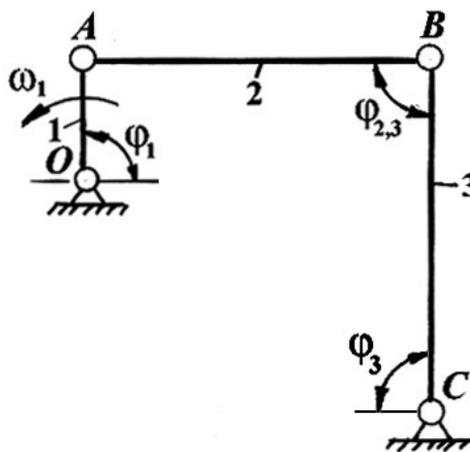


Рисунок 2.1.2

### 2.1.3.

$l_{OA} = 0,05 \text{ м}; l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = 0,08 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

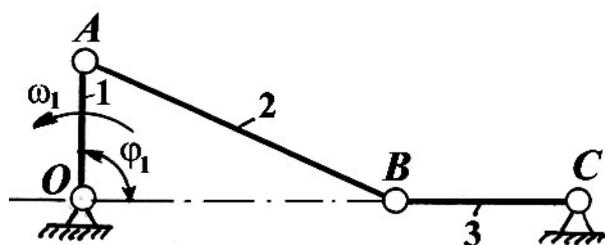


Рисунок 2.1.3

### 2.1.4.

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = 0,2 \text{ м}; l_{BC} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 25 \text{ с}^{-1}.$

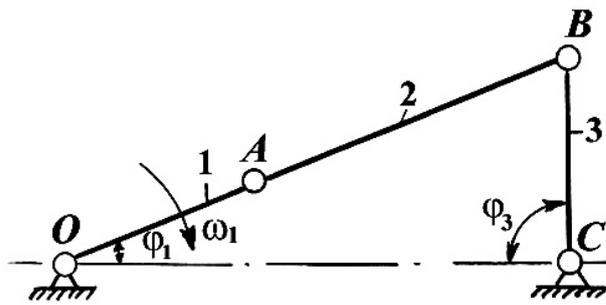


Рисунок 2.1.4

**2.1.5.**

$l_{OA} = 0,05 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 45^\circ; \angle \varphi_3 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

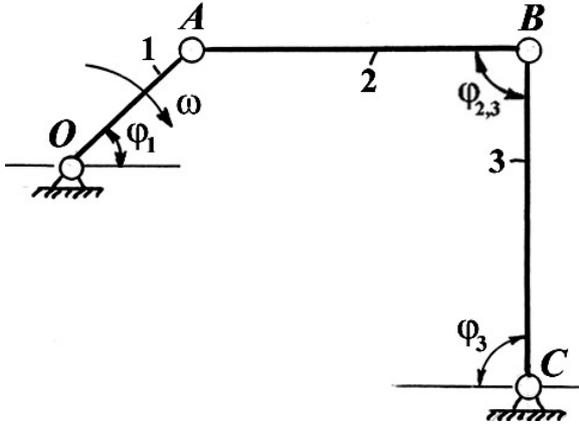


Рисунок 2.1.5

**2.1.6.**

$l_{OA} = l_{BC} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 25 \text{ с}^{-1}.$

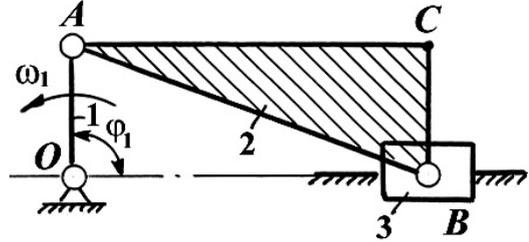


Рисунок 2.1.6

**2.1.7.**

$l_{OA} = 0,3 \text{ м}; l_{AB} = 0,8 \text{ м}; l_{BC} = 0,7 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_3 = 90^\circ; \angle \alpha = 30^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

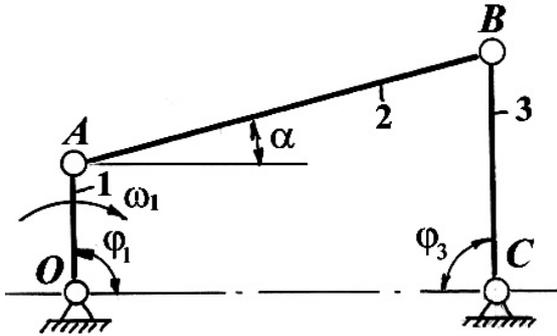


Рисунок 2.1.7

**2.1.8.**

$l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = 0,3 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ; \angle \alpha = 30^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

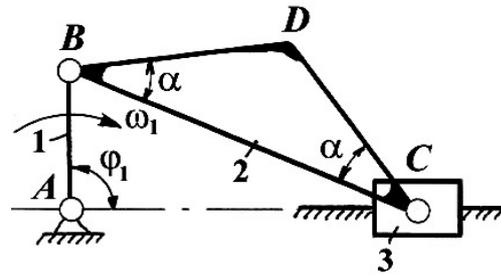


Рисунок 2.1.8

**2.1.9.**

$l_{OA} = l_{CD} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

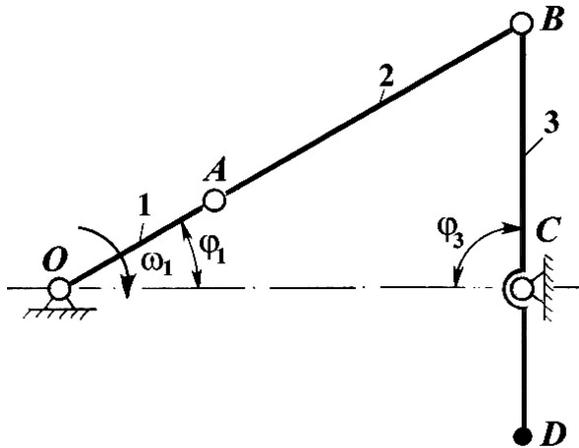


Рисунок 2.1.9

**2.1.10.**

$l_{OA} = l_{BD} = 0,04 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,1 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_3 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

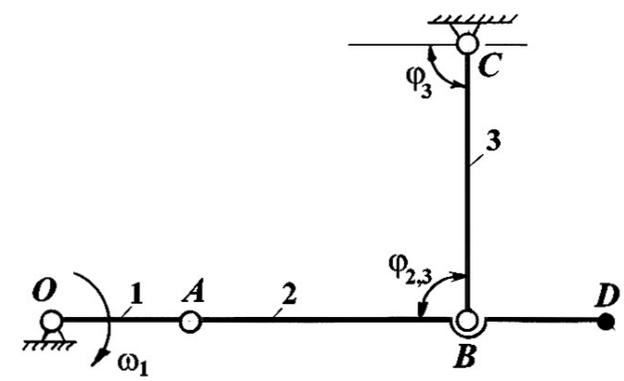


Рисунок 2.1.10

**2.1.11.**

$l_{AB} = l_{DE} = 0,05 \text{ м};$   
 $l_{BC} = 0,1 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ;$   
 $\angle \varphi_3 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 10 \text{ с}^{-1}.$

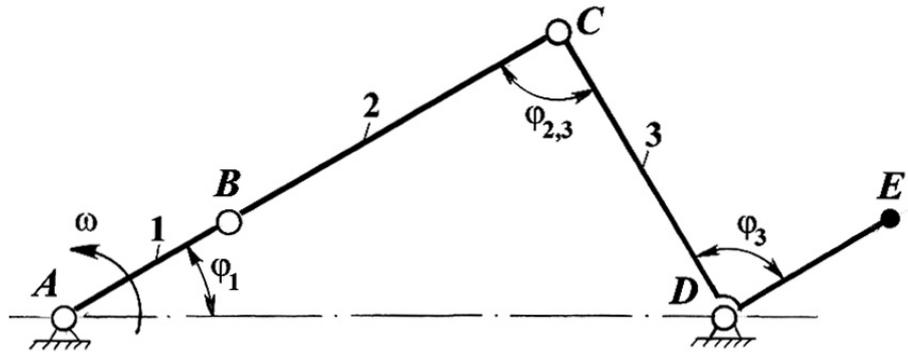


Рисунок 2.1.11

**2.1.12.**

$l_{AB} = 0,04 \text{ м}; l_{BC} = l_{CD} = 0,1 \text{ м};$   
 $l_{CK} = \frac{1}{2} l_{BC}; l_{CM} = \frac{1}{3} l_{CD};$   
 $\angle \varphi_2 = \angle \varphi_3 = 45^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

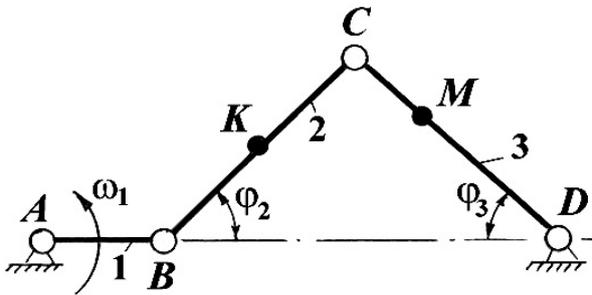


Рисунок 2.1.12

**2.1.13.**

$l_{OB} = l_{AB} = 0,05 \text{ м}; l_{AC} = 0,12 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

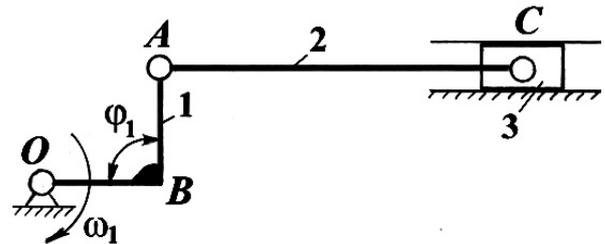


Рисунок 2.1.13

**2.1.14.**

$l_{OA} = l_{BM} = 0,04 \text{ м}; l_{OC} = 0,08 \text{ м};$   
 $l_{BC} = 0,06 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_2 = \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

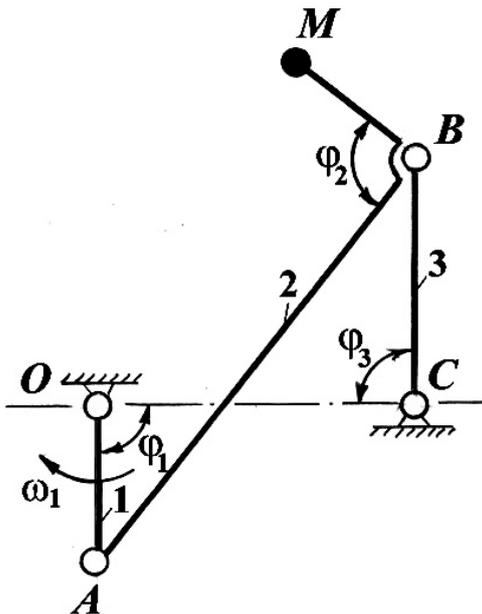


Рисунок 2.1.14

**2.1.15.**

$l_{OA} = l_{CD} = 0,05 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,1 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = \angle \varphi_{2,3} = \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\angle \beta = 30^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

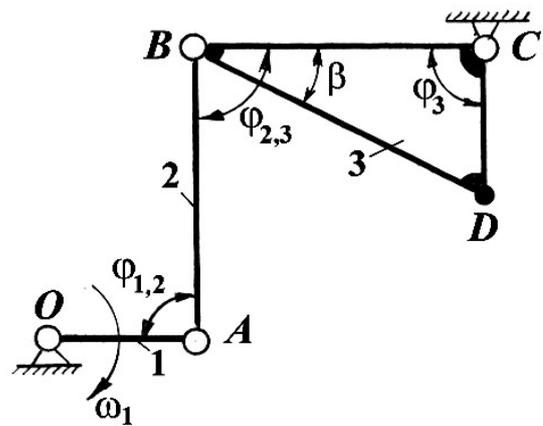


Рисунок 2.1.15

**2.1.16.**

$l_{AB} = l_{BM} = 0,03 \text{ м}; l_{BC} = 0,06 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 45^\circ; \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ;$   
 $\angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

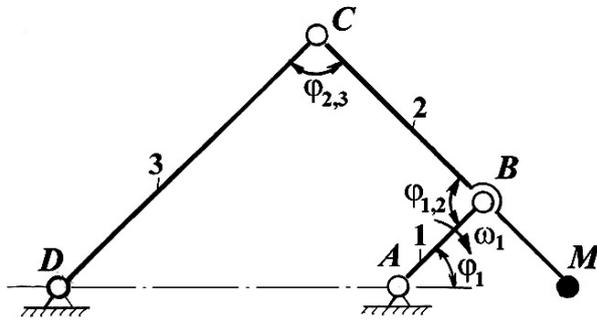


Рисунок 2.1.16

**2.1.17.**

$l_{OA} = l_{CK} = 0,25 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,5 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = \angle \varphi_{2,3} = \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

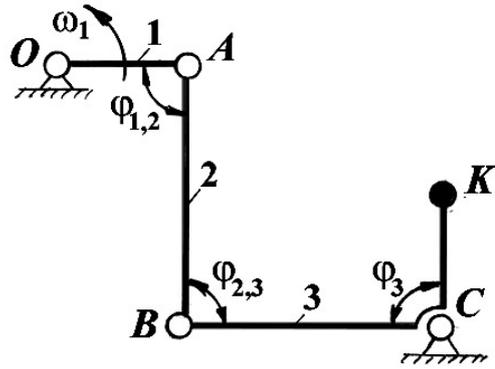


Рисунок 2.1.17

**2.1.18.**

$l_{AB} = l_{DM} = 0,03 \text{ м}; l_{BC} = 0,05 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = \angle \beta = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 60^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

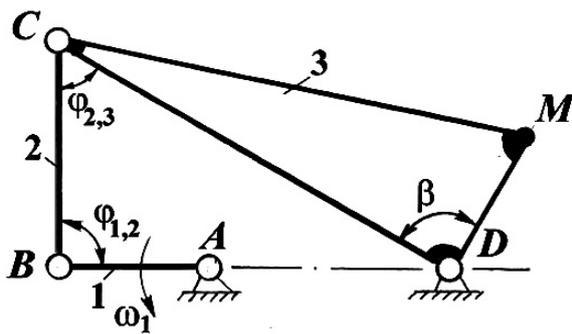


Рисунок 2.1.18

**2.1.19.**

$l_{OA} = 0,06 \text{ м}; l_{AB} = 0,25 \text{ м};$   
 $l_{BC} = l_{CD} = \frac{1}{3} l_{AB};$

$\angle \varphi_1 = 0^\circ, 110^\circ, 270^\circ; \angle \varphi_2 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 70 \text{ с}^{-1}.$

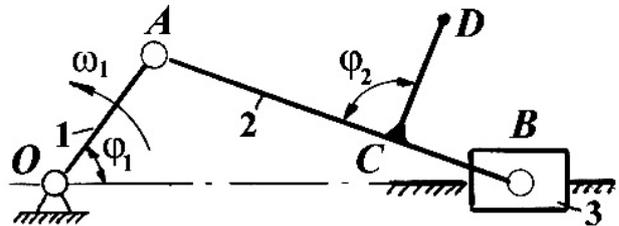


Рисунок 2.1.19

**2.1.20.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = 0,4 \text{ м}; l_{BC} = 0,15 \text{ м};$   
 $l_e = 0,02 \text{ м}; \angle \varphi_1 = 30^\circ, 120^\circ, 180^\circ;$   
 $\omega_1 = 25 \text{ с}^{-1}.$

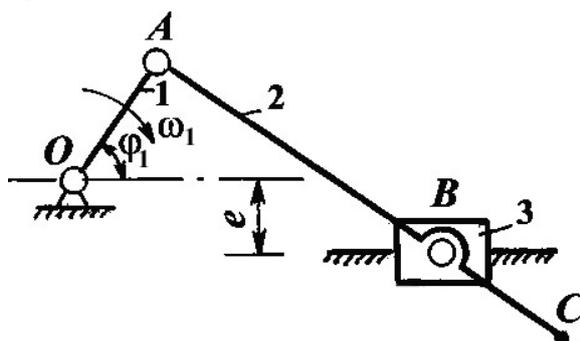


Рисунок 2.1.20

**2.1.21.**

$l_{OA} = 0,05 \text{ м}; l_{AB} = 0,2 \text{ м}; l_{BC} = 0,08 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 60^\circ, 90^\circ, 140^\circ, 300^\circ;$   
 $\angle \varphi_2 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 75 \text{ с}^{-1}.$

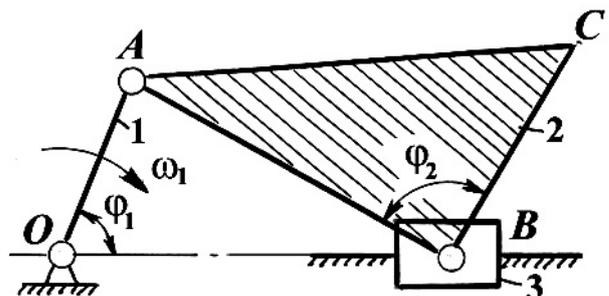


Рисунок 2.1.21

**2.1.22.**

$l_{OA} = 0,09 \text{ м}; l_{OB} = l_{AB} = 0,06 \text{ м};$

$l_{BC} = 0,28 \text{ м}; l_{BS_2} = \frac{1}{4} l_{BC};$

$\angle \varphi_1 = 20^\circ, 90^\circ, 180^\circ;$

$\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

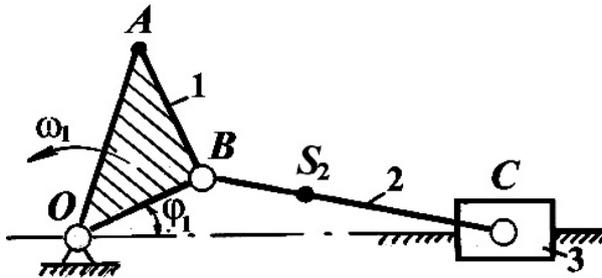


Рисунок 2.1.22

**2.1.23.**

$l_{OA} = 0,08 \text{ м}; l_{AB} = 0,31 \text{ м}; l_{BC} = 0,15 \text{ м};$

$l_{CD} = 0,06 \text{ м};$

$\angle \varphi_1 = 0^\circ, 60^\circ, 270^\circ; \angle \varphi_2 = 90^\circ;$

$\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

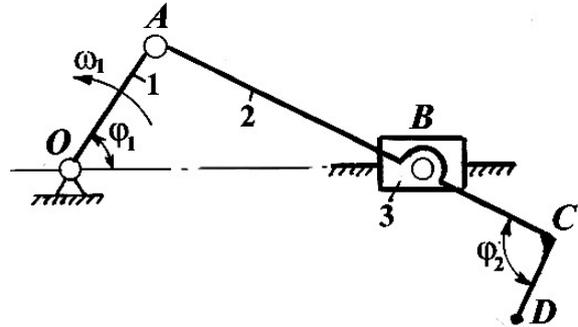


Рисунок 2.1.23

**2.1.24.**

$l_{OA} = 0,04 \text{ м}; l_{OB} = l_{AB} = 0,03 \text{ м};$

$l_{AC} = 0,23 \text{ м}; l_{AS_2} = \frac{1}{2} l_{AC};$

$\angle \varphi_1 = 60^\circ, 270^\circ, 340^\circ;$

$\omega_1 = 120 \text{ с}^{-1}.$

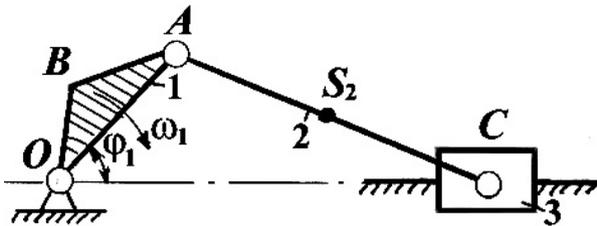


Рисунок 2.1.24

**2.1.25.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = 0,28 \text{ м}; l_{BC} = 0,15 \text{ м};$

$l_{CD} = l_{BD} = 0,18 \text{ м}; l_{OC} = 0,3 \text{ м};$

$l_{AS} = \frac{1}{2} l_{AB};$

$\angle \varphi_1 = 0^\circ, 60^\circ, 220^\circ;$

$\omega_1 = 30 \text{ с}^{-1}.$

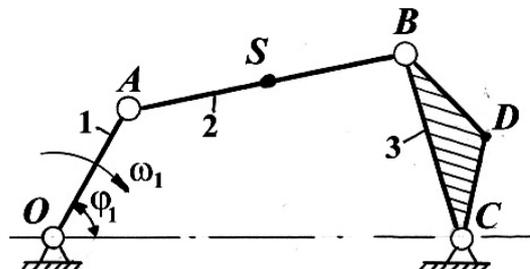


Рисунок 2.1.25

**2.1.26.**

$l_{OA} = 0,06 \text{ м}; l_{AB} = 0,18 \text{ м};$

$l_{AC} = 0,08 \text{ м}; l_e = 0,03 \text{ м};$

$\angle \varphi_1 = 45^\circ, 90^\circ, 120^\circ;$

$\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

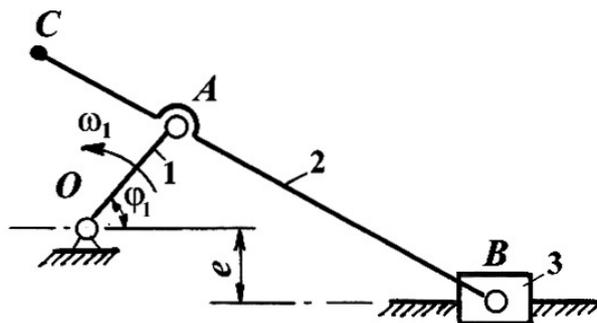


Рисунок 2.1.26

**2.1.27.**

$l_{OA} = 0,06 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,3 \text{ м};$

$l_{DE} = 0,1 \text{ м}; l_{CD} = \frac{1}{2} l_{BC};$

$l_{X_C} = 0,23 \text{ м}; l_{Y_C} = 0,28 \text{ м};$

$\angle \varphi_1 = 45^\circ, 90^\circ, 320^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ,$

$\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

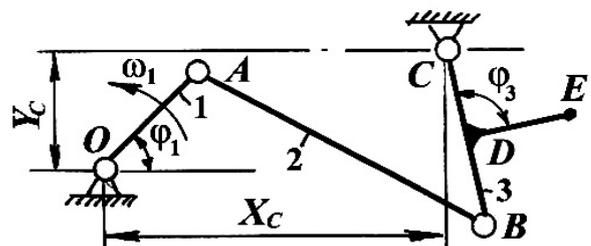


Рисунок 2.1.27

**2.1.28.**

$l_{OA} = 0,09 \text{ м}; l_{AB} = 0,28 \text{ м}; l_{AE} = 0,075 \text{ м};$   
 $l_{BC} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 60^\circ, 140^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

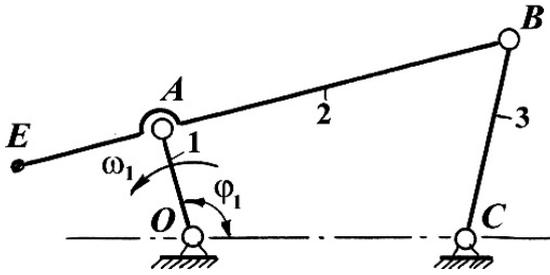


Рисунок 2.1.28

**2.1.29.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = 4 \cdot l_{OA}; l_Y = l_{AB} - l_{OA};$   
 $l_{AC} = 1,5l_{OA}; l_{DC} = 0,5l_{OA};$   
 $\angle \varphi_1 = 120^\circ; \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

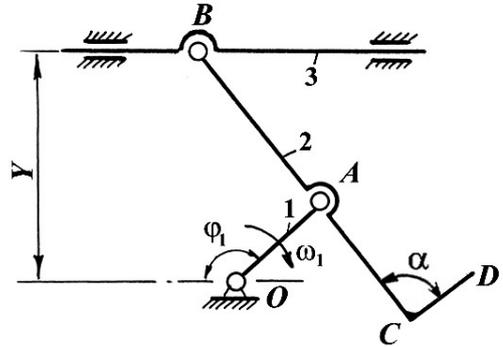


Рисунок 2.1.29

**2.1.30.**

$l_{O_1A} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = 0,2 \text{ м}; l_{BO_2} = 0,5 \text{ м};$   
 $l_{AD} = l_{DC} = 0,05 \text{ м}; l_{O_1O_2} = 0,55 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ; \angle \varphi_2 = 90^\circ,$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

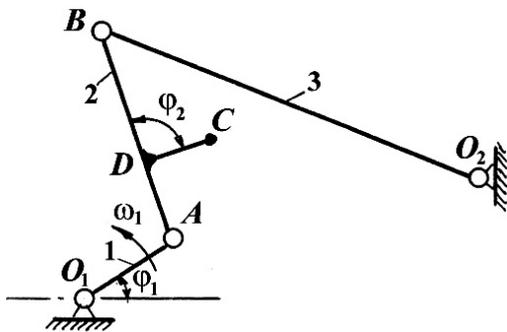


Рисунок 2.1.30

**2.1.31.**

$l_{OA} = 0,05 \text{ м}; l_{BC} = 0,07 \text{ м};$   
 $l_{AB} = l_{AD} = 0,13 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ; \angle \varphi_2 = 120^\circ;$   
 $\omega_1 = 30 \text{ с}^{-1}.$

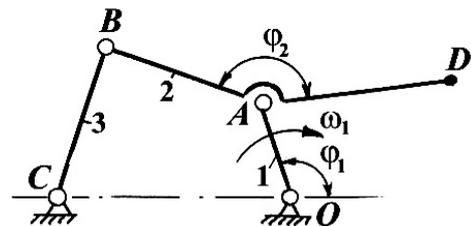


Рисунок 2.1.31

**2.1.32.**

$l_{O_1A} = 0,06 \text{ м}; l_{AB} = 0,24 \text{ м};$   
 $l_{BO_2} = 0,12 \text{ м}; l_{O_2D} = 0,06 \text{ м};$   
 $l_{DC} = 0,03 \text{ м}; l_{O_1O_2} = 0,072 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ; \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

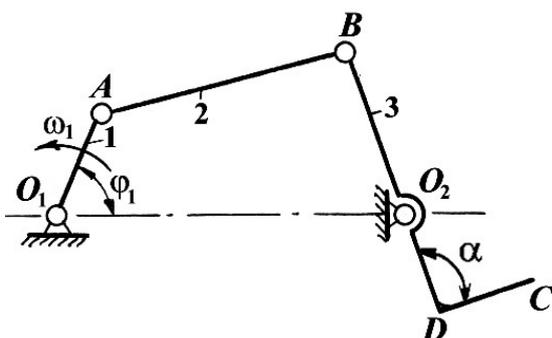


Рисунок 2.1.32

**2.1.33.**

$l_{OA} = 0,02 \text{ м}; l_{OC} = 0,03 \text{ м}; l_{BC} = 0,06 \text{ м};$   
 $l_{AB} = 0,06 \text{ м}; l_{BE} = 0,015 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 30^\circ, 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 25 \text{ с}^{-1}.$

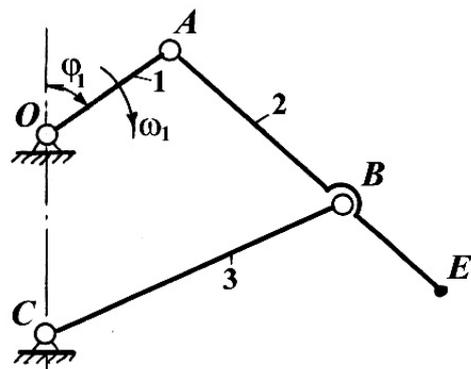


Рисунок 2.1.33

**2.1.34.**

$l_{OA} = l_{OC} = 0,08 \text{ м}; l_{AB} = l_{CD} = 0,32 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 90^\circ, 110^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

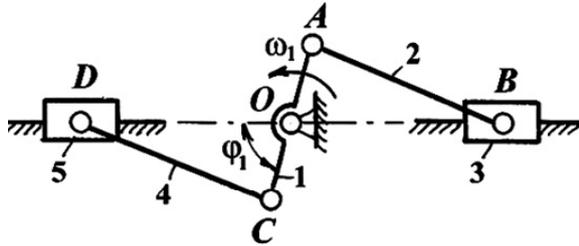


Рисунок 2.1.34

**2.1.35.**

$l_{OA} = 0,09 \text{ м}; l_{AB} = l_{BD} = 0,24 \text{ м};$   
 $l_{BC} = 0,14 \text{ м}; l_{OC} = 0,22 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 45^\circ, 120^\circ; \angle \varphi_2 = 240^\circ;$   
 $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}.$

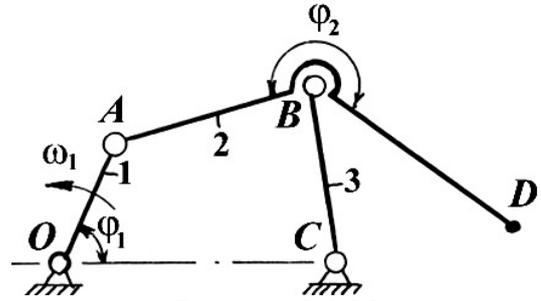


Рисунок 2.1.35

**2.1.36.**

$l_{OA} = l_{CM} = 0,05 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,12 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 120^\circ;$   
 $\angle \varphi_3 = 30^\circ; \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

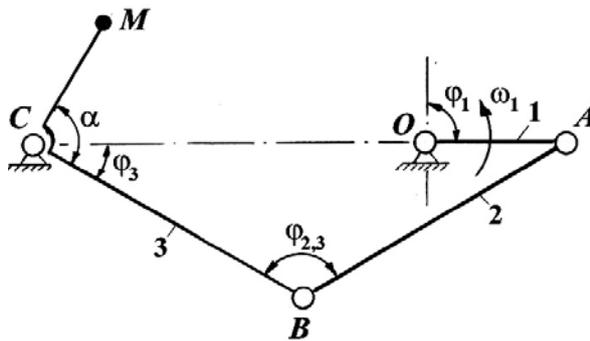


Рисунок 2.1.36

**2.1.37.**

$l_{AB} = l_{DE} = 0,08 \text{ м}; l_{CB} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{2,3} = 30^\circ; \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

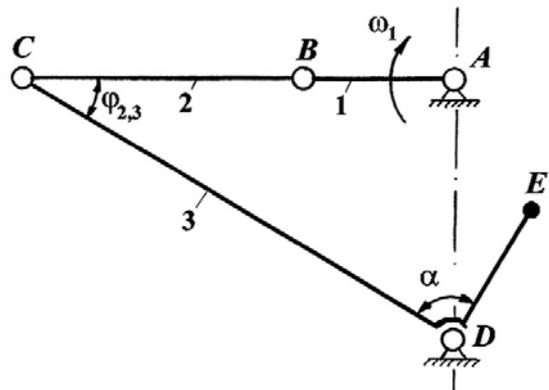


Рисунок 2.1.37

**2.1.38.**

$l_{AB} = l_{CK} = 0,06 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 60^\circ;$   
 $\omega_1 = 80 \text{ с}^{-1}.$

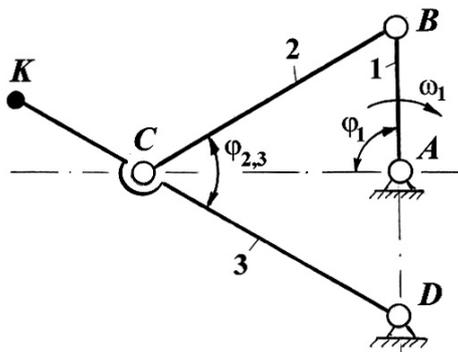


Рисунок 2.1.38

**2.1.39.**

$l_{AB} = l_{CM} = 0,06 \text{ м}; l_{BC} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 30^\circ; \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 80 \text{ с}^{-1}.$

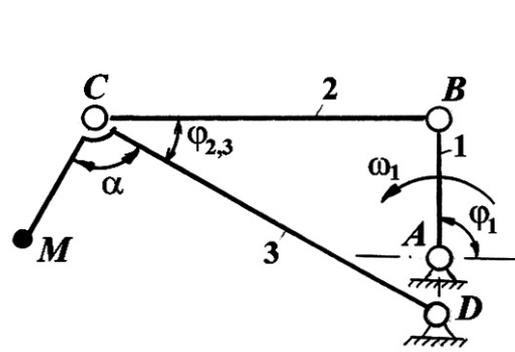


Рисунок 2.1.39

**2.1.40.**

$l_{AB} = l_{AD} = l_{BE} = 0,05 \text{ м}; l_{BC} = 0,12 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

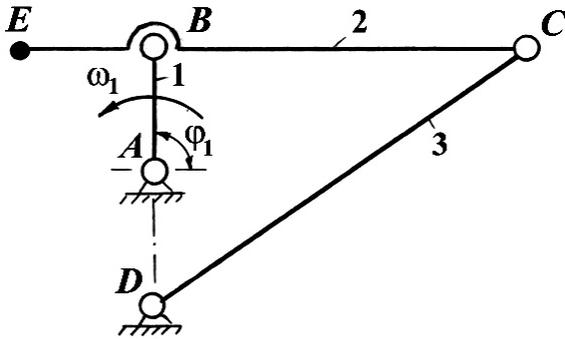


Рисунок 2.1.40

**2.1.41.**

$l_{AB} = 0,04 \text{ м}; l_{BC} = l_{DE} = 0,12 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,02 \text{ м};$   
 $\angle \alpha = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

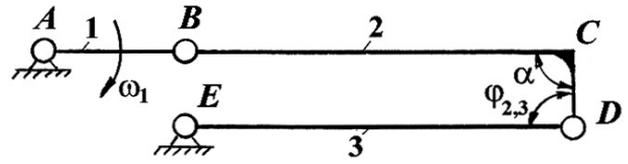


Рисунок 2.1.41

**2.1.42.**

$l_{AB} = 0,06 \text{ м}; l_{BC} = 0,12 \text{ м};$   
 $l_{CE} = l_{DE} = l_{EF} = \frac{1}{2} l_{CD};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ; \angle \varphi_{1,2} = 120^\circ;$   
 $\angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

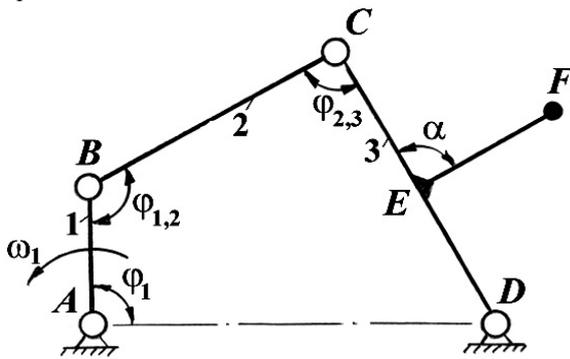


Рисунок 2.1.42

**2.1.43.**

$l_{AB} = l_{CD} = 0,05 \text{ м}; l_{BC} = l_{DE} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \beta = \angle \varphi_3 = 30^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

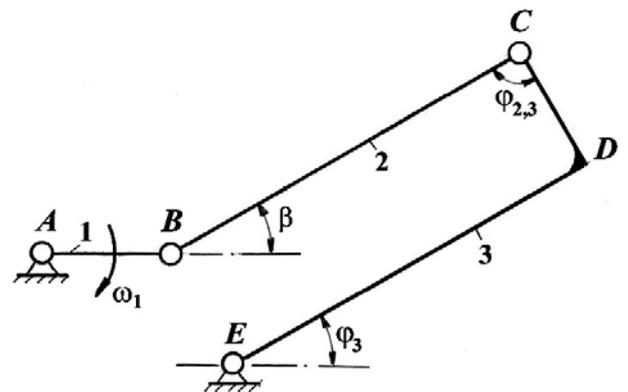


Рисунок 2.1.43

**2.1.44.**

$l_{AB} = l_{BM} = 0,04 \text{ м}; l_{BC} = 0,14 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 30^\circ; \angle \beta = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

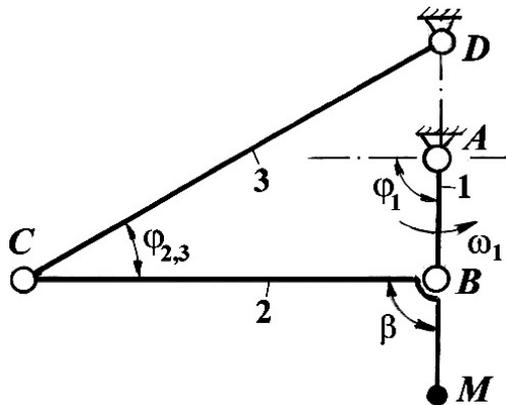


Рисунок 2.1.44

**2.1.45.**

$l_{AB} = l_{CK} = 0,08 \text{ м}; l_{BC} = 0,2 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,18 \text{ м}; \angle \varphi_1 = \angle \varphi_{1,2} = 30^\circ;$   
 $\angle \varphi_{2,3} = \angle \varphi_3 = 90^\circ; \omega_1 = 80 \text{ с}^{-1}.$

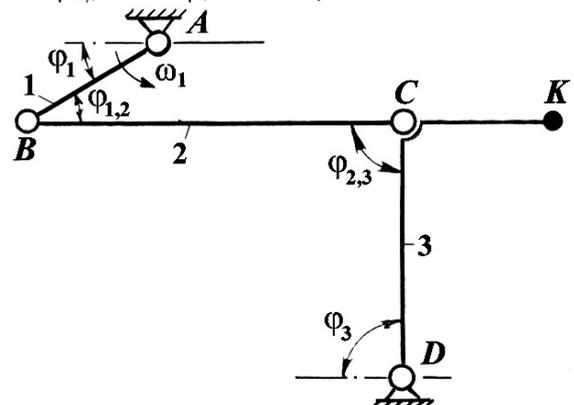


Рисунок 2.1.45

**2.1.46.**

$l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = 0,3 \text{ м}; l_{CD} = l_{DF};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_3 = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 45^\circ;$   
 $\omega_1 = 200 \text{ с}^{-1}.$

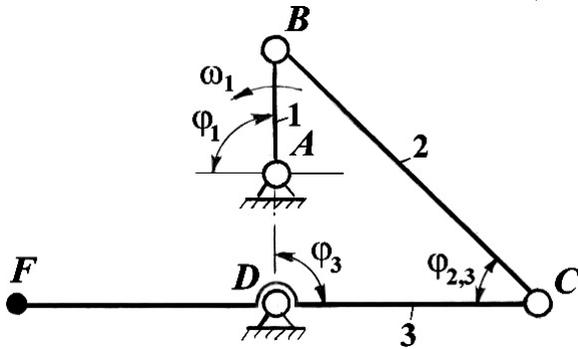


Рисунок 2.1.46

**2.1.47.**

$l_{AB} = l_{BE} = 0,07 \text{ м}; l_{DE} = l_{BC} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 120 \text{ с}^{-1}.$

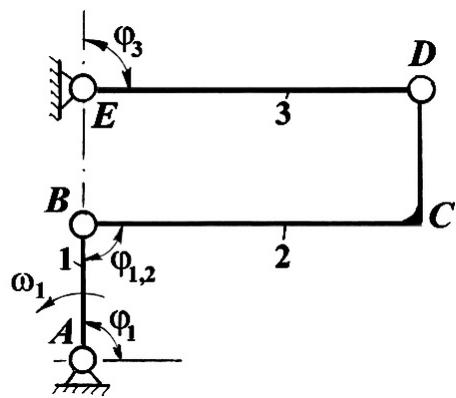


Рисунок 2.1.47

**2.1.48.**

$l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{DE} = l_{BC} = l_{CD} = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ;$   
 $\angle \varphi_{2,3} = \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

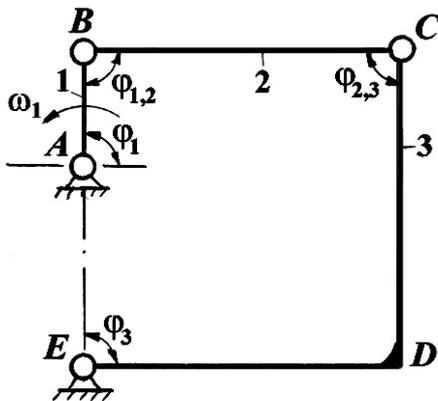


Рисунок 2.1.48

**2.1.49.**

$l_{AB} = l_{EM} = l_{CB} = l_{CD} = 0,03 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_2 = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

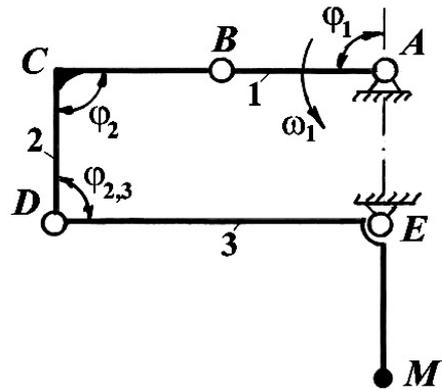


Рисунок 2.1.49

**2.1.50.**

$l_{AM} = l_{OA} = 0,025 \text{ м}; l_{AB} = 0,05 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 60^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

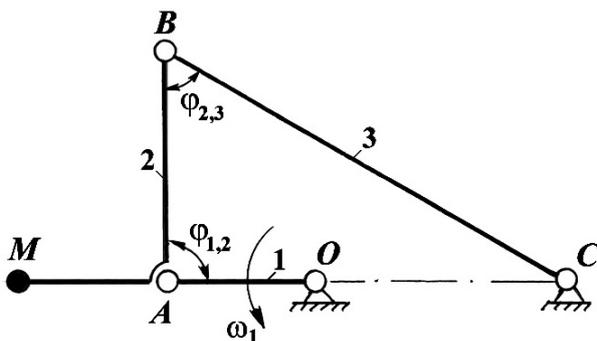


Рисунок 2.1.50

**2.1.51.**

$l_{AB} = l_{CD} = 0,06 \text{ м}; l_{DE} = l_{BC} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

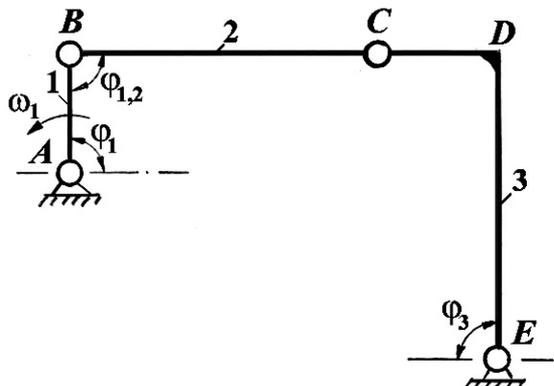


Рисунок 2.1.51

**2.1.52.**

$l_{AB} = 0,05 \text{ м}; l_{DE} = l_{BC} = 0,14 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,14 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ; \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

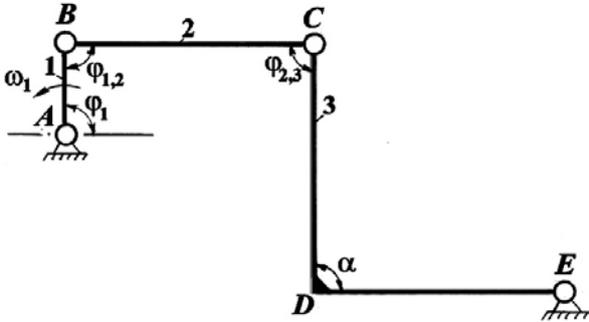


Рисунок 2.1.52

**2.1.53.**

$l_{AB} = l_{EK} = 0,08 \text{ м}; l_{BC} = 0,2 \text{ м};$   
 $l_{CE} = \frac{1}{2} l_{CD};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ; \angle \varphi_3 = \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 80 \text{ с}^{-1}.$

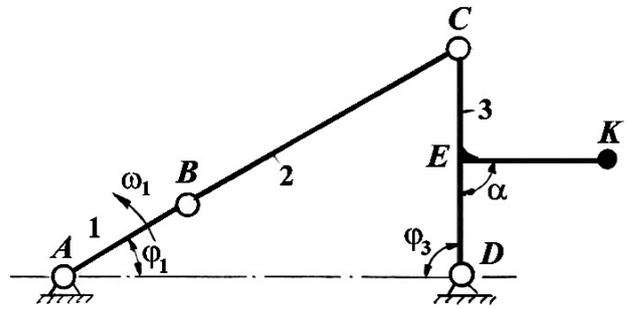


Рисунок 2.1.53

**2.1.54.**

$l_{AB} = 0,04 \text{ м}; l_{BC} = l_{EF} = 0,08 \text{ м};$   
 $l_{CD} = l_{DE} = 0,08 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \beta = \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

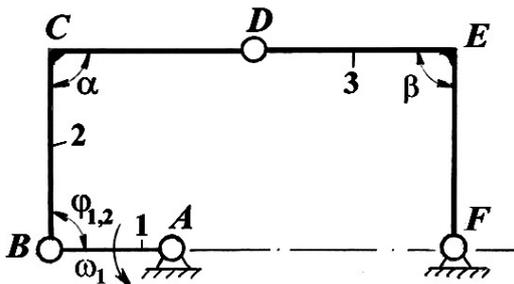


Рисунок 2.1.54

**2.1.55.**

$l_{AB} = l_{CD} = l_{EM} = 0,06 \text{ м}; l_{DB} = 0,1 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = \angle \alpha = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 45^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

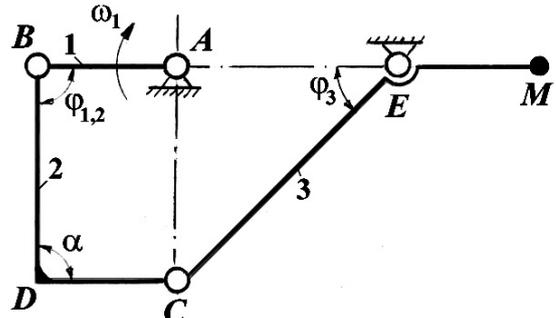


Рисунок 2.1.55

**2.1.56.**

$l_{AB} = 0,05 \text{ м}; l_{BC} = l_{DE} = 0,03 \text{ м};$   
 $l_{AF} = 0,08 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \beta = \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\angle \varphi_3 = 45^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

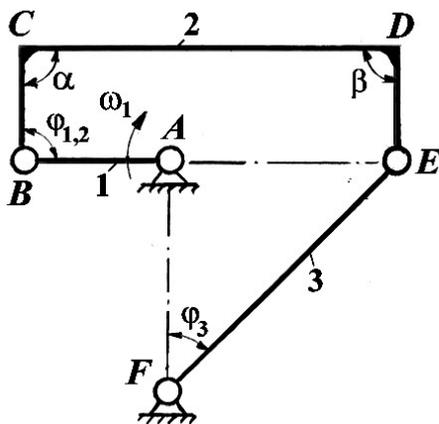


Рисунок 2.1.56

**2.1.57.**

$l_{O_1A} = l_{BD} = 0,07 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,12 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \alpha = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 45^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

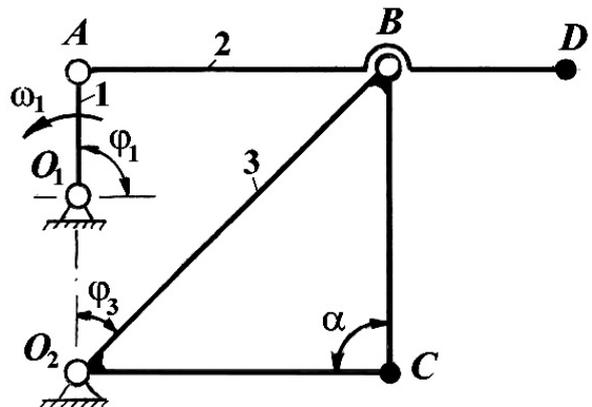


Рисунок 2.1.57

**2.1.58.**

$l_{AB} = l_{EK} = 0,09$  м;  $l_{DC} = l_{DE} = 0,15$  м;  
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ$ ;  $\angle \varphi_3 = 45^\circ$ ;  $\angle \alpha = 90^\circ$ ;  
 $\omega_1 = 100$  с<sup>-1</sup>.

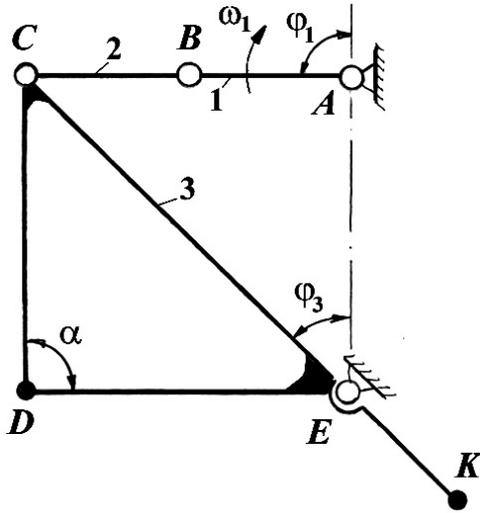


Рисунок 2.1.58

**2.1.59.**

$l_{AB} = l_{DE} = 0,08$  м;  
 $l_{BC} = l_{CD} = l_{BF} = 0,08$  м;  
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ$ ;  
 $\omega_1 = 30$  с<sup>-1</sup>.

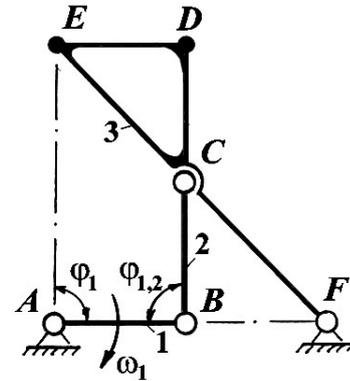


Рисунок 2.1.59

**2.1.60.**

$l_{AB} = 0,05$  м;  $l_{BC} = 0,10$  м;  $l_{CE} = 0,04$  м;  
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ$ ;  $\angle \varphi_3 = 60^\circ$ ;  
 $\omega_1 = 45$  с<sup>-1</sup>.

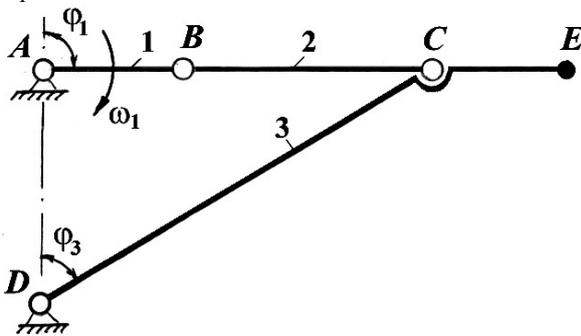


Рисунок 2.1.60

**2.1.61.**

$l_{AB} = l_{DE} = 0,1$  м;  $l_{CD} = 0,25$  м;  
 $\angle \varphi_{1,2} = 45^\circ$ ;  $\angle \varphi_{2,3} = 45^\circ$ ;  $\angle \alpha = 90^\circ$ ;  
 $\omega_1 = 120$  с<sup>-1</sup>.

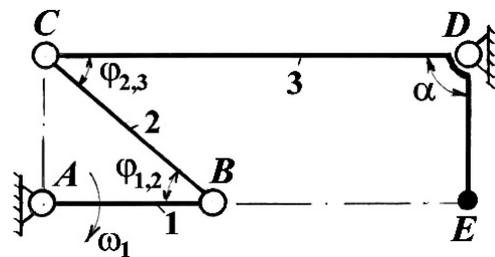


Рисунок 2.1.61

**2.1.62.**

$l_{AB} = l_{DE} = 0,06$  м;  $l_{EF} = l_{CD} = 0,14$  м;  
 $\angle \varphi_{1,2} = 45^\circ$ ;  $\angle \varphi_{2,3} = 45^\circ$ ;  $\angle \varphi_3 = 90^\circ$ ;  
 $\omega_1 = 200$  с<sup>-1</sup>.

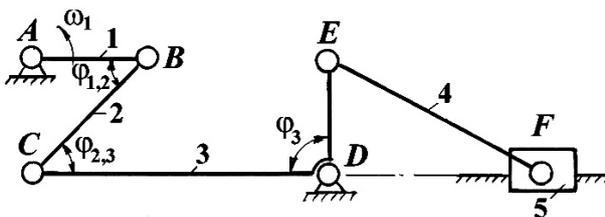


Рисунок 2.1.62

**2.1.63.**

$l_{AB} = l_{DE} = 0,1$  м;  $l_{EF} = l_{BC} = 0,2$  м;  
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ$ ;  $\angle \alpha = 90^\circ$ ;  $\angle \varphi_3 = 60^\circ$ ;  
 $\omega_1 = 150$  с<sup>-1</sup>.

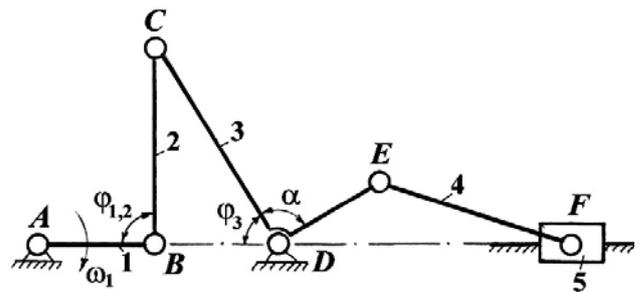


Рисунок 2.1.63

**2.1.64.**

$l_{AB} = 0,05 \text{ м}; l_{DE} = l_{BC} = 0,08 \text{ м};$   
 $l_{CD} = l_{EF} = 0,1 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

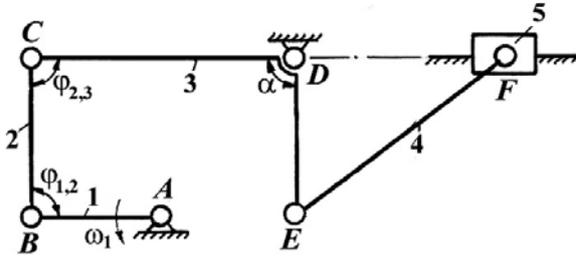


Рисунок 2.1.64

**2.1.65.**

$l_{AB} = l_{CE} = 0,08 \text{ м}; l_{CD} = l_{BC} = 0,15 \text{ м};$   
 $l_{EF} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

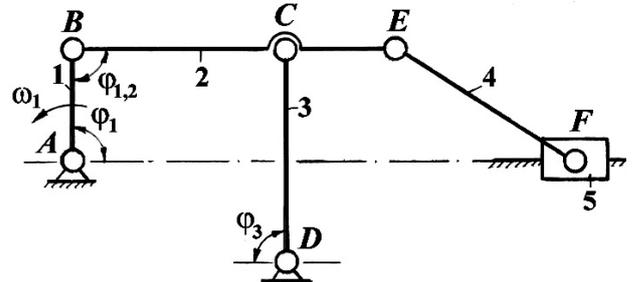


Рисунок 2.1.65

**2.1.66.**

$l_{AB} = 0,05 \text{ м}; l_{BC} = 0,1 \text{ м}; l_{CE} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

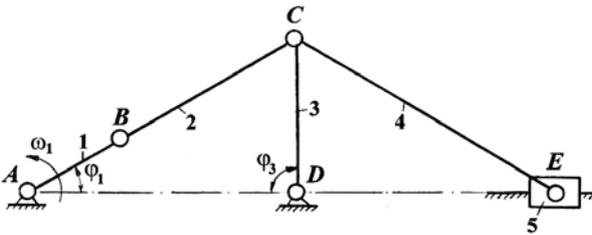


Рисунок 2.1.66

**2.1.67.**

$l_{AB} = 0,12 \text{ м}; l_{BC} = l_{EF} = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 30^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 80 \text{ с}^{-1}.$

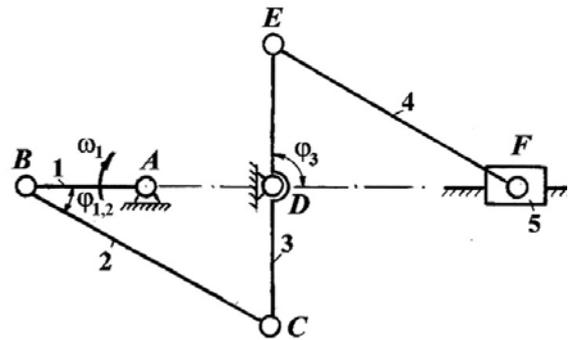


Рисунок 2.1.67

**2.1.68.**

$l_{OA} = l_{BC} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = l_{CD} = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 120 \text{ с}^{-1}.$

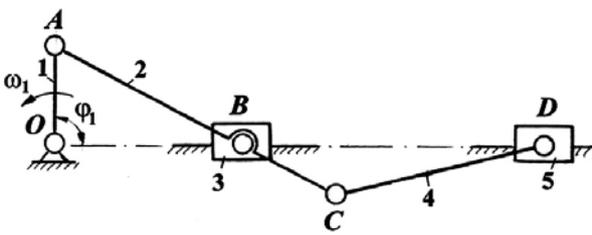


Рисунок 2.1.68

**2.1.69.**

$l_{AB} = 0,6 \text{ м}; l_{BC} = 0,1 \text{ м}; l_{CD} = l_{CE} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

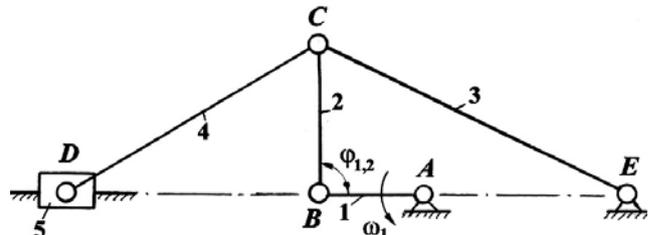


Рисунок 2.1.69

**2.1.70.**

$l_{AB} = l_{CE} = 0,08 \text{ м}; l_{BC} = l_{CD} = 1,2 \text{ м};$   
 $l_{EF} = 1,8 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

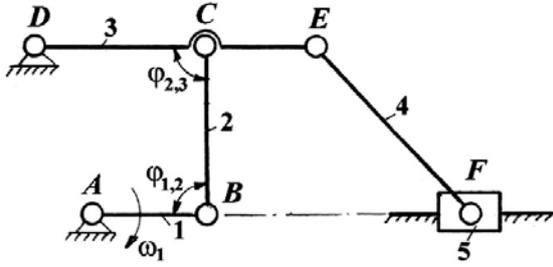


Рисунок 2.1.70

**2.1.71.**

$l_{AB} = l_{CE} = 0,12 \text{ м}; l_{BC} = l_{EF} = 0,2 \text{ м};$   
 $l_{AD} = 0,22 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_3 = 60^\circ;$   
 $\omega_1 = 120 \text{ с}^{-1}.$

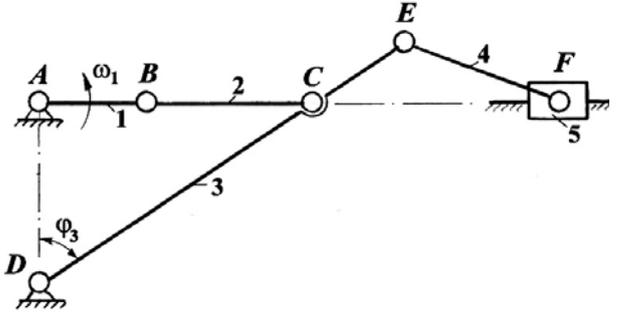


Рисунок 2.1.71

**2.1.72.**

$l_{AB} = l_{BC} = 0,1 \text{ м}; l_{BD} = 0,3 \text{ м};$   
 $l_{CM} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 30^\circ;$   
 $\omega_1 = 200 \text{ с}^{-1}.$

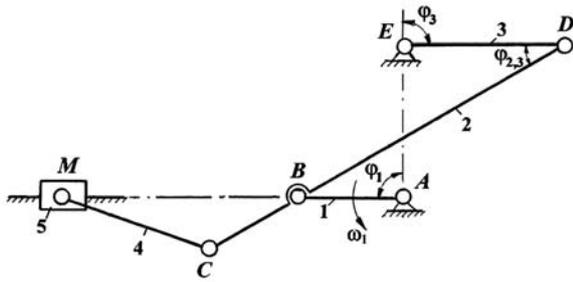


Рисунок 2.1.72

**2.1.73.**

$l_{AB} = l_{BE} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = l_{CD} = 0,22 \text{ м};$   
 $l_{EM} = 0,22 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_2 = 45^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 80 \text{ с}^{-1}.$

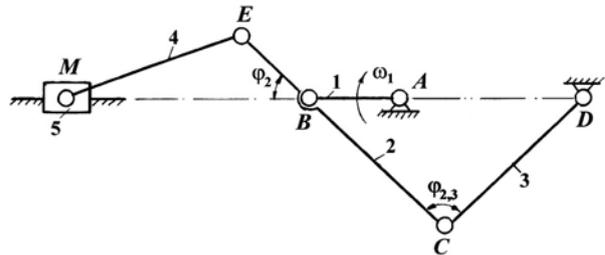


Рисунок 2.1.73

**2.1.74.**

$l_{AB} = l_{CD} = 0,05 \text{ м}; l_a = 0,05 \text{ м};$   
 $l_{AE} = l_{DF} = 0,1 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 45^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

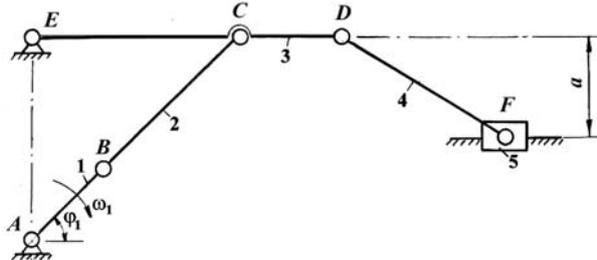


Рисунок 2.1.74

**2.1.75.**

$l_{AB} = l_{BC} = l_{BE} = 0,08 \text{ м}; l_{EF} = 0,15 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

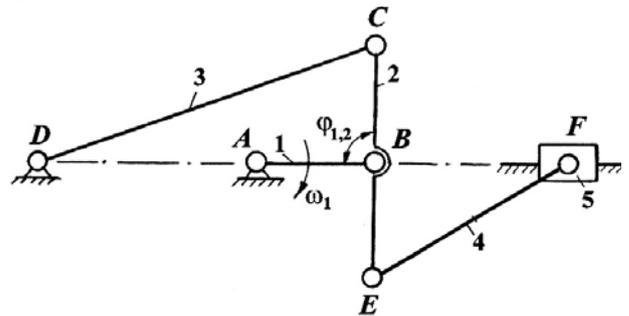


Рисунок 2.1.75

**2.1.76.**

$l_{OA} = l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{AD} = l_{BC} = 0,25 \text{ м};$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

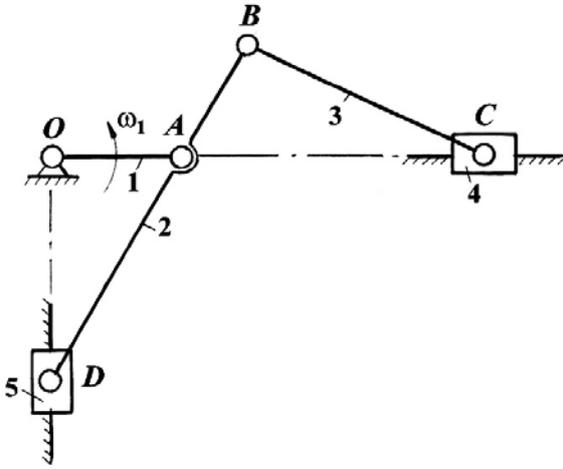


Рисунок 2.1.76

**2.1.78.**

$l_{AB} = l_{CD} = l_{DE} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{4,5} = 90^\circ; \angle \alpha = 60^\circ;$   
 $\omega_1 = 250 \text{ с}^{-1}.$

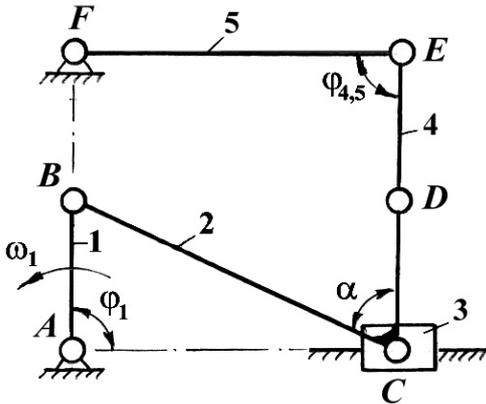


Рисунок 2.1.78

**2.1.80.**

$l_{AB} = l_{DC} = 0,2 \text{ м}; l_{BC} = l_{CE} = 0,4 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 200 \text{ с}^{-1}.$

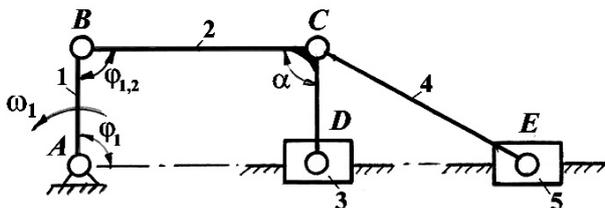


Рисунок 2.1.80

**2.1.77.**

$l_{AB} = 0,05 \text{ м}; l_{DE} = l_{EF} = 0,14 \text{ м};$   
 $l_{BC} = l_{BD};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{2,4} = 60^\circ; \angle \varphi_{1,2} = \angle \varphi_{4,5} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

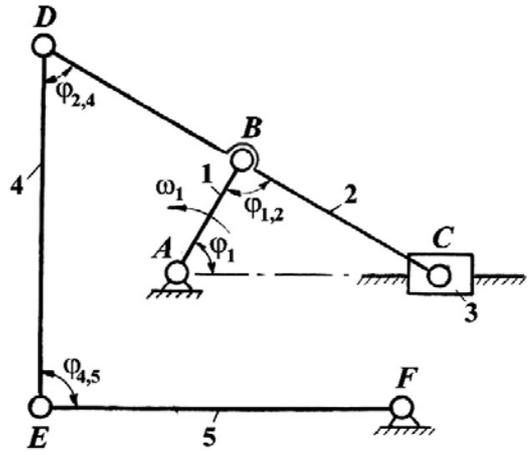


Рисунок 2.1.77

**2.1.79.**

$l_{AB} = \frac{1}{2} l_{AF} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = l_{CD} = 0,22 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{4,5} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 200 \text{ с}^{-1}.$

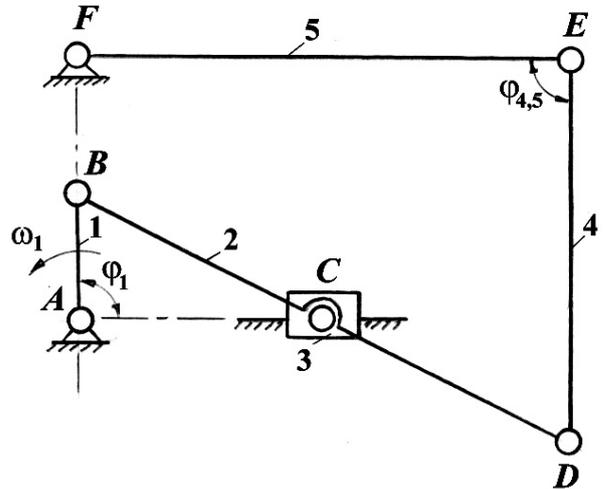


Рисунок 2.1.79

**2.1.81.**

$l_{AB} = l_{BC} = l_{DE} = 0,1 \text{ м}; l_{CD} = 0,3 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \alpha = \beta = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

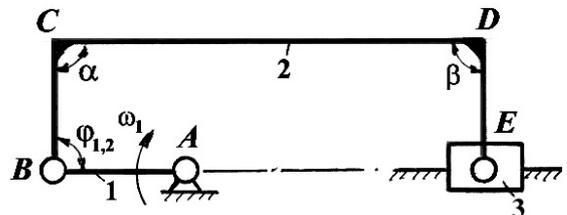


Рисунок 2.1.81

**2.1.82.**

$l_{AB} = l_{CD} = 0,2 \text{ м}; l_{BC} = l_{DE} = 0,4 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{2,4} = 90^\circ; \angle \varphi_{1,2} = 60^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

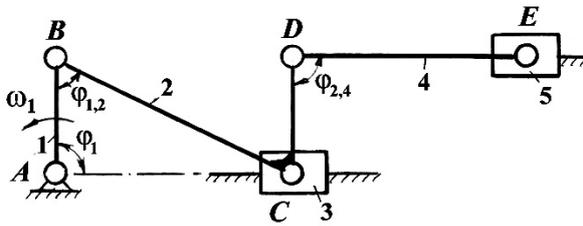


Рисунок 2.1.82

**2.1.83.**

$l_{AB} = l_{BD} = 0,07 \text{ м}; l_{BC} = l_{DE} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{2,4} = \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

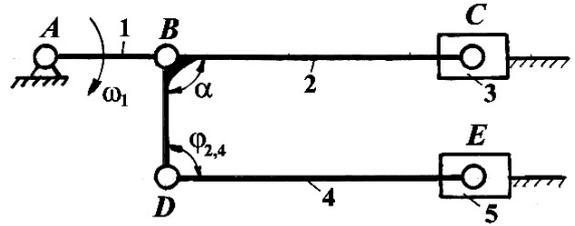


Рисунок 2.1.83

**2.1.84.**

$l_{AB} = l_{BC} = l_{BE} = 0,1 \text{ м};$   
 $l_{CD} = l_{EF} = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

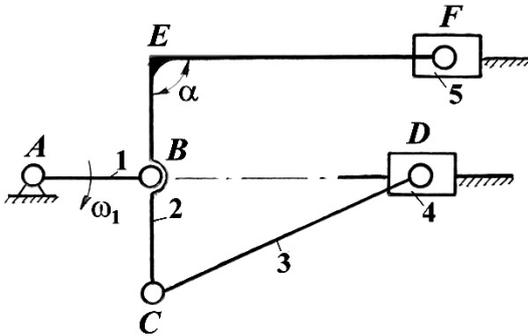


Рисунок 2.1.84

**2.1.85.**

$l_{AB} = l_{BC} = l_{BE} = 0,2 \text{ м}; l_{CD} = l_{EF} = 0,4 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{2,4} = \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

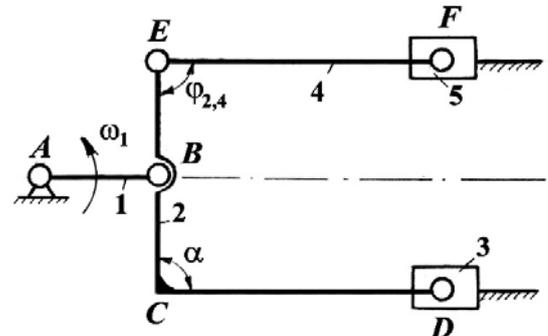


Рисунок 2.1.85

**2.1.86.**

$l_{AB} = l_{BC} = l_{DE} = 0,05 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \alpha = \angle \beta = 60^\circ;$   
 $\omega_1 = 10 \text{ с}^{-1}.$

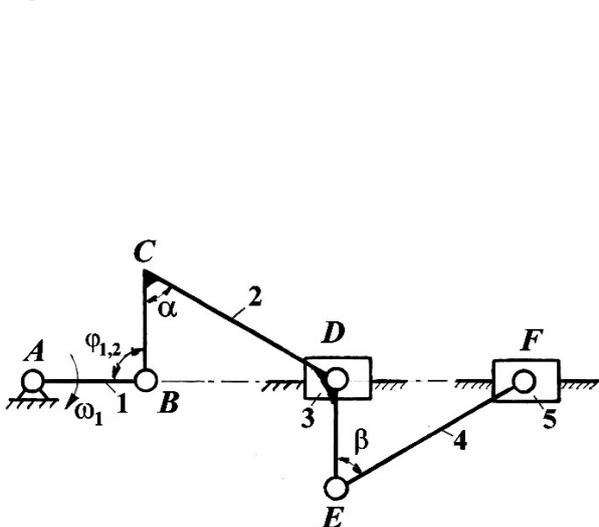


Рисунок 2.1.86

**2.1.87.**

$l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = l_{CD} = l_{CE} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ; \angle \varphi_{1,2} = 45^\circ;$   
 $\omega_1 = 25 \text{ с}^{-1}.$

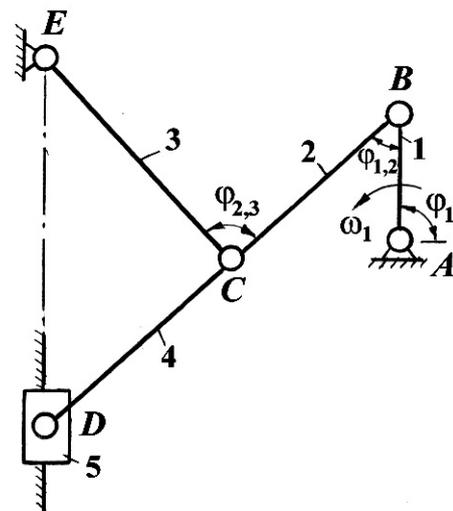


Рисунок 2.1.87

**2.1.88.**

$l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = 0,45 \text{ м};$   
 $l_{CM} = l_{BM} = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 60^\circ; \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

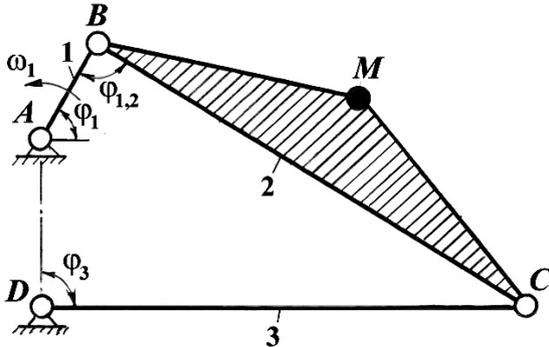


Рисунок 2.1.88

**2.1.89.**

$l_{AB} = l_{BC} = l_{CD} = 0,1 \text{ м}; l_{ED} = l_{CF} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 150 \text{ с}^{-1}.$

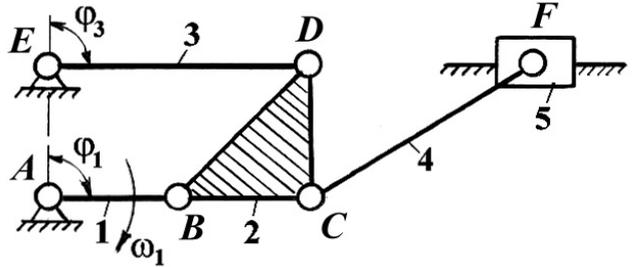


Рисунок 2.1.89

**2.1.90.**

$l_{AB} = l_{DE} = 0,06 \text{ м};$   
 $l_{BC} = l_{CD} = l_{EF} = 0,12 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{1,2} = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 200 \text{ с}^{-1}.$

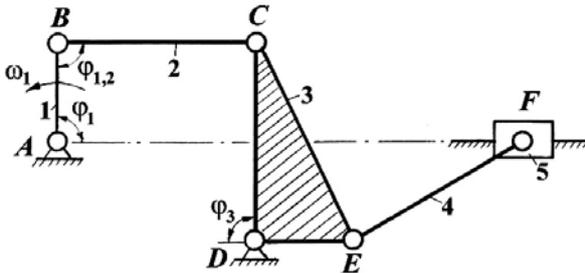


Рисунок 2.1.90

**2.1.91.**

$l_{AB} = l_{CE} = l_{ED} = 0,1 \text{ м};$   
 $l_{BC} = l_{FF} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_{2,3} = \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 140 \text{ с}^{-1}.$

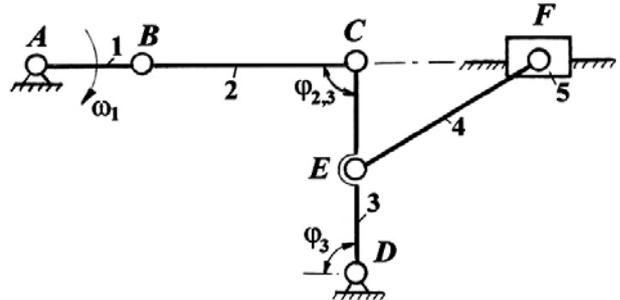


Рисунок 2.1.91

**2.1.92.**

$l_{AB} = l_{CD} = 0,2 \text{ м};$   
 $l_{BD} = l_{DE} = l_{CF} = 0,4 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_3 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

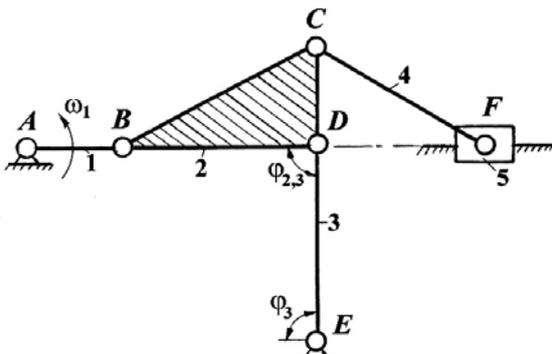


Рисунок 2.1.92

**2.1.93.**

$l_{OA} = l_{AC} = 0,05 \text{ м};$   
 $l_{CD} = l_{AB} = 0,2 \text{ м}; l_a = 0,02 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ; \angle \varphi_2 = 60^\circ;$   
 $\omega_1 = 25 \text{ с}^{-1}.$

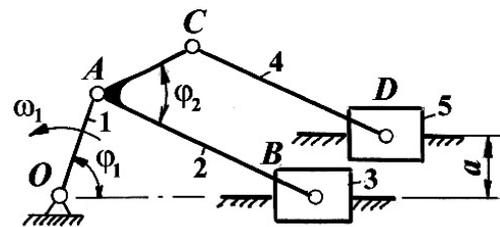


Рисунок 2.1.93

**2.1.94.**

$l_{OA} = 0,08 \text{ м}; l_{AC} = 0,15 \text{ м};$   
 $l_{AB} = l_{DE} = 0,35 \text{ м}; l_{CD} = l_a = 0,025 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 45^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 90 \text{ с}^{-1}.$

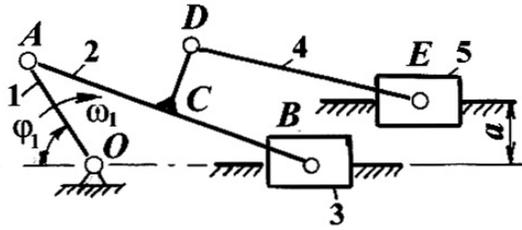


Рисунок 2.1.94

**2.1.95.**

$l_{OA} = 0,04 \text{ м}; l_{AB} = 0,2 \text{ м}; l_{AC} = 0,01 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ, 90^\circ, 180^\circ; \angle \varphi_2 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

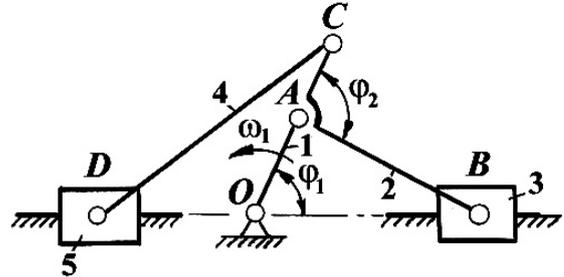


Рисунок 2.1.95

**2.1.96.**

$l_{OA} = 0,07 \text{ м}; l_{AB} = l_{CD} = 0,22 \text{ м};$   
 $l_{AC} = 0,08 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 90^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

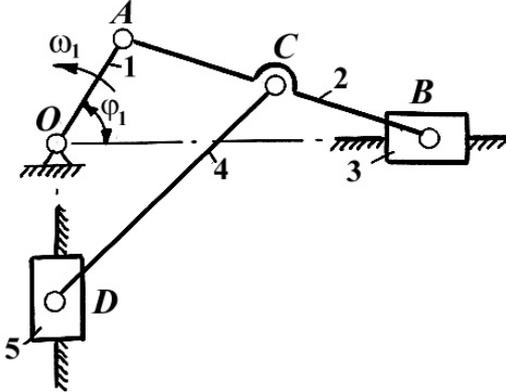


Рисунок 2.1.96

**2.1.97.**

$l_{OA} = l_{AC} = 0,06 \text{ м}; l_{AB} = l_{CD} = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 45^\circ, 90^\circ, 200^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

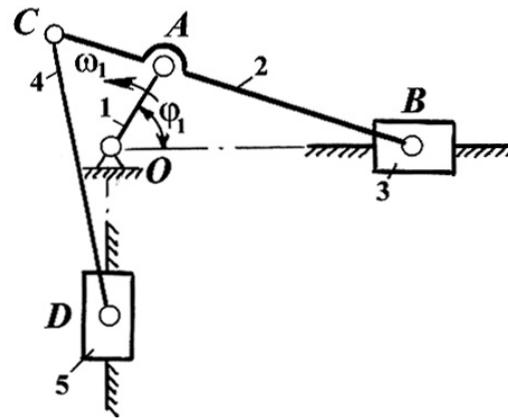


Рисунок 2.1.97

**2.1.98.**

$l_{OA} = 0,08 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = l_a = 0,32 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 90^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

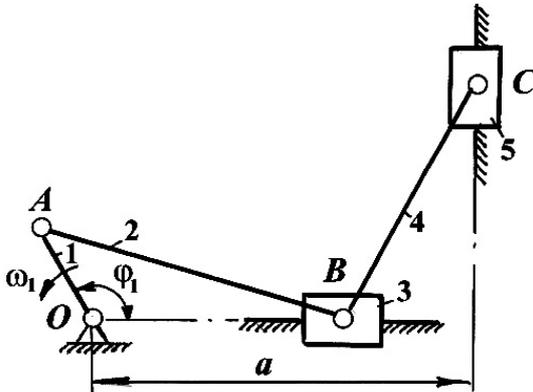


Рисунок 2.1.98

**2.1.99.**

$l_{OA} = 0,2 \text{ м}; l_{AB} = 0,48 \text{ м}; l_{OC} = 0,35 \text{ м};$   
 $l_{DE} = 0,8 \text{ м}; l_{BC} = 2 l_{CD} = 0,18 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 30^\circ, 120^\circ;$   
 $\omega_1 = 30 \text{ с}^{-1}.$

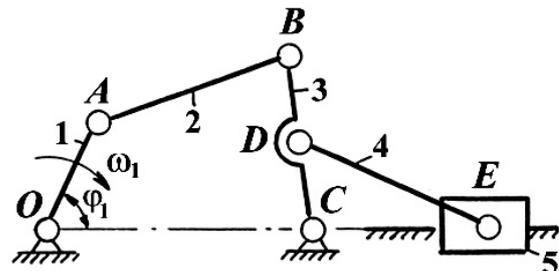


Рисунок 2.1.99

**2.1.100.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = 0,2 \text{ м}; l_{BC} = 0,18 \text{ м};$   
 $l_{BM} = \frac{1}{2} l_{BD}; l_{OC} = 0,2 \text{ м}; l_{BD} = 0,3 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 45^\circ, 90^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 25 \text{ с}^{-1}.$

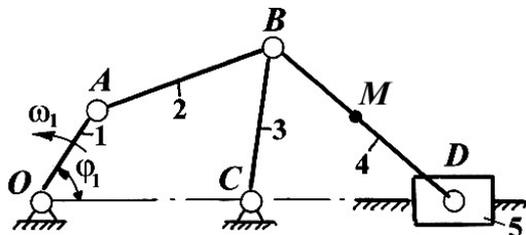


Рисунок 2.1.100

**2.1.101.**

$l_{OA} = 0,2 \text{ м}; l_{AB} = l_{OC} = 0,55 \text{ м};$   
 $l_{CB} = \frac{1}{2} l_{CD} = 0,3 \text{ м}; l_{DE} = 0,75 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ, 90^\circ, 180^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

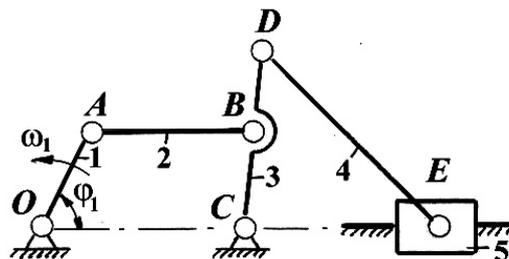


Рисунок 2.1.101

**2.1.102.**

$l_{O_1A} = 0,08 \text{ м}; l_{AB} = 0,21 \text{ м};$   
 $l_{O_2B} = 0,12 \text{ м}; l_{O_2C} = 0,06 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,18 \text{ м}; l_{O_1O_2} = 0,19 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 120^\circ, 180^\circ;$   
 $\omega_1 = 15 \text{ с}^{-1}.$

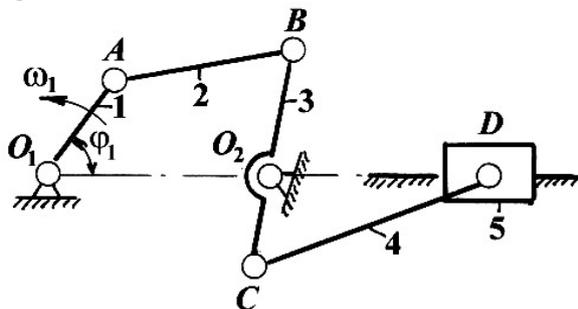


Рисунок 2.1.102

**2.1.103.**

$l_{OA} = 0,08 \text{ м}; l_{AB} = 0,3 \text{ м};$   
 $l_{BC} = l_{BD} = 0,33 \text{ м}; l_{X_C} = 0,32 \text{ м};$   
 $l_{Y_C} = 0,3 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 30^\circ, 120^\circ;$   
 $\omega_1 = 30 \text{ с}^{-1}.$

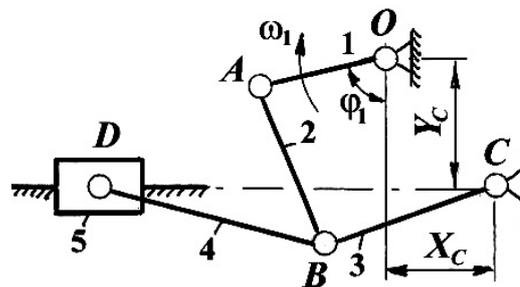


Рисунок 2.1.103

**2.1.104.**

$l_{OA} = l_{OB} = 0,05 \text{ м}; l_{AC} = l_{BD} = 0,25 \text{ м};$   
 $l_e = 0,015 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ;$   
 $\omega_1 = 80 \text{ с}^{-1}.$

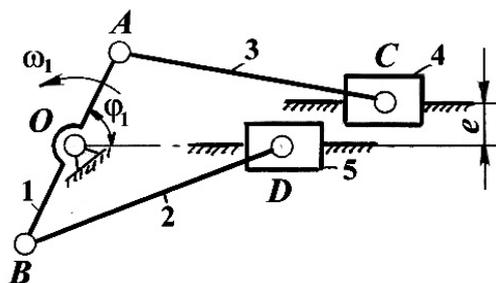


Рисунок 2.1.104

**2.1.105.**

$l_{OA} = 0,08 \text{ м}; l_{AB} = l_{AC} = 0,38 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 60^\circ, 90^\circ, 270^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

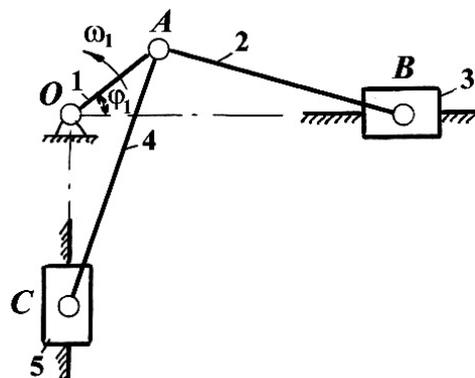


Рисунок 2.1.105

**2.1.106.**

$l_{OA} = 0,045 \text{ м}; l_{BC} = 0,065 \text{ м};$   
 $l_{AB} = l_{BD} = 0,21 \text{ м}; l_{X_C} = 0,21 \text{ м};$   
 $l_{Y_C} = 0,055 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ, 90^\circ, 200^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

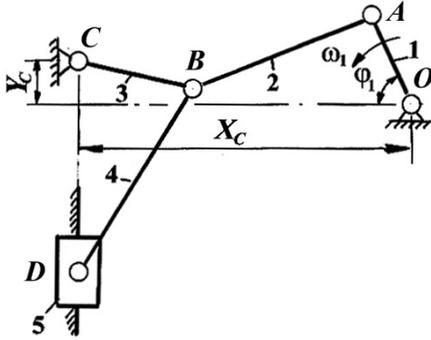


Рисунок 2.1.106

**2.1.107.**

$l_{OA} = 0,25 \text{ м}; l_{AB} = 0,75 \text{ м}; l_{DB} = 0,3 \text{ м};$   
 $l_{BC} = 0,2 \text{ м}; l_{CE} = 0,4 \text{ м}; l_e = 0,1 \text{ м};$   
 $l_Y = 0,1 \text{ м}; l_X = 0,1 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ, 90^\circ, 120^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

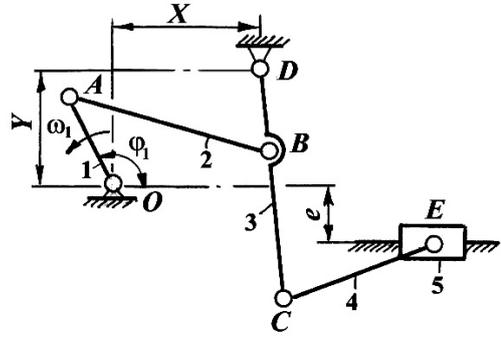


Рисунок 2.1.107

**2.1.108.**

$l_{AB} = 0,15 \text{ м}; l_{BC} = 0,4 \text{ м}; l_{EF} = 0,45 \text{ м};$   
 $l_{CD} = l_{CE} = 0,25 \text{ м}; l_Y = 0,4 \text{ м}; l_X = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ, 150^\circ, 200^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

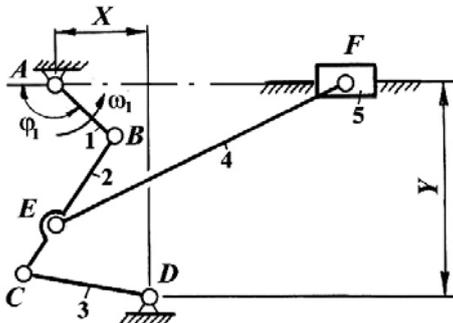


Рисунок 2.1.108

**2.1.109.**

$l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = 0,25 \text{ м}; l_{CD} = 0,274 \text{ м};$   
 $l_{ED} = 0,15 \text{ м}; l_{EF} = 0,4 \text{ м}; l_Y = 0,174 \text{ м};$   
 $l_X = 0,24 \text{ м}; \angle \varphi_1 = 60^\circ, 90^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 95 \text{ с}^{-1}.$

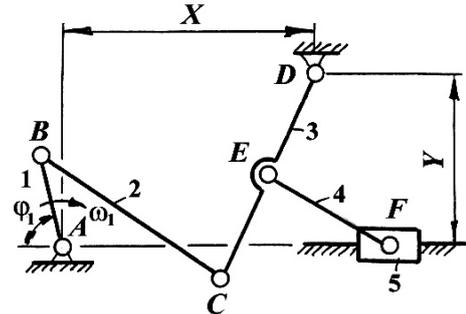


Рисунок 2.1.109

**2.1.110.**

$l_{OA} = 0,12 \text{ м}; l_{AC} = 0,45 \text{ м}; l_a = 0,15 \text{ м};$   
 $l_b = 0,45 \text{ м}; l_c = 0,14 \text{ м};$   
 $l_{CD} = l_{DE} = 0,18 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ;$   
 $\omega_1 = 85 \text{ с}^{-1}.$

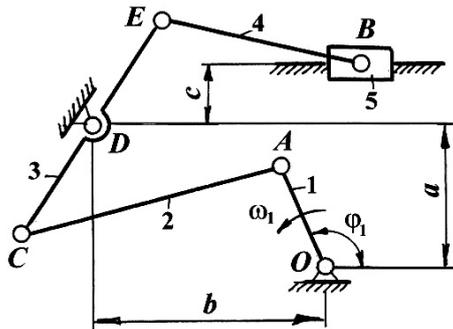


Рисунок 2.1.110

**2.1.111.**

$l_{OA} = 0,15 \text{ м}; l_{AD} = 0,45 \text{ м}; l_{ED} = 0,45 \text{ м};$   
 $l_{DC} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = 0,2 \text{ м}; l_a = 0,25 \text{ м};$   
 $l_b = 0,3 \text{ м}; l_c = 0,45 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 45^\circ, 90^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

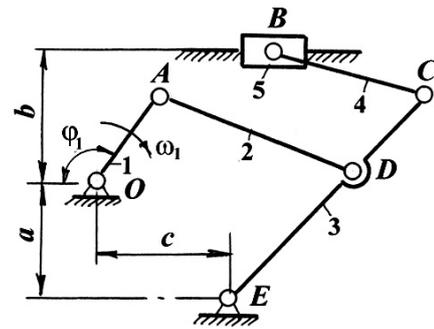


Рисунок 2.1.111

**2.1.112.**

$l_{OA} = l_{CD} = 0,06 \text{ м}; l_{AC} = 0,25 \text{ м};$   
 $l_{O_1C} = 0,1 \text{ м}; l_{DB} = 0,15 \text{ м}; l_a = 0,24 \text{ м};$   
 $l_b = 0,14 \text{ м}; l_c = 0,12 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 60^\circ, 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

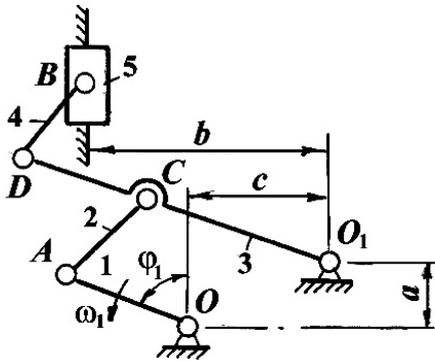


Рисунок 2.1.112

**2.1.113.**

$l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = 0,4 \text{ м};$   
 $l_{DE} = l_{CD} = l_{CE} = 0,2 \text{ м}; l_{EF} = 0,35 \text{ м};$   
 $l_a = 0,16 \text{ м}; l_b = 0,24 \text{ м}; l_c = 0,33 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ, 90^\circ, 240^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

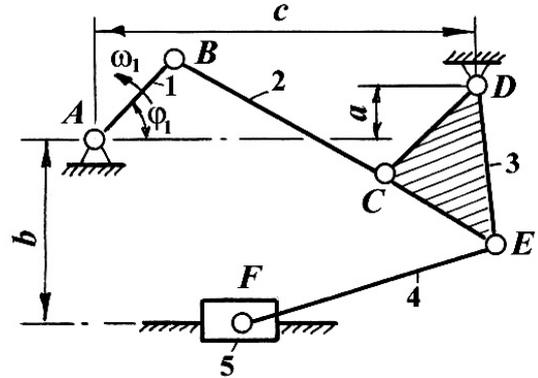


Рисунок 2.1.113

**2.1.114.**

$l_{OA} = 0,05 \text{ м}; l_{OB} = 0,12 \text{ м}; l_{BC} = 0,21 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ, 90^\circ, 120^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

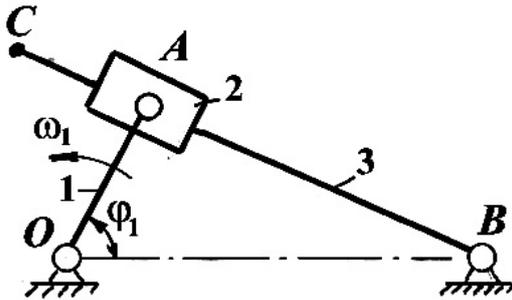


Рисунок 2.1.114

**2.1.115.**

$l_{OA} = 0,04 \text{ м}; l_{OB} = 0,12 \text{ м}; l_{AS_2} = 0,05 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 20^\circ, 90^\circ, 340^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

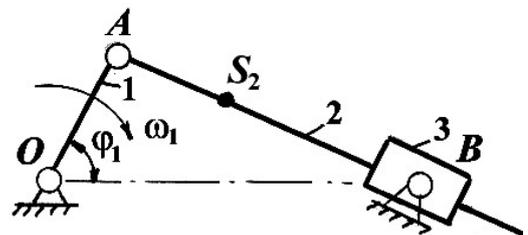


Рисунок 2.1.115

**2.1.116.**

$l_{OA} = l_{CT} = 0,12 \text{ м}; l_{AC} = 0,32 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,3 \text{ м}; l_{TB} = 0,37 \text{ м}; l_a = 0,13 \text{ м};$   
 $l_b = 0,25 \text{ м}; l_c = 0,42 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ, 90^\circ, 120^\circ;$   
 $\omega_1 = 30 \text{ с}^{-1}.$

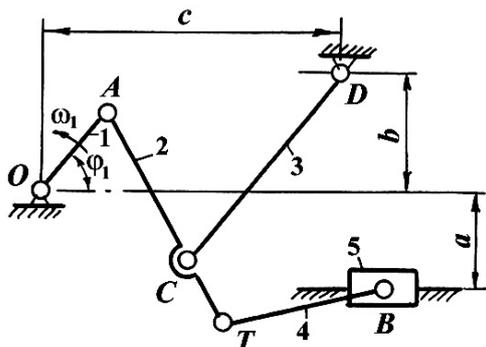


Рисунок 2.1.116

**2.1.117.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AC} = 0,45 \text{ м}; l_{CT} = 0,15 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,3 \text{ м}; l_{BT} = l_a = 0,25 \text{ м};$   
 $l_b = 0,4 \text{ м}; l_c = 0,5 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ, 90^\circ, 180^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

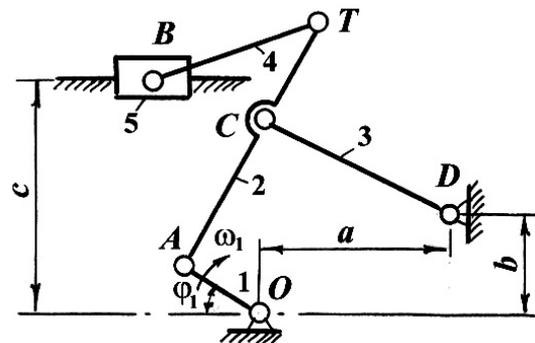


Рисунок 2.1.117

**2.1.118.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = 0,32 \text{ м}; l_{BC} = 0,3 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,42 \text{ м}; l_{DE} = 0,11 \text{ м}; l_a = 0,16 \text{ м};$   
 $l_b = 0,29 \text{ м}; l_c = 0,41 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 60^\circ, 140^\circ;$   
 $\omega_1 = 90 \text{ с}^{-1}.$

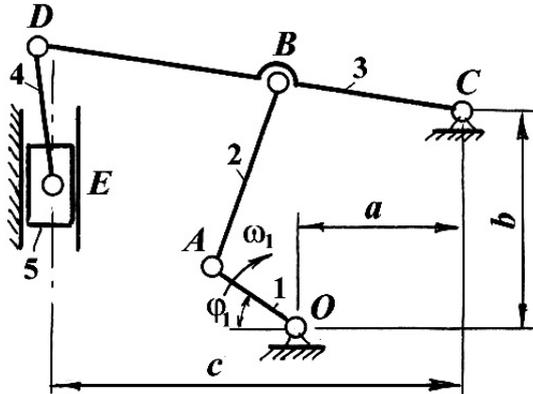


Рисунок 2.1.118

**2.1.120.**

$l_{OA} = 0,05 \text{ м}; l_a = 0,09 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 60^\circ, 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

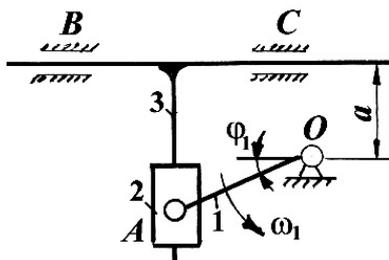


Рисунок 2.1.120

**2.1.122.**

$l_{OA} = 0,05 \text{ м}; l_{BC} = 0,15 \text{ м}; l_{BD} = 0,2 \text{ м};$   
 $l_{OC} = 0,08 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 30^\circ, 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 15 \text{ с}^{-1}.$

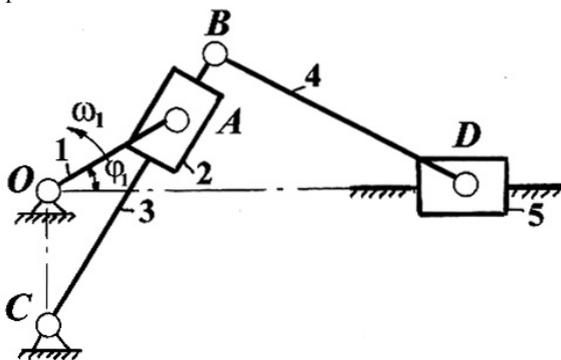


Рисунок 2.1.122

**2.1.119.**

$l_{OA} = 0,05 \text{ м}; l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BD} = 0,08 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,04 \text{ м}; l_{CE} = 0,1 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 45^\circ, 120^\circ; \angle \alpha = 30^\circ;$   
 $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

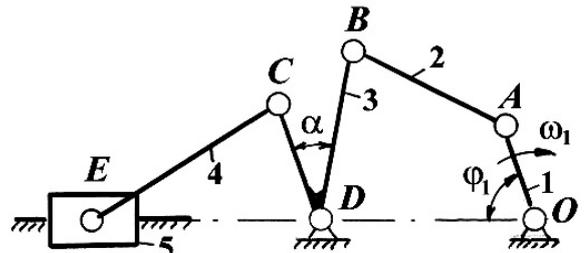


Рисунок 2.1.119

**2.1.121.**

$l_{OA} = 0,04 \text{ м}; l_{OD} = 0,03 \text{ м}; l_{DB} = 0,05 \text{ м};$   
 $l_{BC} = 0,12 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ; \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 25 \text{ с}^{-1}.$

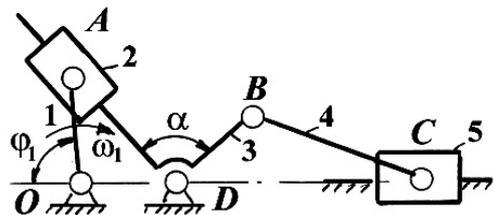


Рисунок 2.1.121

**2.1.123.**

$l_{OA} = 0,12 \text{ м}; l_{OB} = 0,3 \text{ м}; l_{BC} = 0,5 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,2 \text{ м}; l_h = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 110^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 10 \text{ с}^{-1}.$

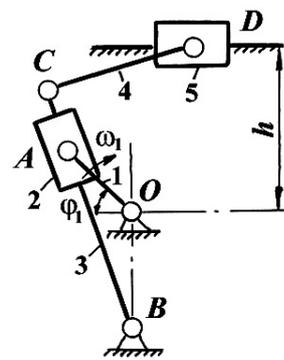


Рисунок 2.1.123

**2.1.124.**

$l_{OA} = 0,03 \text{ м}; l_{OB} = 0,075 \text{ м}; l_{AC} = 0,12 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,06 \text{ м}; l_{DE} = 0,04 \text{ м}; l_a = 0,01 \text{ м};$   
 $l_b = 0,05 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ, 120^\circ, 210^\circ;$   
 $\omega_1 = 70 \text{ с}^{-1}.$

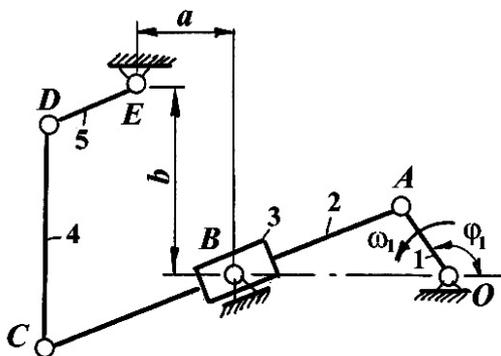


Рисунок 2.1.124

**2.1.125.**

$l_{OA} = 0,05 \text{ м}; l_{AB} = 0,15 \text{ м}; l_{DB} = 0,1 \text{ м};$   
 $l_a = 0,09 \text{ м}; l_b = 0,13 \text{ м}; l_c = 0,22 \text{ м};$   
 $\varphi_1 = 60^\circ, 90^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

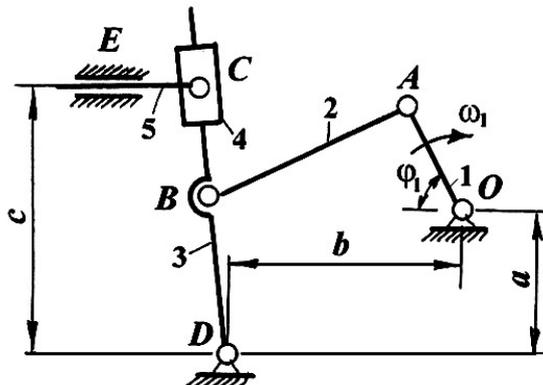


Рисунок 2.1.125

**2.1.126.**

$l_{OA} = 0,08 \text{ м}; l_{OB} = 0,2 \text{ м}; l_{AC} = 0,14 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,22 \text{ м}; l_a = 0,07 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ; \omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}.$

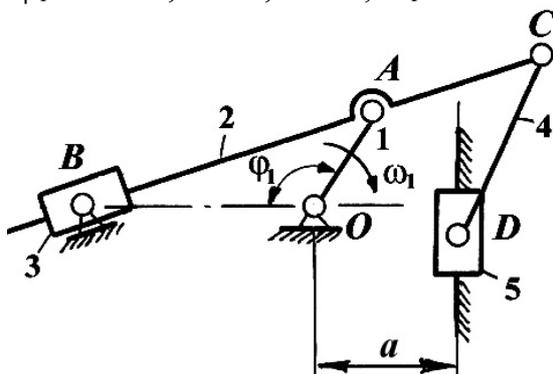


Рисунок 2.1.126

**2.1.127.**

$l_{OA} = 0,02 \text{ м}; l_{AB} = 0,26 \text{ м}; l_{OC} = 1,2 l_{AB};$   
 $l_{BC} = 0,026 \text{ м}; l_{CE} = l_{DE} = 0,03 \text{ м};$   
 $\angle \alpha = 90^\circ; \angle \varphi_1 = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ;$   
 $\omega_1 = 70 \text{ с}^{-1}.$

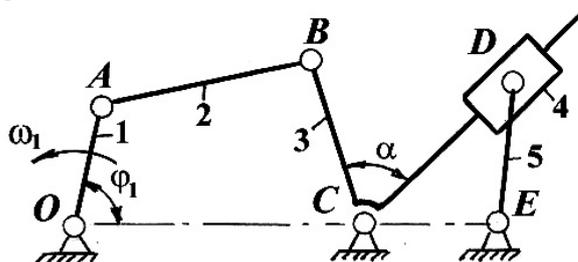


Рисунок 2.1.127

**2.1.128.**

$l_{OA} = 0,12 \text{ м}; l_{DB} = 0,18 \text{ м}; l_{BC} = 0,5 \text{ м};$   
 $l_a = 0,2 \text{ м}; l_b = 0,04 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ;$   
 $\omega_1 = 15 \text{ с}^{-1}.$

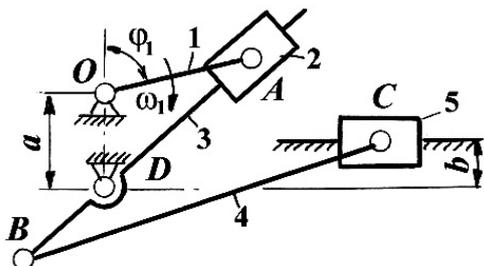


Рисунок 2.1.128

**2.1.129.**

$l_{OA} = 0,18 \text{ м}; l_{AC} = 0,7 \text{ м}; l_a = 0,21 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 120^\circ, 180^\circ, 270^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

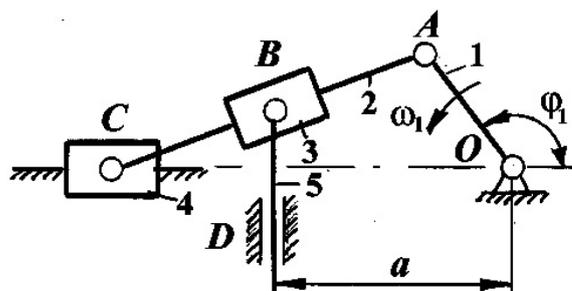


Рисунок 2.1.129

**2.1.130.**

$l_{OA} = l_{AB} = 0,2 \text{ м}; l_{BC} = 0,35 \text{ м};$   
 $l_a = 0,3 \text{ м}; l_b = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ;$   
 $\omega_1 = 30 \text{ с}^{-1}.$

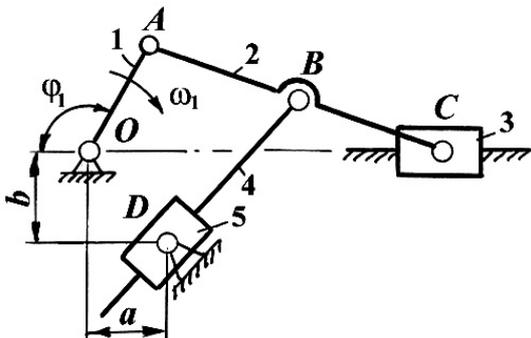


Рисунок 2.1.130

**2.1.131.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{OB} = 0,28 \text{ м}; l_{AC} = l_a = 0,47 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 45^\circ, 90^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 75 \text{ с}^{-1}.$

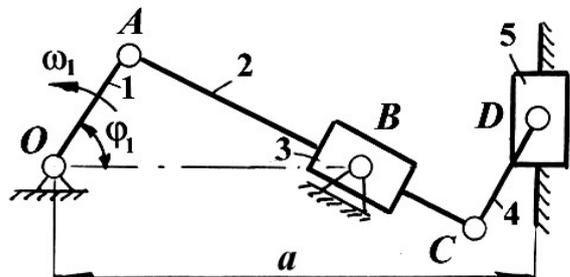


Рисунок 2.1.131

**2.1.132.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{OD} = 0,2 \text{ м}; l_{DB} = 0,12 \text{ м};$   
 $l_{BC} = 0,08 \text{ м}; l_a = 0,13 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 60^\circ, 90^\circ, 230^\circ;$   
 $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}.$

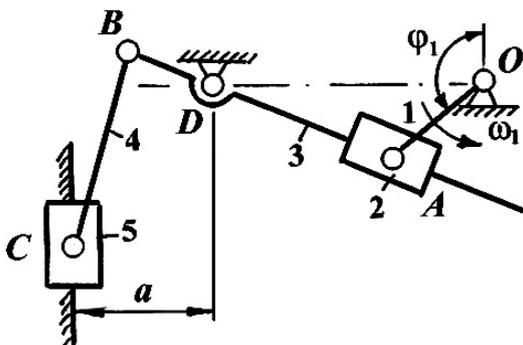


Рисунок 2.1.132

**2.1.133.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = l_{AC} = 0,2 \text{ м};$   
 $l_{CD} = l_{DE} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{3,4} = 90^\circ; \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

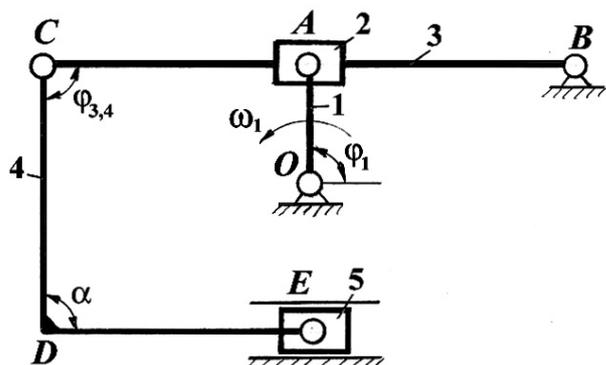


Рисунок 2.1.133

**2.1.134.**

$l_{AB} = 0,06 \text{ м}; l_{BC} = l_{BE} = 0,1 \text{ м};$   
 $l_{CD} = l_{EF} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ;$   
 $\angle \varphi_3 = \angle \varphi_5 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

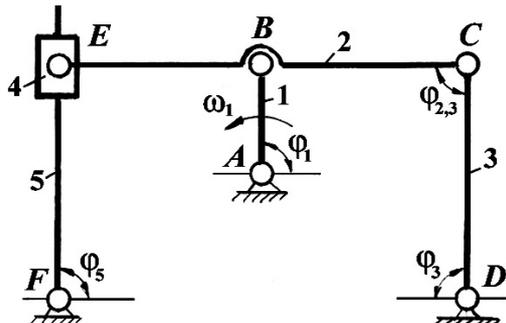


Рисунок 2.1.134

**2.1.135.**

$l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = l_{CD} = 0,15 \text{ м};$   
 $l_{CE} = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_4 = \angle \varphi_{2,4} = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 200 \text{ с}^{-1}.$

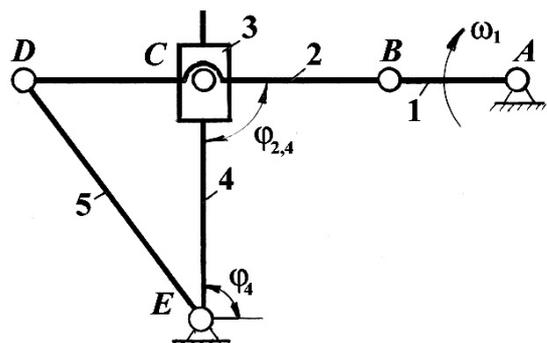


Рисунок 2.1.135

**2.1.136.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,15 \text{ м};$   
 $l_{BD} = 0,2 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_{2,3} = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

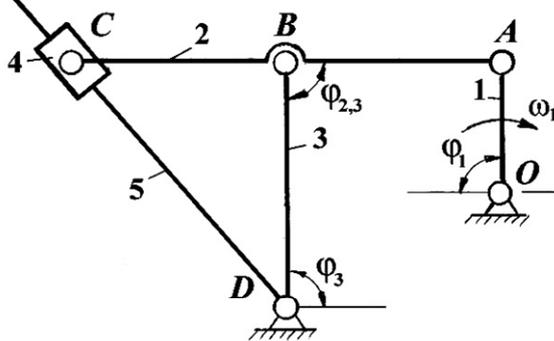


Рисунок 2.1.136

**2.1.137.**

$l_{OA} = 0,04 \text{ м}; l_{AB} = l_{BC} = 0,06 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 30^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 500 \text{ с}^{-1}.$

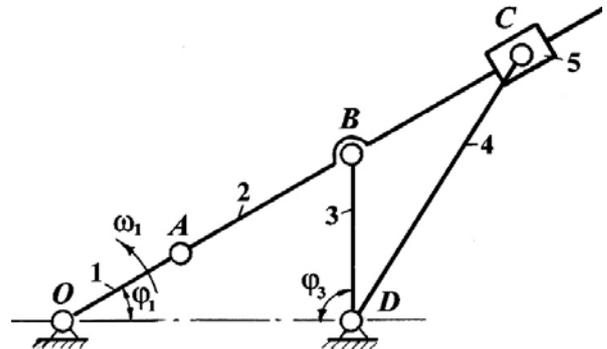


Рисунок 2.1.137

**2.1.138.**

$l_{OA} = 0,1 \text{ м}; l_{CE} = 0,2 \text{ м};$   
 $l_{OD} = l_{DE} = 0,15 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_5 = 90^\circ; \angle \varphi_3 = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}.$

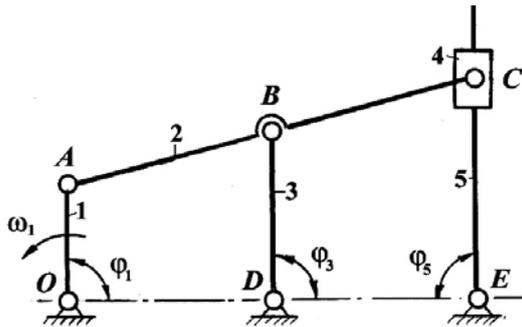


Рисунок 2.1.138

**2.1.139.**

$l_{OA} = 0,2 \text{ м}; l_{OD} = 0,3 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = \angle \varphi_3 = 90^\circ; \angle \varphi_{2,3} = 60^\circ;$   
 $\omega_1 = 50 \text{ с}^{-1}.$

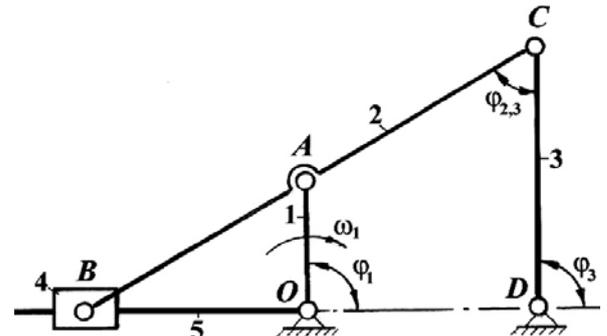


Рисунок 2.1.139

**2.1.140.**

$l_{OA} = 0,12 \text{ м}; l_{OB} = 0,3 \text{ м}; l_{BC} = 0,5 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,2 \text{ м}; l_h = 0,25 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 0^\circ, 110^\circ, 150^\circ;$   
 $\omega_1 = 10 \text{ с}^{-1}.$

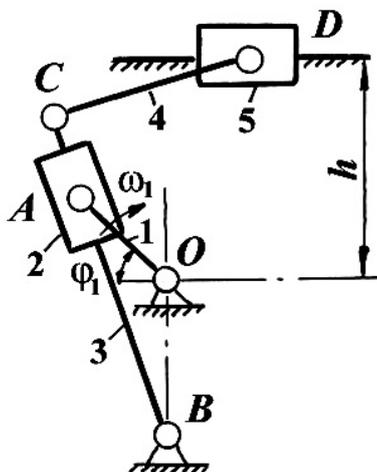


Рисунок 2.1.140

**2.1.141.**

$l_{AB} = 0,1 \text{ м}; l_{BC} = l_{CE} = 0,31 \text{ м};$   
 $l_{CD} = 0,26 \text{ м}; l_{AF} = 0,23 \text{ м}; l_{AD} = 0,45 \text{ м};$   
 $l_{FD} = 0,63 \text{ м};$   
 $\angle \varphi_1 = 90^\circ, 150^\circ, 180^\circ; \angle \alpha = 90^\circ;$   
 $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}.$

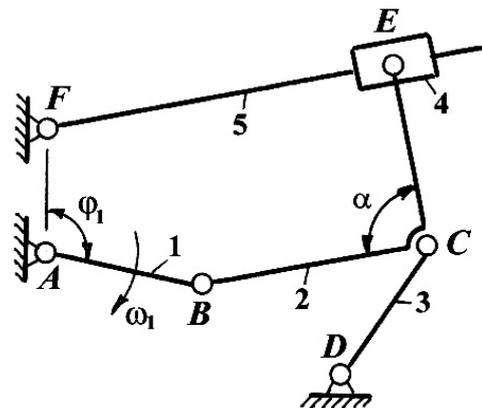


Рисунок 2.1.141

## 2.2 Кинематическое исследование зубчатых механизмов

Задачей кинематического исследования зубчатых механизмов является определение передаточного отношения через отношения размерных параметров их звеньев.

Передаточным отношением от звена  $a$  к звену  $k$  называется отношение угловой скорости  $\omega_a$  (или числа оборотов в минуту  $n_a$ ) звена  $a$  к угловой скорости  $\omega_k$  (или числа оборотов в минуту  $n_k$ ) звена  $k$ , то есть

$$U_{ak} = \frac{\omega_a}{\omega_k} = \frac{n_a}{n_k}.$$

Различают *одноступенчатые* передачи, такие, в которых имеются только два звена с неподвижными осями вращения, и *многоступенчатые*, в которых звеньев с неподвижными осями больше двух.

*Передаточные отношения одноступенчатых передач*

Для передачи с внешним зацеплением зубчатых колес (рисунок 2.8):

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = -\frac{r_{w_2}}{r_{w_1}} = -\frac{z_2}{z_1},$$

где  $r_{w_1}$  и  $r_{w_2}$  – радиусы начальных окружностей зубчатых колес 1 и 2;  
 $z_1$  и  $z_2$  – числа зубьев колес 1 и 2.

Знак «минус» указывает на то, что зубчатые колеса 1 и 2 вращаются в разные стороны.

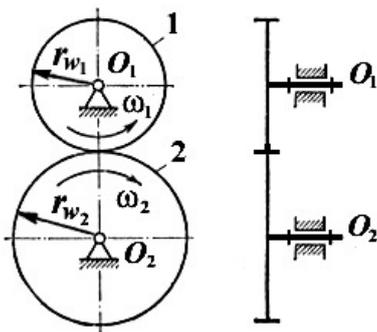


Рисунок 2.8 – Зубчатая передача с внешним зацеплением колес

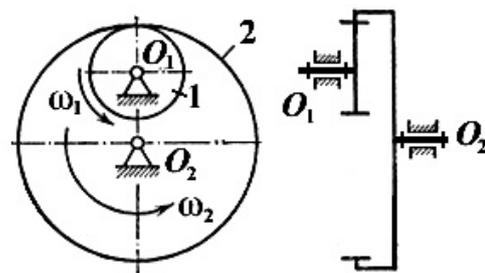


Рисунок 2.9 – Зубчатая передача с внутренним зацеплением колес

Для передачи с внутренним зацеплением зубчатых колес (рисунок 2.9)

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{r_{w_2}}{r_{w_1}} = \frac{z_2}{z_1}.$$

В данном случае передаточное отношение имеет знак «плюс», так как колеса 1 и 2 вращаются в одну сторону.

Для передачи с коническими колесами (рисунок 2.10):

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{r_{w2}}{r_{w1}} = \frac{z_2}{z_1}.$$

Знак данного передаточного отношения не определяется, так как угловая скорость в конической передаче не представляется параллельными векторами.

Для червячной передачи (рисунок 2.11)

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1},$$

где  $z_1$  – число заходов резьбы на червяке;

$z_2$  – числа зубьев колеса 2.

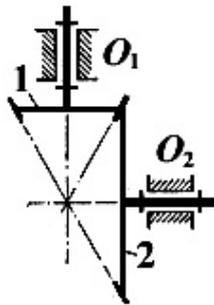


Рисунок 2.10 – Зубчатая передача с коническими колесами

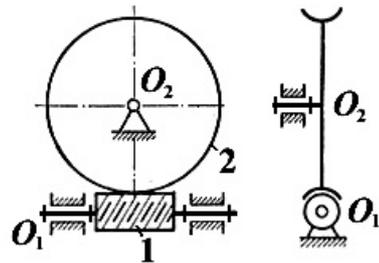


Рисунок 2.11 – Червячная передача

### *Многоступенчатые передачи*

Передаточное отношение многоступенчатой передачи (рисунок 2.12) равно произведению передаточных отношений отдельных последовательно включенных ступеней передачи, то есть

$$U_{1n} = U_{12}U_{23}U_{34}\dots U_{(n-1)n}.$$

Для определения числа ступеней можно руководствоваться следующим правилом: число ступеней равно числу неподвижных осей в передаче без единицы.

Знак многоступенчатой передачи, образованной цилиндрическими зубчатыми колесами будет зависеть от знаков одноступенчатых передач, входящих в ее состав.

### Зубчатые механизмы с подвижными осями

Различают три вида таких механизмов: планетарные, дифференциальные и замкнутые дифференциальные.

Основными признаками *планетарных* передач являются: число степеней свободы  $W = 1$ , одно из центральных колес неподвигно.

В *дифференциальных* механизмах:  $W > 1$ , центральное колесо – подвижно.

В *замкнутых дифференциальных* механизмах два звена с неподвижными осями вращения (центральное колесо или водило) соединяются дополнительной передачей.

Схемы простейших планетарных механизмов представлены на рисунке 2.12.

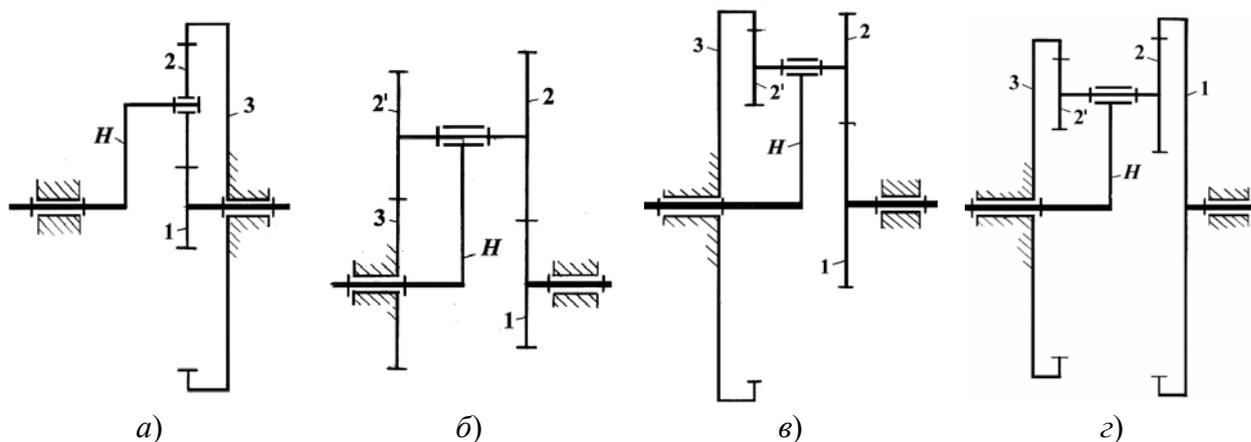


Рисунок 2.12 – Схемы планетарных механизмов

В планетарных механизмах неподвижными звеньями могут быть не только третьи колеса, но и первые.

При кинематическом исследовании планетарных механизмов используют метод обращенного движения, который состоит в том, что всему механизму (то есть всем его звеньям) сообщают угловую скорость, равную угловой скорости водила, но противоположно ей направленной, то есть  $-\omega_H$ . В обращенном движении механизма водило неподвигно, и мы получаем «обращенный» механизм с неподвижными осями колес.

Для планетарных механизмов (рисунок 2.12) передаточное отношение от колеса 1 к колесу 3 в обращенном движении, то есть при остановленном водиле  $H$ , определяется по формуле Виллиса:

$$U_{13}^H = \frac{\omega_1 - \omega_H}{-\omega_H} = -\frac{\omega_1}{\omega_H} + 1 = 1 - U_{1H}.$$

Откуда передаточное отношение от колеса 1 к водилу  $H$ :

$$U_{1H} = 1 - U_{13}^H.$$

Для передачи (рисунок 2.12а)

$$U_{13}^H = U_{12}^H U_{23}^H = \begin{pmatrix} -\frac{z_2}{z_1} \\ z_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_3 \\ z_2 \end{pmatrix} = -\frac{z_3}{z_2}.$$

Для передачи (рисунок 2.12б)

$$U_{13}^H = U_{12}^H U_{2'3}^H = \begin{pmatrix} -\frac{z_2}{z_1} \\ z_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_3 \\ z_{2'} \end{pmatrix} = \frac{z_2 z_3}{z_1 z_{2'}}.$$

Для передачи (рисунок 2.12в)

$$U_{13}^H = U_{12}^H U_{2'3}^H = \begin{pmatrix} -\frac{z_2}{z_1} \\ z_1 \end{pmatrix} \frac{z_3}{z_{2'}} = -\frac{z_2 z_3}{z_1 z_{2'}}.$$

Для передачи (рисунок 2.12г)

$$U_{13}^H = U_{12}^H U_{2'3}^H = \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_3}{z_{2'}} = \frac{z_2 z_3}{z_1 z_{2'}}.$$

Если в планетарных механизмах (рисунок 2.12) колесо 3 освободить, то есть оно станет подвижным, то получатся дифференциальные механизмы с числом степеней свободы  $W = 2$ .

В дифференциальных механизмах угловые скорости звеньев, также как и в планетарных механизмах, связаны формулой Виллиса:

$$U_{13}^H = \frac{\omega_1 - \omega_H}{\omega_3 - \omega_H}.$$

Определенность в движении звеньев дифференциального механизма будет в том случае, если будут известны законы движения двух его входных звеньев.

Механизмы замкнутого дифференциала имеют все признаки дифференциальных механизмов: все основные звенья подвижны, но на движения этих звеньев налагается дополнительное условие связи. Число степеней свободы замкнутых дифференциальных механизмов равно  $W = 1$ . Более подробные сведения о решении таких механизмов приведены в примерах 5 и 6.

**Пример 1.** Определить передаточное отношение  $U_{15}$  передачи (рисунок 2.13) и число оборотов в минуту колеса 5, если  $z_1 = 16$ ,  $z_2 = 48$ ,  $z_3 = 44$ ,  $z_{3'} = 20$ ,  $z_4 = 40$ ,  $n_1 = 330 \text{ мин}^{-1}$ . Все колеса имеют одинаковый модуль. Колеса 1, 3 и 5 – соосны.

*Решение.* Общее передаточное отношение механизма равно произведению передаточных отношений отдельных последовательно включенных ступеней:

$$U_{15} = U_{12}U_{2'3}U_{3'4}U_{45} = \left(-\frac{z_2}{z_1}\right)\left(-\frac{z_3}{z_{2'}}\right)\left(-\frac{z_4}{z_{3'}}\right)\frac{z_5}{z_4} = -\frac{z_2z_3z_5}{z_1z_{2'}z_{3'}}.$$

В данном механизме колесо 4 является промежуточным (паразитным) и не влияет на величину передаточного отношения.

Определим неизвестные числа зубьев колес 2' и 5 из условия соосности передачи

$$r_{w_1} + r_{w_2} = r_{w_{2'}} + r_{w_3},$$

или

$$\frac{mz_1}{2} + \frac{mz_2}{2} = \frac{mz_{2'}}{2} + \frac{mz_3}{2}.$$

Так как модули всех колес одинаковы, то

$$z_1 + z_2 = z_{2'} + z_3;$$

и, следовательно,

$$z_{2'} = z_1 + z_2 - z_3 = 16 + 48 - 44 = 20.$$

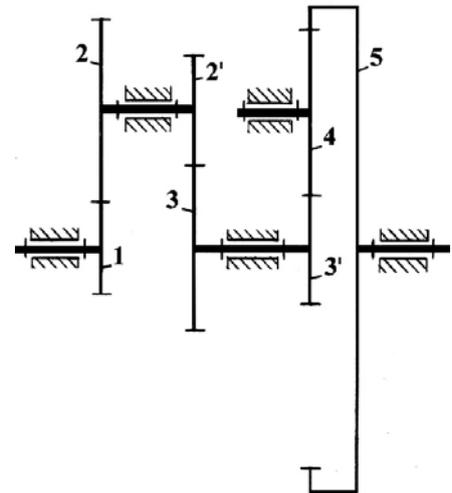


Рисунок 2.13 – Многоступенчатый зубчатый механизм

Условие соосности для третьей ступени

$$r_{w_{3'}} + 2r_{w_4} = r_{w_5}.$$

$$\frac{mz_{3'}}{2} + \frac{2mz_4}{2} = \frac{mz_5}{2},$$

откуда

$$z_5 = z_{3'} + 2z_4 = 20 + 2 \times 40 = 100.$$

Передаточное отношение механизма

$$U_{15} = -\frac{48 \times 44 \times 100}{16 \times 20 \times 20} = -33.$$

Знак «минус» показывает, что входное 1 и выходное 5 колеса вращаются в разные стороны.

Исходя из определения передаточного отношения

$$U_{15} = \frac{n_1}{n_5},$$

находим

$$n_5 = \frac{n_1}{U_{15}} = \frac{330}{-33} = -10 \text{ мин}^{-1}.$$

**Пример 2.** Для зубчатого механизма (рисунок 2.14) определить передаточное отношение  $U_{15}$ , если  $z_1 = z_4 = 30$ ,  $z_2 = z_5 = 20$ , а также найти число оборотов колеса 5 и сателлита 4 при  $n_1 = 50 \text{ мин}^{-1}$ . Все колеса имеют одинаковый модуль.

*Решение.* Устанавливаем, что редуктор двухступенчатый: первая ступень (не планетарная) – от колеса 1 к колесу 2; вторая (планетарная) – от водила  $H$  к колесу 5.

Общее передаточное отношение механизма

$$U_{15} = U_{12}U_{H5},$$

где  $U_{12} = -\frac{z_2}{z_1};$

$$U_{H5} = \frac{1}{U_{5H}} = \frac{1}{1 - U_{53}^H} = \frac{1}{1 - U_{54}^H U_{43}^H} = \frac{1}{1 - \left(-\frac{z_4}{z_5}\right)\left(\frac{z_3}{z_4}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{z_3}{z_5}}.$$

Неизвестное число зубьев колеса 3 определим из условия соосности колес 3 и 5

$$r_{w_3} = r_{w_5} + 2r_{w_4},$$

или

$$\frac{mz_3}{2} = \frac{mz_5}{2} + \frac{2mz_4}{2},$$

откуда

$$z_3 = z_5 + 2 \times z_4 = 20 + 2 \times 30 = 80.$$

Подставим числа зубьев колес в первоначальное уравнение и получим

$$U_{15} = \left(-\frac{20}{30}\right) \frac{1}{1 + \frac{80}{20}} = -0,13.$$

Число оборотов колеса 5 получим из уравнения

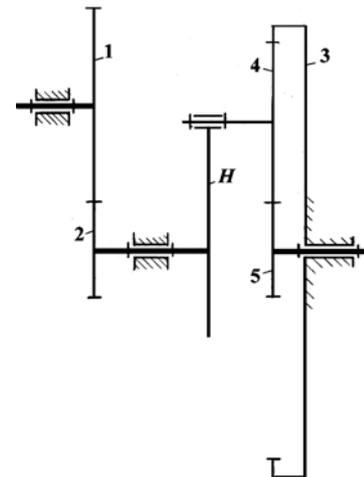


Рисунок 2.14 – Двухступенчатый зубчатый механизм

$$U_{15} = \frac{n_1}{n_5},$$

откуда

$$n_5 = \frac{n_1}{U_{15}} = \frac{50}{-0,13} = -384,6 \text{ мин}^{-1}.$$

Так как колесо 2 и водило  $H$  вращаются с одной угловой скоростью, число оборотов водила  $H$  определим из уравнения

$$U_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{n_1}{n_H} = -\frac{z_2}{z_1};$$

$$n_H = n_2 = -\frac{30}{20}n_1 = -\frac{30}{20} \times 50 = -75 \text{ мин}^{-1}.$$

Для определения числа оборотов сателлита 4 запишем формулу передаточного отношения планетарной передачи, состоящей из колеса 3, сателлита 4 и водила  $H$

$$\frac{n_4 - n_H}{n_3 - n_H} = U_{43}^H = \frac{z_3}{z_4}.$$

Так как  $n_3 = 0$ , а  $n_H = -75 \text{ мин}^{-1}$ , то

$$\frac{n_4 + 75}{75} = \frac{80}{30},$$

откуда  $n_4 = 125 \text{ мин}^{-1}$ , то есть сателлит 4 вращается в ту же сторону, что и колесо 1.

**Пример 3.** Для зубчатого механизма (рисунок 2.15) определить передаточное отношение  $U_{17}$ , если  $z_1 = z_2' = z_4 = z_5' = z_6' = 20$ ,  $z_2 = z_3 = z_5 = z_6 = 21$ ,  $z_7 = 65$ , а также найти число оборотов колеса 7 при  $n_1 = 1200 \text{ мин}^{-1}$ .

*Решение.* Устанавливаем, что данный механизм состоит из трех не планетарных ступеней (первая – от колеса 1 к колесу 2, вторая – от колеса 2' к колесу 3 и третья – от колеса 6' к колесу 7) и одной планетарной (от водила  $H$  к колесу 6).

Передаточное отношение механизма

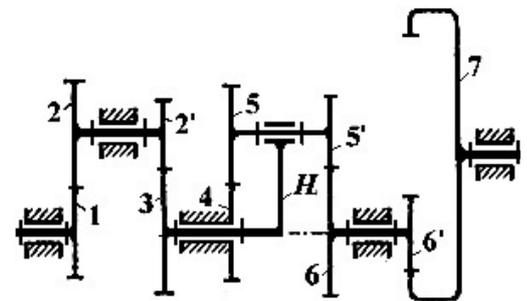


Рисунок 2.15 – Зубчатый механизм

$$U_{17} = U_{12}U_{2'3}U_{H6}U_{6'7}.$$

Определим передаточные отношения на планетарных ступенях:

$$U_{12} = -\frac{z_2}{z_1} = -\frac{21}{20} = -1,05;$$

$$U_{2'3} = -\frac{z_3}{z_{2'}} = -\frac{21}{20} = -1,05;$$

$$U_{6'7} = \frac{z_7}{z_{6'}} = \frac{65}{20} = 3,25.$$

Передаточное отношение планетарной ступени

$$U_{H6} = \frac{1}{U_{6H}} = \frac{1}{1-U_{64}^H} = \frac{1}{1-U_{65}^H U_{54}^H} = \frac{1}{1-\left(-\frac{z_{5'}}{z_6}\right)\left(-\frac{z_4}{z_5}\right)} = \frac{1}{1-\frac{20}{21} \times \frac{20}{21}} = 10,76.$$

Общее передаточное отношение механизма

$$U_{17} = (-1,05) \times (-1,05) \times 3,25 \times 10,76 = 38,55.$$

Так как передаточное отношение имеет знак «плюс», то входное звено 1 и выходное 7 вращаются в одну сторону.

Число оборотов в минуту колеса 7

$$n_7 = \frac{n_1}{U_{17}} = \frac{1200}{38,55} = 31,13 \text{ мин}^{-1}.$$

**Пример 4.** Для дифференциального механизма (рисунок 2.16) определить число оборотов колеса 4, если  $z_1 = 28$ ,  $z_2 = 24$ ,  $z_3 = 18$ ,  $z_{3'} = 26$  при  $n_H = 180 \text{ мин}^{-1}$  и  $n_1 = -410 \text{ мин}^{-1}$ . Колеса 1 и 4 соосны.

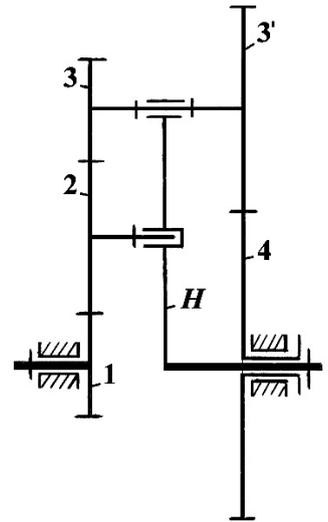
*Решение.* Устанавливаем, что данный механизм дифференциальный, так как

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 5 - 2 \times 5 - 3 = 2.$$

Передаточное отношение механизма от колеса 1 к колесу 4 при остановленном водиле  $H$  определяется как

$$\frac{n_1 - n_H}{n_4 - n_H} = U_{14}^H,$$

$$\text{где } U_{14}^H = U_{12}^H U_{23}^H U_{3'4}^H = \left(-\frac{z_2}{z_1}\right) \left(-\frac{z_3}{z_2}\right) \left(-\frac{z_4}{z_{3'}}\right) = -\frac{z_3 z_4}{z_1 z_{3'}}.$$



Число зубьев колеса 4 определим из условия соосности колес 1 и 4

Рисунок 2.16 – Дифференциальный зубчатый механизм

$$r_{w_1} + 2r_{w_2} + r_{w_3} = r_{w_{3'}} + r_{w_4};$$

$$\frac{mz_1}{2} + \frac{2mz_2}{2} + \frac{mz_3}{2} = \frac{mz_{3'}}{2} + \frac{mz_4}{2};$$

$$z_1 + 2z_2 + z_3 = z_{3'} + z_4;$$

$$z_4 = z_1 + 2z_2 + z_3 - z_{3'} = 28 + 2 \times 24 + 18 - 26 = 68.$$

Тогда

$$U_{14}^H = -\frac{18 \times 68}{28 \times 26} = -1,68.$$

Подставим значения  $n_1$ ,  $n_H$  и  $U_{14}^H$  в начальное уравнение и определим  $n_4$ :

$$\frac{-410 - 180}{n_4 - 180} = -1,68;$$

$$-1,68(n_4 - 180) = -590;$$

$$n_4 = \frac{590 + 1,68 \times 180}{1,68} = 531,2 \text{ мин}^{-1}.$$

Так как  $n_4$  имеет знак «плюс», то колесо 4 и водило H вращаются в одну сторону.

**Пример 5.** Для зубчатого механизма (рисунок 2.17) определить передаточное отношение  $U_{1H}$ , если  $z_1 = 28$ ,  $z_{1'} = 60$ ,  $z_2 = 42$ ,  $z_{2'} = 30$ ,  $z_3 = 40$ ,  $z_{3'} = 65$ ,  $z_4 = 20$ ,  $z_{4'} = 25$ .

*Решение.* Устанавливаем, что данный механизм состоит из дифференциальной ступени 1', 4, 4', 3' и  $H$  и замкнутой цепи 1, 2, 2', 3.

Число степеней свободы механизма

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 5 - 2 \times 5 - 4 = 1.$$

Таким образом, данный механизм является замкнутым дифференциальным механизмом.

При аналитическом определении передаточного отношения замкнутого дифференциального механизма необходимо придерживаться следующего порядка расчета:

- из состава механизма следует мысленно выделить основную его часть – дифференциал. Для этой части механизма справедлива формула Виллиса;
- выяснить, что представляет искомое передаточное отношение, и определить, угловые скорости каких звеньев требуют исключения из правой части формулы Виллиса;
- установить, какие возможности для исключения данных скоростей дает замыкающая цепь. Это приведет к составлению системы уравнений, определяющих соотношение скоростей вращения основных звеньев, исходя из условий замыкания;
- совместное решение правильно составленной формулы Виллиса с уравнениями, вытекающими из условия замыкания, позволит определить искомое передаточное отношение.

Придерживаясь такого порядка расчета для данного механизма составим формулу Виллиса для дифференциальной ступени

$$U_{1'3'}^H = \frac{n_{1'} - n_H}{n_{3'} - n_H} = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H}.$$

Для замкнутой цепи, как для ступенчатого ряда, можно записать

$$n_3 = n_{3'} = n_1 U_{31} = n_1 U_{32'} U_{21}.$$

Подставим полученную зависимость в формулу Виллиса и получим

$$U_{1'3'}^H = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = \frac{n_1 - n_H}{n_1 U_{31} - n_H}.$$

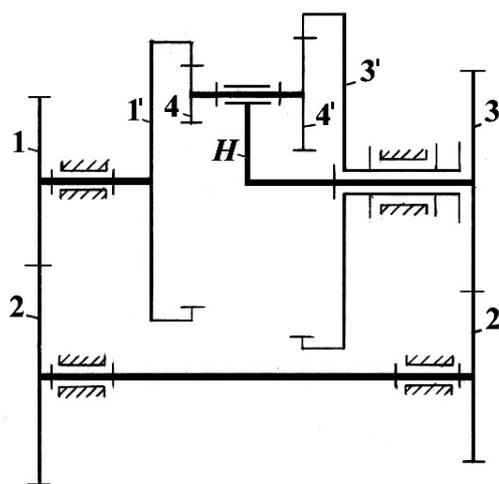


Рисунок 2.17 – Замкнутый дифференциальный механизм

Для определения искомого передаточного отношения  $U_{1'H}$  разделим числитель и знаменатель полученного равенства на  $n_H$ :

$$U_{1'3'}^H = \frac{\frac{n_1}{n_H} - 1}{\frac{n_3}{n_H} - 1} = \frac{U_{1H} - 1}{U_{1H}U_{31} - 1}.$$

Из полученного выражения определим

$$U_{1H} = \frac{U_{1'3'}^H - 1}{U_{1'3'}^H U_{31} - 1}.$$

Передаточные отношения  $U_{1'3'}^H$  и  $U_{31}$  определяются через числа колес

$$U_{1'3'}^H = \frac{z_4 z_{3'}}{z_1 z_4'};$$

$$U_{31} = \frac{z_2' z_1}{z_3 z_2}.$$

Тогда окончательное уравнение для определения  $U_{1H}$  будет иметь вид

$$U_{1H} = \frac{\frac{z_4 z_{3'}}{z_1 z_4'} - 1}{\frac{z_4 z_{3'}}{z_1 z_4'} \cdot \frac{z_2' z_1}{z_3 z_2} - 1}.$$

После подстановки числовых значений получим

$$U_{1'H} = \frac{\frac{20 \times 65}{60 \times 25} - 1}{\frac{20 \times 65}{60 \times 25} \times \frac{30 \times 28}{40 \times 42} - 1} = 0,235.$$

**Пример 6.** Для замкнутого дифференциального механизма (рисунок 2.18) определить передаточное отношение  $U_{1H}$ , если  $z_1 = 20$ ,  $z_2 = 40$ ,  $z_3 = 100$ ,  $z_3' = 40$ ,  $z_4 = 35$ ,  $z_5 = 110$ .

*Решение.* Устанавливаем, что данный механизм состоит из дифференциальной ступени 1, 2, 3 и  $H$  и замыкающей цепи 3', 4 и 5.

Для дифференциальной ступени механизма запишем формулу Виллиса:

$$U_{13}^H = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H}.$$

Для замыкающей цепи

$$n_{3'} = U_{3'5} n_5.$$

Если  $n_{3'} = n_3$  и  $n_5 = n_H$ , то

$$n_{3'} = U_{3'5} n_5 = n_3 = U_{3'5} n_H.$$

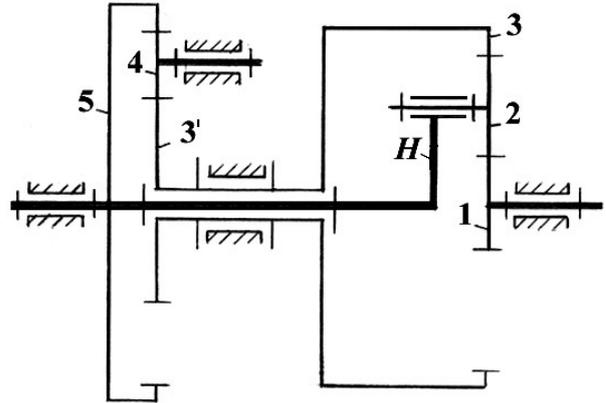


Рисунок 2.18 – Замкнутый дифференциальный механизм

Подставим в формулу Виллиса и получим

$$U_{13}^H = \frac{n_1 - n_H}{U_{3'5} n_H - n_H}.$$

Разделим числитель и знаменатель на  $n_H$

$$U_{13}^H = \frac{\frac{n_1}{n_H} - 1}{U_{3'5} - 1} = \frac{U_{1H} - 1}{U_{3'5} - 1}.$$

Выразим из полученного уравнения  $U_{1H}$ , получим

$$U_{1H} = U_{13}^H (U_{3'5} - 1) + 1.$$

Передаточные отношения  $U_{13}^H$  и  $U_{3'5}$  выразим через число зубьев и подставим в полученное уравнение:

$$U_{13}^H = -\frac{z_2 z_3}{z_1 z_2} = -\frac{z_3}{z_1};$$

$$U_{3'5} = -\frac{z_4 z_5}{z_{3'} z_4} = -\frac{z_5}{z_{3'}};$$

$$U_{1H} = -\frac{z_3}{z_1} \left( -\frac{z_5}{z_{3'}} - 1 \right) + 1.$$

Подставим числа зубьев колес и окончательно получим

$$U_{1H} = -\frac{100}{20} \left( \frac{110}{40} - 1 \right) + 1 = -7,75.$$

### Графическое исследование зубчатых механизмов

Графическое исследование зубчатых механизмов заключается в построении картины скоростей звена, которая представляет собой прямую линию, проведенную через концы векторов скоростей каких-либо двух точек звена.

Рассмотрим вначале наиболее *простой зубчатый механизм*, состоящий из двух цилиндрических колес. На рисунке 2.19, а в масштабе построена кинематическая схема такого механизма, составленного звеньями 1 и 2.

Проведем прямую  $yy$  параллельно линии центров колес  $O_1O_2$  и спроектируем на нее все характерные точки: получим точки  $o'_1, o'_2, c'$ . Из точки  $c'$  отложим перпендикулярно линии  $yy$  отрезок  $(c'c)$  (рисунок 2.19, б), который в некотором масштабе  $\mu_g$  будет изображать векторы скоростей точки  $C$  обоих колес (скорости точек касания начальных окружностей двух колес всегда одинаковы)

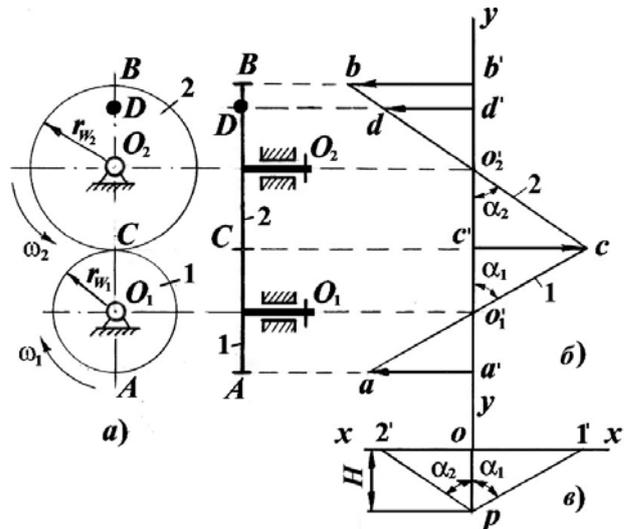


Рисунок 2.19 – Графическое исследование простого одноступенчатого зубчатого механизма

$$\vartheta_{C_1} = \vartheta_{C_2} = \mu_g(c'c).$$

Проведя через точки  $c$  и  $o'_1$  прямую 1 ( $c - o'_1 - a$ ), получим картину скоростей звена 1 (скорость точки  $O_1$  – оси вращения колеса равна нулю, поэтому точка  $o_1$  лежит на прямой  $yy$ ). Аналогично, проведя через точки  $c$  и  $o'_2$  прямую 2 ( $c - o'_2 - b$ ), получим картину скоростей звена 2. Таким образом, картина скоростей механизма построена. Векторы  $(a'a)$  и  $(b'b)$  изображают соответственно скорости точек  $A$  и  $B$  зубчатых колес. Для определения скорости какой-либо точки, например точки  $D$  колеса 2, нужно спроектировать эту точку на прямую 2 картины скоростей. Вектор  $(d'd)$  будет изображать скорость этой точки.

Угловые скорости звеньев пропорциональны углам между соответствующими прямыми и линией  $yy$ :

$$\omega_1 = \frac{\vartheta_{C_1}}{r_{w_1}} = \frac{\mu_g(c'c)}{\mu_l(r_{w_1})} = \frac{\mu_g}{\mu_l} \operatorname{tg} \alpha_1;$$

$$\omega_2 = \frac{\vartheta_{C_2}}{r_{w_2}} = \frac{\mu_g(c'c)}{\mu_l(r_{w_2})} = \frac{\mu_g}{\mu_l} \operatorname{tg} \alpha_2,$$

где  $(r_{w_1})$  и  $(r_{w_2})$  – масштабные величины радиусов начальных окружностей колес.

Выберем точку  $p$  и на произвольном расстоянии  $H$  от этой точки проведем прямую  $xx$ , перпендикулярную к  $yy$  (рисунок 2.19, в). Из точки  $p$  опустим на эту линию перпендикуляр  $po$ . Далее из точки  $p$  проведем линии  $p1'$  и  $p2'$ , параллельные соответственно линиям 1 и 2 картины скоростей. Тогда отрезки  $(o1')$  и  $(o2')$  на линии  $xx$  будут изображать в определенном масштабе соответственно угловые скорости  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Действительно:

$$\omega_1 = \frac{\mu_g}{\mu_l} \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\mu_g(o1')}{\mu_l H} = \mu_\omega(o1');$$

$$\omega_2 = \frac{\mu_g}{\mu_l} \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\mu_g(o2')}{\mu_l H} = \mu_\omega(o2'),$$

где  $\mu_\omega = \frac{\mu_g}{\mu_l H}$  – масштаб угловых скоростей.

Необходимо отметить, что масштабы  $\mu_g$  и  $\mu_\omega$  при построении картины линейных и угловых скоростей могут быть произвольными и их определять не следует.

Передаточное отношение механизма определяется из картины угловых скоростей:

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{(o1')}{(o2')}.$$

Так как отрезки  $(o1')$  и  $(o2')$  расположены по разные стороны от прямой  $po$ , то это значит, что угловые скорости звеньев направлены в противоположные стороны, то есть передаточное отношение имеет знак «минус».

Рассмотрим графическое исследование *планетарного редуктора*.

На рисунке 2.20, а в масштабе изображена кинематическая схема планетарного механизма. Проводим линию  $yy$ , параллельную линии центров, и проектируем на нее все характерные точки (рисунок 2.20, б).

От точки  $b'$  откладываем произвольный отрезок  $(b'b)$ , изображающий вектор скорости точки  $B$  колеса 1. Соединив точку  $b$  с точкой  $o'_1$  (скорость точки  $O_1$  равна нулю), получим прямую 1, которая является картиной скоростей колеса 1.

У колеса 2 известны скорость точки  $B$  (она такая же, как и скорость точки  $B$  колеса 1) и скорость точки  $C$  (ее скорость равна нулю).

Поэтому, соединяя точки  $b$  и  $c$ , получим прямую 2, которая является картиной скоростей колеса 2.

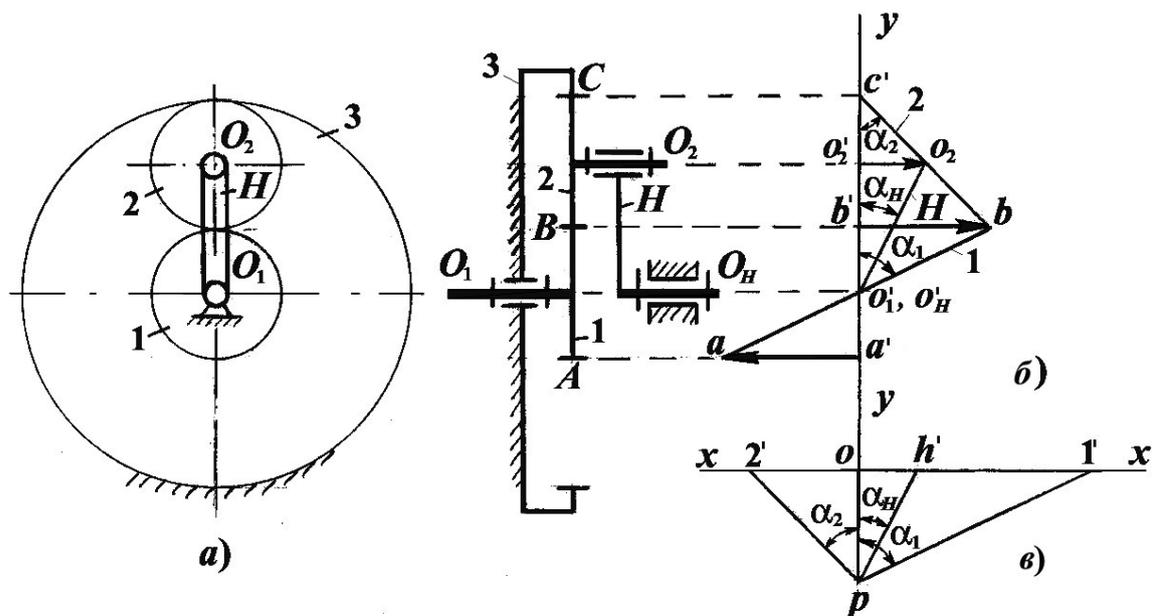


Рисунок 2.20 – Графическое исследование планетарного редуктора

У водила  $H$  известны также скорости двух точек: точки, совпадающей с центром  $O_2$  колеса 2 – скорость этой точки определяется отрезком  $(o'_2 o_2)$ , и точки, совпадающей с осью вращения водила  $O_1$ . Поэтому, соединяя точки  $o_2$  и  $o'_1$ , получим прямую  $H$ , которая является картиной скоростей водила.

Для построения картины угловых скоростей проводим прямую  $xx$  перпендикулярную линии центров к оси  $yy$ , из произвольно выбранной точки  $p$  проводим лучи, параллельные прямым 1, 2 и  $H$ , до пересечения с прямой  $xx$  (рисунок 2.20, в). Полученные отрезки  $(p1')$ ,  $(p2')$ ,  $(ph')$  пропорциональны соответствующим угловым скоростям  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_H$ .

Тогда передаточные отношения определяются аналогично предыдущим:

$$U_{1H} = \frac{\omega_1}{\omega_H} = \frac{(o1')}{(oh')};$$

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{(o1')}{(o2')}.$$

Рассмотрим графическое исследование *зубчатого механизма с планетарной ступенью* (звенья  $H$ , 3, 4-4' и 5) и *не планетарной* (звенья 1 и 2) (рисунок 2.21, а). Механизм вычерчен в масштабе  $\mu_l$ .

Проводим прямую  $yy$  и проектируем на нее все обозначенные на механизме точки (рисунок 2.21, б). От точки  $a'$  откладываем произвольный отрезок  $(a'a)$ , изображающий вектор скорости точки  $A$  колес 1 и 2. Соединив точку  $a$  с  $o'_1$ , получим картину скоростей колеса 1 (прямая 1). Соединив точку  $a$  с  $o'_2$ , получим картину скоростей колеса 2 (прямая 2). Так как колесо 2 и водило  $H$  являются одним звеном и вращаются с одинаковой угловой скоростью, проводим отрезок  $(a_2 o'_2)$  до пересечения с линией  $o'_4 o_4$ . Отрезок  $(o'_H o_4)$

изображает картину скоростей водила  $H$  (прямая  $H$ ). Соединим прямой точку  $o_4$  с точкой  $b'$  и продлим ее до пересечения с линией  $c's$ . Соединив точку  $c$  с точкой  $o'_5$ , получим отрезок  $(o'_5c)$ , изображающий картину скоростей колеса 5 (прямая 5). Прямая 4 изображает картину скоростей звена 4-4'.

Для построения картины угловых скоростей проводим прямую  $xh$ , перпендикулярную к оси  $yy$ , из произвольно выбранной точки  $p$  проводим лучи, параллельные прямым 1, 2,  $H$ , 4 и 5 до пересечения с прямой  $xh$  (рисунок 2.21, в). Полученные отрезки  $(o1')$ ,  $(o2')$ ,  $(oh')$ ,  $(o4')$  и  $(o5')$  пропорциональны соответствующим угловым скоростям  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_H$ ,  $\omega_4$  и  $\omega_5$ .

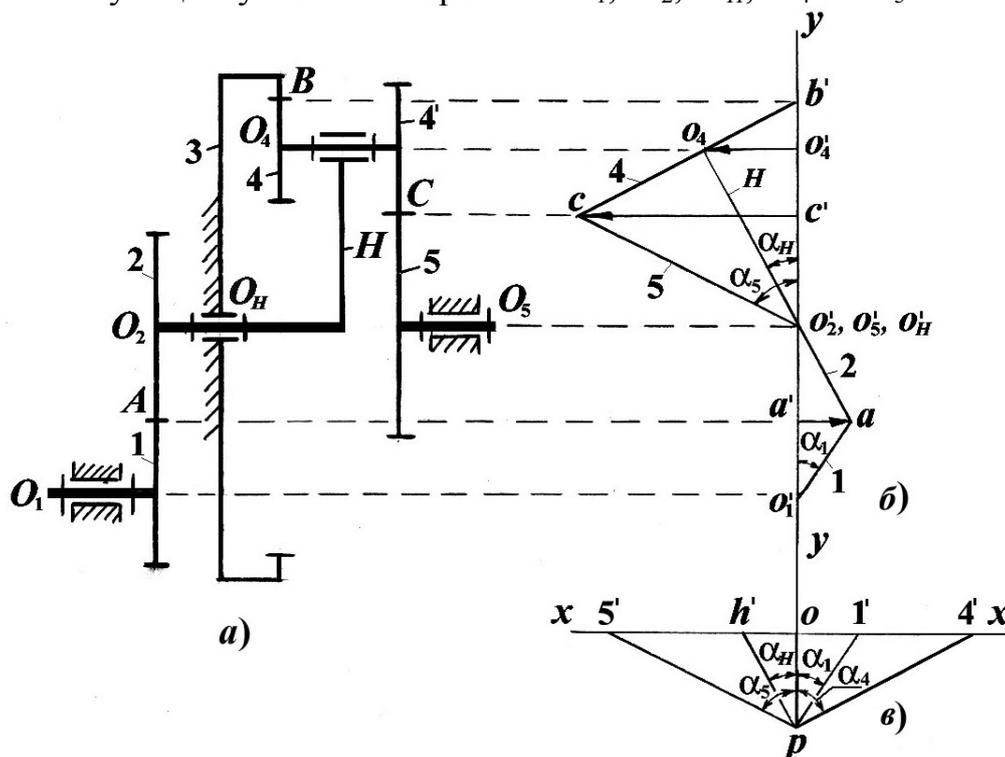


Рисунок 2.21 – Графическое исследование зубчатого механизма с планетарной и не планетарной ступенями

Тогда передаточные отношения механизма определим следующим образом:

$$U_{15} = \frac{\omega_1}{\omega_5} = \frac{(o1')}{(o5')};$$

$$U_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{(o1')}{(o2')};$$

$$U_{H5} = \frac{\omega_H}{\omega_5} = \frac{(oh')}{(o5')};$$

$$U_{H4} = \frac{\omega_H}{\omega_4} = \frac{(oh')}{(o4')}.$$

## Задачи 2.2.1 – 2.2.127

В задачах необходимо определить число степеней свободы зубчатого механизма  $W$ , указанное передаточное отношение  $U$ , частоту вращения  $n$  (либо угловую скорость  $\omega$ ) и из условия соосности валов – не заданные числа зубьев колес.

### 2.2.1.

$n_1 = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 20$ ;  
 $z_2 = 36$ ;  $z_2' = 17$ ;  $z_3 = 39$ ;  
 $z_3' = 34$ ;  $z_4 = 22$ .

**Определить:**

$W, U_{15}, n_5$ .

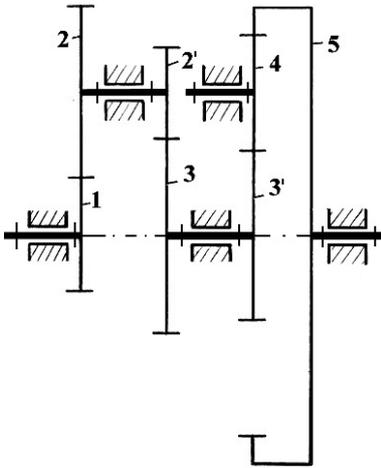


Рисунок 2.2.1

### 2.2.2.

$z_1 = 20$ ;  $z_2 = 18$ ;  
 $m = 6 \text{ мм}$ .

**Определить:**

$W, U_{13}, a_{w_{1,2}}$ .

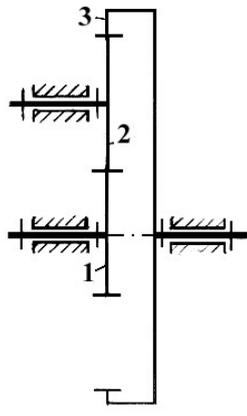


Рисунок 2.2.2

### 2.2.3.

$n_1 = 1200 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 32$ ;  $z_2 = 22$ ;  $z_2' = 18$ ;  
 $m = 12 \text{ мм}$ .

**Определить:**

$W, U_{13}, n_3, a_{w_{2',3}}$ .

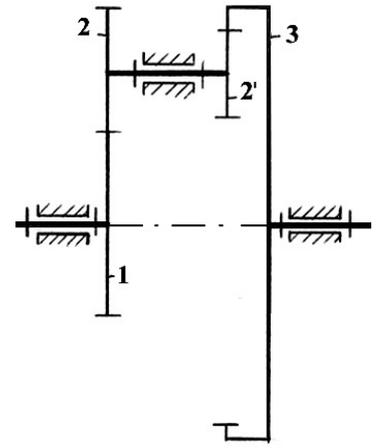


Рисунок 2.2.3

### 2.2.4.

$n_1 = 1100 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 30$ ;  
 $z_2 = 15$ ;  $z_3 = 35$ ;  $z_3' = 18$ .

**Определить:**

$W, U_{14}, n_4$ .

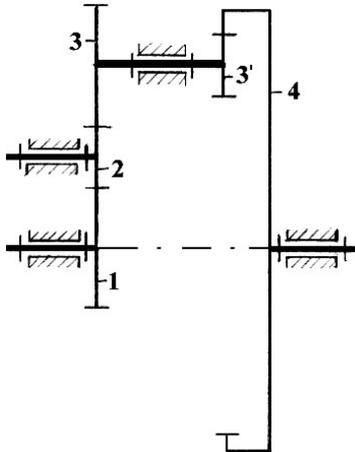


Рисунок 2.2.4

### 2.2.5.

$n_1 = 820 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 30$ ;  
 $z_2 = 25$ ;  $z_2' = 18$ ;  $m = 8 \text{ мм}$ .

**Определить:**

$W, U_{13}, n_3, a_{w_{2',3}}$ .

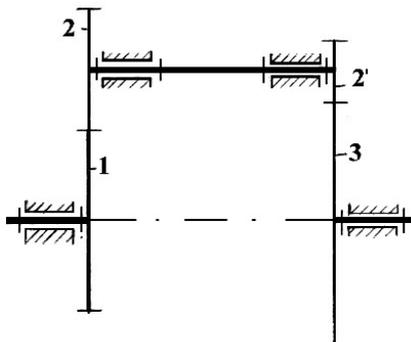


Рисунок 2.2.5

### 2.2.6.

$n_1 = 1640 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 128$ ;  
 $z_2 = 32$ ;  $z_3 = 144$ ;  
 $m = 10 \text{ мм}$ .

**Определить:**

$W, z_2', U_{13}, n_3, a_{w_{1,2}}$ .

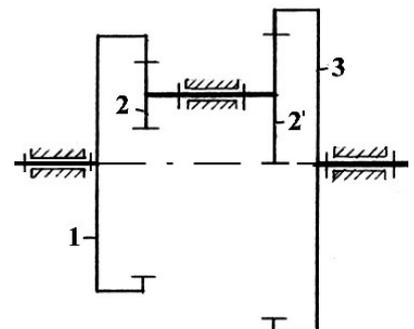


Рисунок 2.2.6

**2.2.7.**

$n_1 = 720 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 21$ ;  
 $z_2 = 125$ ;  $z_2' = 24$ ;  $z_3 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{13}$ ,  $n_3$ ,  $n_2$ .

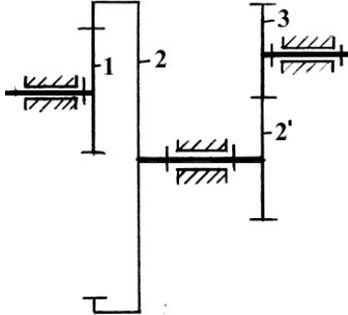


Рисунок 2.2.7

**2.2.8.**

$n_1 = 500 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 40$ ;  
 $z_3 = 80$ ;  $z_3' = 45$ ;  $z_4 = 40$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ ,  $n_4$ .

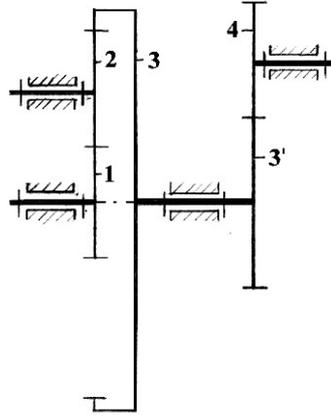


Рисунок 2.2.8

**2.2.9.**

$n_1 = 1240 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 22$ ;  
 $z_2 = 86$ ;  $z_2' = 24$ ;  $z_4 = 90$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ ,  $n_4$ .

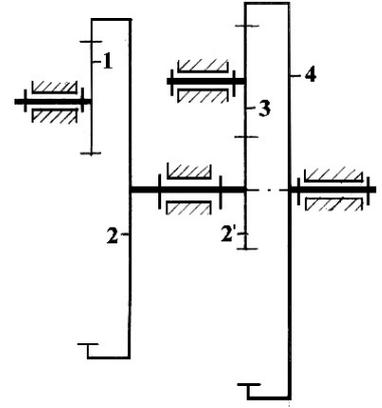


Рисунок 2.2.9

**2.2.10.**

$n_1 = 860 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 15$ ;  
 $z_2 = 34$ ;  $z_2' = 40$ ;  $z_3 = 20$ ;  
 $z_3' = 25$ ;  $z_4 = 52$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ ,  $n_4$ .

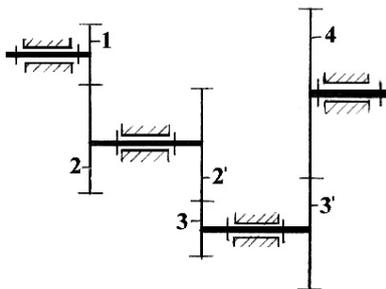


Рисунок 2.2.10

**2.2.11.**

$n_1 = 650 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 60$ ;  
 $z_2 = 18$ ;  $z_2' = 15$ ;  $z_3 = 25$ ;  
 $z_3' = 82$ ;  $z_4 = 116$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ ,  $n_4$ .

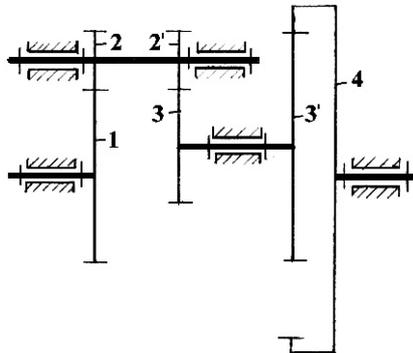


Рисунок 2.2.11

**2.2.12.**

$n_1 = 420 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_3 = -100 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2 = 42$ ;  $z_2' = 50$ .

**Определить:**

$W$ ,  $n_H$ .

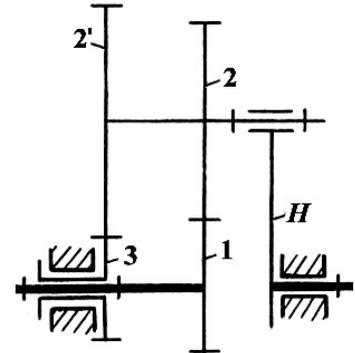


Рисунок 2.2.12

**2.2.13.**

$n_1 = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = z_2 = 24$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_H$ ,  $n_2$ .

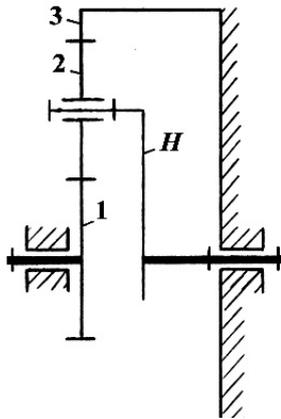


Рисунок 2.2.13

**2.2.14.**

$n_1 = 460 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_H = 210 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 19$ ;  $z_2 = 64$ ;  
 $z_3 = 22$ .

**Определить:**

$W$ ,  $n_3$ .

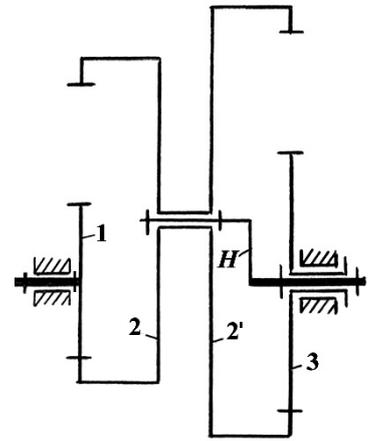


Рисунок 2.2.14

**2.2.15.**

$n_H = 360 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_1 = 210 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 106$ ;  $z_2 = 28$ ;  $z_2' = 20$ .

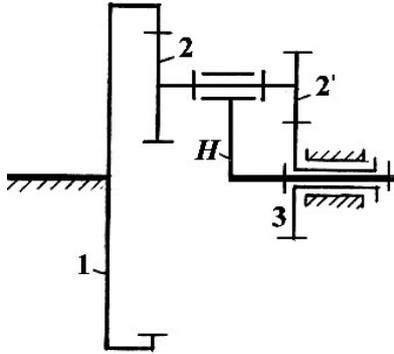
**Определить:** $W, U_{H3}, n_3, n_2$ .

Рисунок 2.2.15

**2.2.16.**

$n_H = 200 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 35$ ;  $z_2 = 19$ ;  $z_2' = 17$ .

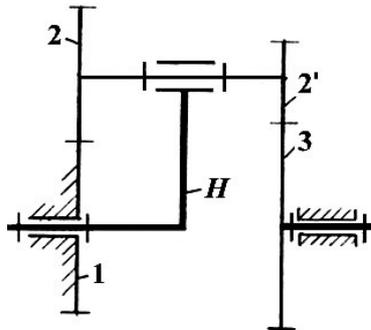
**Определить:** $W, U_{H3}, n_3, n_2$ .

Рисунок 2.2.16

**2.2.17.**

$n_H = 300 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 102$ ;  $z_2 = 15$ ;  $z_2' = 22$ .

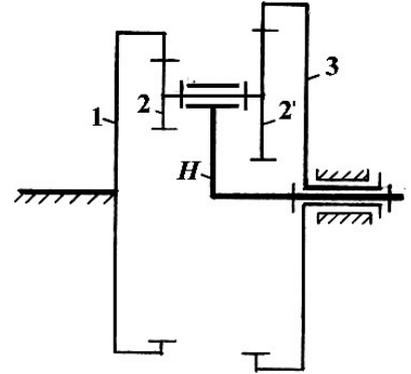
**Определить:** $W, U_{H3}, n_3$ .

Рисунок 2.2.17

**2.2.18.**

$n_1 = 360 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_H = 180 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2 = 74$ ;  $z_2' = 18$ .

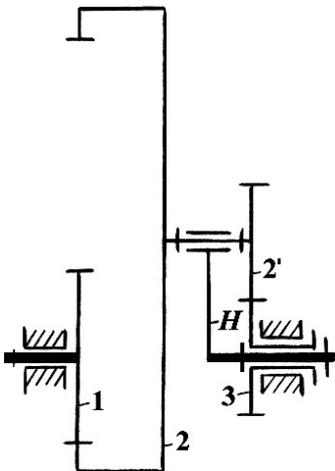
**Определить:** $W, n_3$ .

Рисунок 2.2.18

**2.2.19.**

$n_1 = 480 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2 = 18$ ;  $z_2' = 22$ .

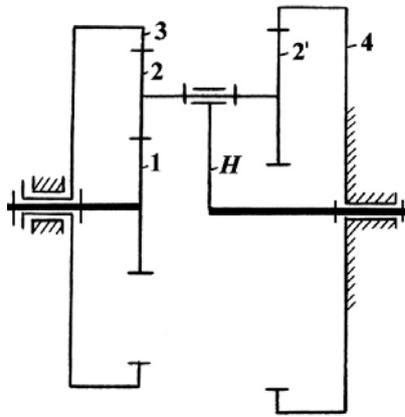
**Определить:** $W, U_{1H}, n_3, U_{13}$ .

Рисунок 2.2.19

**2.2.20.**

$n_H = 800 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 32$ ;  $z_2 = 110$ ;  $z_3 = 54$ .

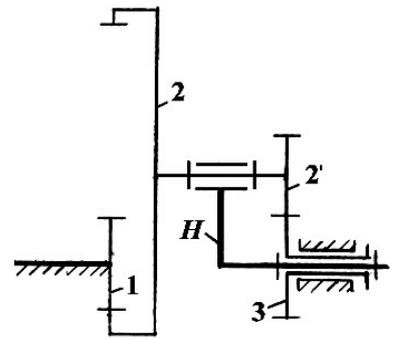
**Определить:** $W, z_2', U_{H3}, n_3, n_2$ .

Рисунок 2.2.20

**2.2.21.**

$n_H = 210 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 72$ ;  
 $z_2 = 28$ ;  
 $z_3 = 40$ .

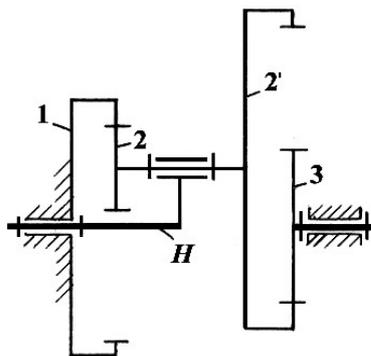
**Определить:** $W, z_2', U_{H3}, n_2, n_3$ .

Рисунок 2.2.21

**2.2.22.**

$n_H = 150 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_3 = 400 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 90$ ;  
 $z_2 = 30$ ;  
 $z_2' = 36$ .

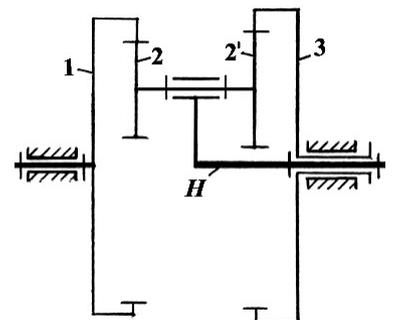
**Определить:** $W, z_3, n_1$ .

Рисунок 2.2.22

**2.2.23.**

$$n_H = 310 \text{ мин}^{-1};$$

$$n_1 = 1250 \text{ мин}^{-1};$$

$$z_1 = 50; z_2 = 20; z_2' = 17.$$

**Определить:**

$$W, n_3.$$

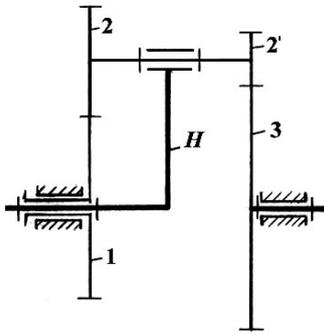


Рисунок 2.2.23

**2.2.24.**

$$n_1 = 500 \text{ мин}^{-1};$$

$$n_H = 220 \text{ мин}^{-1};$$

$$z_1 = 38; z_2 = 29; z_2' = 32.$$

**Определить:**

$$W, n_3, n_4.$$

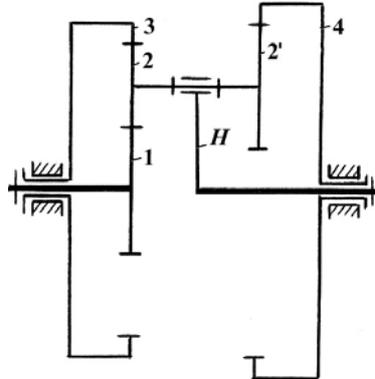


Рисунок 2.2.24

**2.2.25.**

$$n_H = 610 \text{ мин}^{-1};$$

$$z_1 = 22; z_2 = 65; z_3 = 30.$$

**Определить:**

$$W, z_2', U_{H3}, n_2, n_3.$$

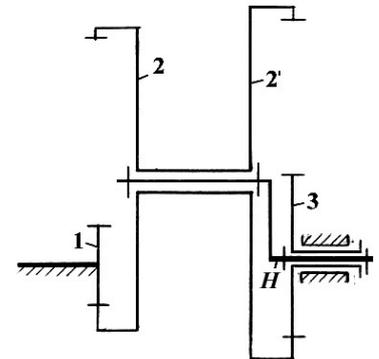


Рисунок 2.2.25

**2.2.26.**

$$n_1 = -120 \text{ мин}^{-1};$$

$$n_H = 400 \text{ мин}^{-1};$$

$$z_1 = 102; z_2 = 24;$$

$$z_2' = 18; z_3 = 20.$$

**Определить:**

$$W, n_4, n_2.$$

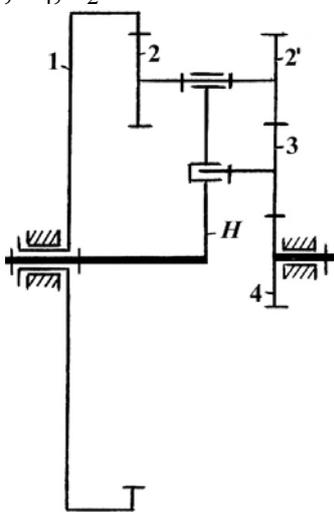


Рисунок 2.2.26

**2.2.27.**

$$n_H = 300 \text{ мин}^{-1};$$

$$z_1 = 30; z_2 = 50; z_3 = 45.$$

**Определить:**

$$W, U_{H1}, n_2, n_1.$$

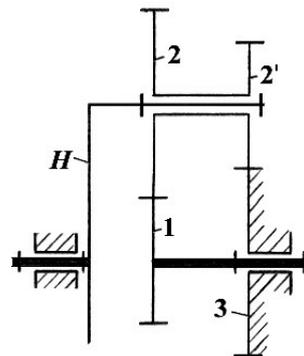


Рисунок 2.2.27

**2.2.28.**

$$n_1 = 600 \text{ мин}^{-1};$$

$$z_1 = 18; z_2 = 36; z_2' = 33;$$

$$z_3 = 90; z_4 = 87.$$

**Определить:**

$$W, U_{14}, n_4, n_H.$$

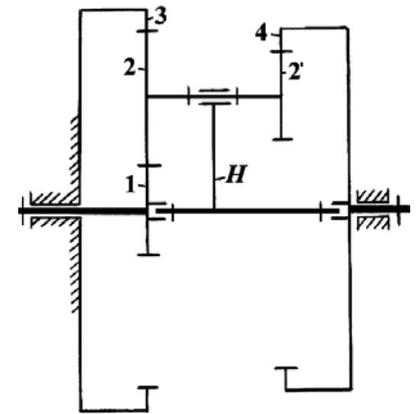


Рисунок 2.2.28

**2.2.29.**

$$n_H = 250 \text{ мин}^{-1};$$

$$z_1 = 28;$$

$$z_2 = 20;$$

$$z_2' = 24.$$

**Определить:**

$$W, U_{H1}, n_2, n_1.$$

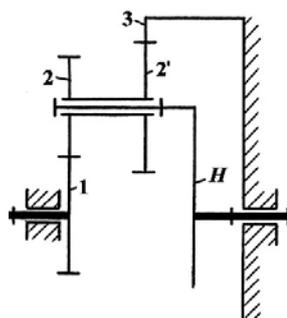


Рисунок 2.2.29

**2.2.30.**

$$n_1 = 250 \text{ мин}^{-1};$$

$$n_H = 450 \text{ мин}^{-1};$$

$$z_1 = 106;$$

$$z_2 = 28; z_2' = 32;$$

$$z_3 = 50; z_4 = 46.$$

**Определить:**

$$W, n_3, n_H.$$

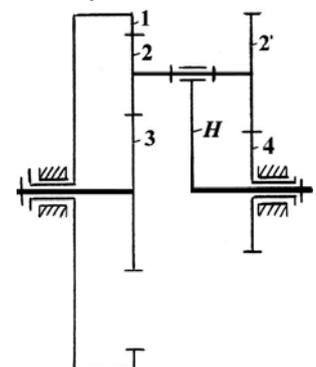


Рисунок 2.2.30

**2.2.31.**

$n_1 = 460 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 40$ ;  $z_2 = 25$ ;  
 $z_{2'} = 22$ ;  $z_3 = 43$ ;  $z_4 = 87$ .

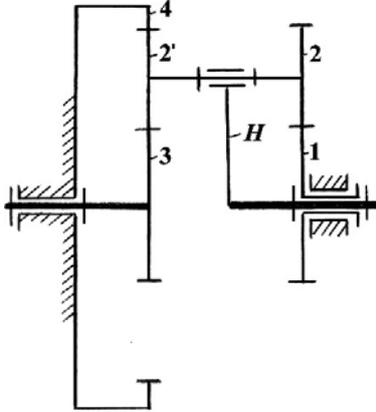
**Определить:** $W, n_3, n_H$ .

Рисунок 2.2.31

**2.2.32.**

$n_1 = 820 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 16$ ;  $z_2 = 24$ ;  
 $z_{2'} = 20$ ;  $z_3 = 64$ ;  $z_4 = 60$ .

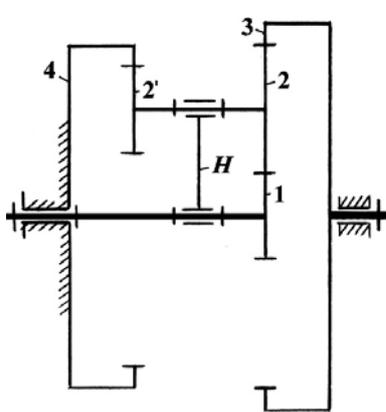
**Определить:** $W, U_{13}, U_{1H}, n_3, n_H$ .

Рисунок 2.2.32

**2.2.33.**

$n_H = 200 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_3 = 800 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 100$ ;  $z_2 = 20$ ;  $z_3 = 40$ .

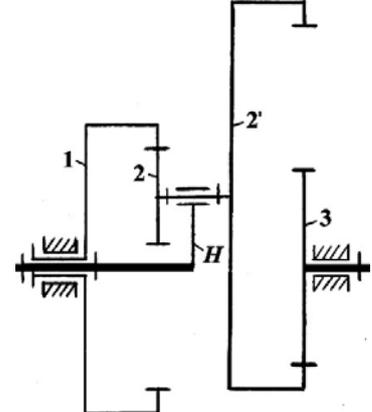
**Определить:** $W, z_{2'}, n_1$ .

Рисунок 2.2.33

**2.2.34.**

$n_H = 320 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_3 = 300 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 88$ ;  $z_2 = 30$ ;  $z_{2'} = 24$ .

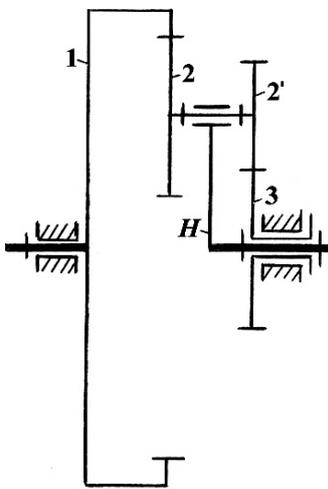
**Определить:**  $W, z_3, n_1$ .

Рисунок 2.2.34

**2.2.35.**

$n_H = 720 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_1 = 180 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 152$ ;  $z_2 = 30$ ;  
 $z_{2'} = 34$ ;  $z_3 = 28$ ;  $z_{3'} = 34$ .

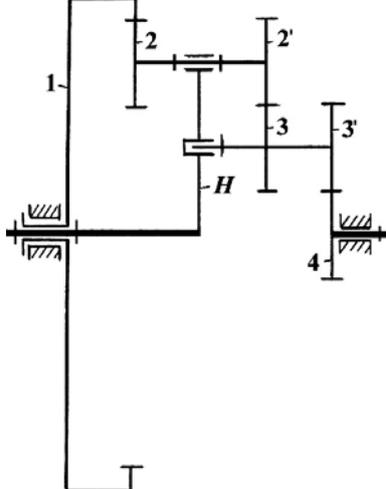
**Определить:**  $W, n_4, n_2$ .

Рисунок 2.2.35

**2.2.36.**

$n_H = 250 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 64$ ;  $z_2 = 36$ ;  
 $z_{2'} = 20$ ;  $z_3 = 24$ ;  $z_4 = 104$ .

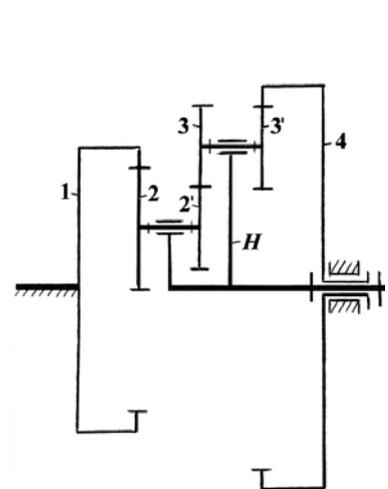
**Определить:** $W, U_{H4}, n_4, n_2$ .

Рисунок 2.2.36

**2.2.37.**

$n_H = 1100 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 65$ ;  
 $z_2 = 50$ ;  
 $z_{2'} = 30$ ;  
 $z_3 = 25$ ;  
 $z_{3'} = 80$ .

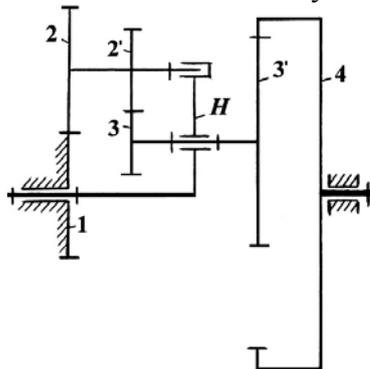
**Определить:** $W, U_{H4}, n_4$ .

Рисунок 2.2.37

**2.2.38.**

$n_H = 420 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_2 = 20$ ;  
 $z_{2'} = 18$ ;  
 $z_3 = 22$ ;  
 $z_{3'} = 18$ ;  
 $z_4 = 25$ .

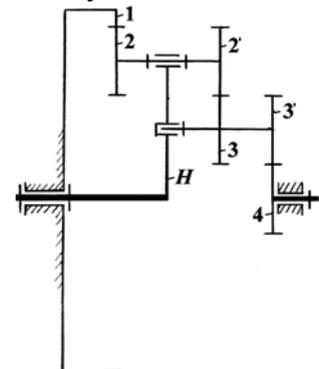
**Определить:** $W, U_{H4}, n_4$ .

Рисунок 2.2.38

**2.2.39.**

$n_H = -400 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_1 = 1200 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 40$ ;  $z_2 = 50$ ;  
 $z_2' = 20$ ;  $z_3 = 40$ ;  $z_3' = 60$ .

**Определить:**

$W$ ,  $n_4$ ,  $n_2$ .

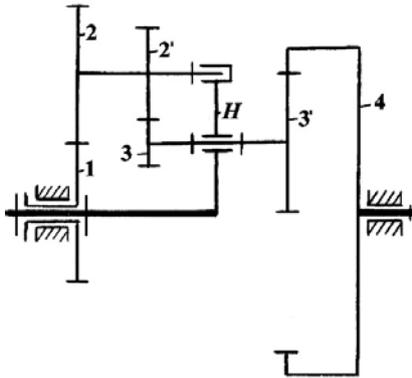


Рисунок 2.2.39

**2.2.40.**

$n_H = -200 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $n_1 = 280 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 84$ ;  $z_2 = 41$ ;  $z_2' = 18$ ;  
 $z_3 = 24$ ;  $z_3' = 26$ .

**Определить:**

$W$ ,  $n_4$ ,  $n_3$ .

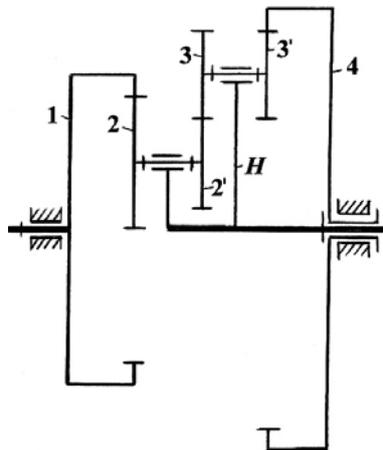


Рисунок 2.2.40

**2.2.41.**

$n_H = 160 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 82$ ;  $z_2 = 18$ ;  
 $z_2' = 20$ ;  $z_4 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H4}$ ,  $n_4$ .

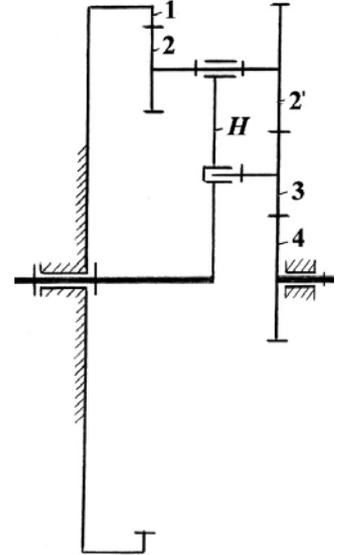


Рисунок 2.2.41

**2.2.42.**

$n_H = 420 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_3 = 24$ ;  
 $z_3' = 50$ ;  $z_4 = 66$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H4}$ ,  $n_4$ .

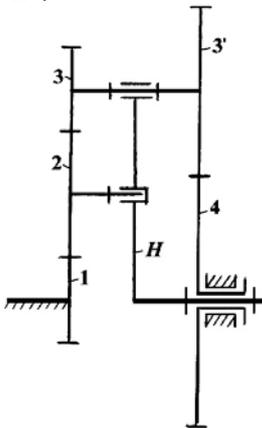


Рисунок 2.2.42

**2.2.43.**

$n_1 = 220 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_2 = 58$ ;  $z_2' = 30$ ;  
 $z_3 = 20$ ;  $z_4' = 20$ ;  $z_5 = 72$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_3$ ,  $n_H$ .

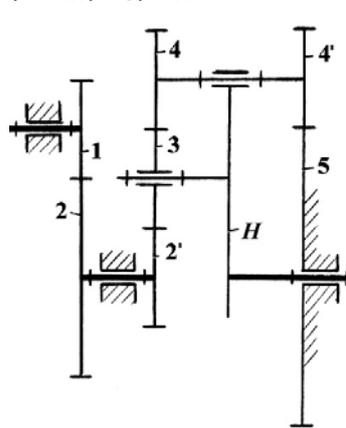


Рисунок 2.2.43

**2.2.44.**

$n_1 = 940 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $k_1 = 2$ ;  
 $z_2 = 94$ ;  $z_2' = 20$ ;  $z_3 = 30$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_3$ ,  $n_H$ .

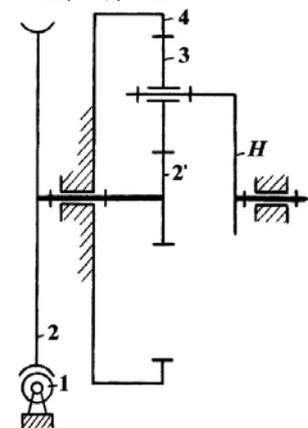


Рисунок 2.2.44

**2.2.45.**

$n_1 = 380 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 18$ ;  $z_2 = 40$ ;  
 $z_3 = 20$ ;  $z_3' = 18$ ;  
 $z_4 = 40$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ ,  $n_4$ ,  $n_3$ .

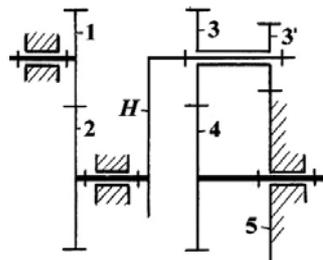


Рисунок 2.2.45

**2.2.46.**

$n_1 = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2 = 36$ ;  
 $z_3 = 40$ ;  $z_3' = 38$ ;  
 $z_4 = 50$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ ,  $n_4$ ,  $n_3$ .

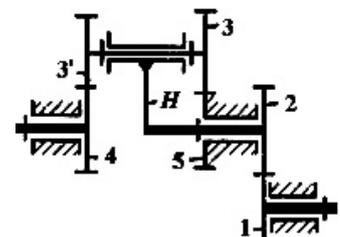


Рисунок 2.2.46

**2.2.47.**

$n_1 = 120 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2' = 25$ ;  
 $z_3 = 28$ ;  $z_4 = 80$ ;  $z_5 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{15}$ ,  $n_5$ ,  $n_H$ .

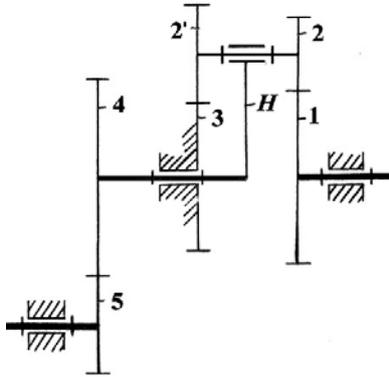


Рисунок 2.2.47

**2.2.48.**

$n_H = 520 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 70$ ;  $z_2 = 20$ ;  
 $z_3 = 25$ ;  $z_3' = 30$ ;  $z_4 = 28$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H1}$ ,  $n_1$ ,  $n_3$ .

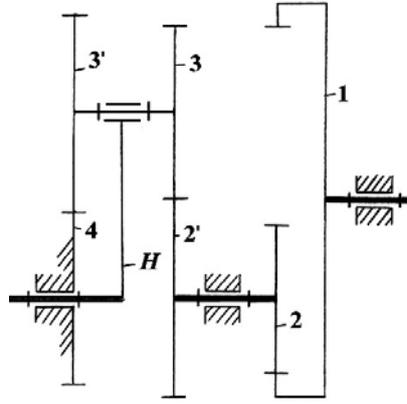


Рисунок 2.2.48

**2.2.49.**

$n_1 = 420 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 15$ ;  $z_2 = 40$ ;  
 $z_3 = 92$ ;  $z_4 = 68$ ;  $z_5 = 100$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{15}$ ,  $n_5$ ,  $n_4$ .

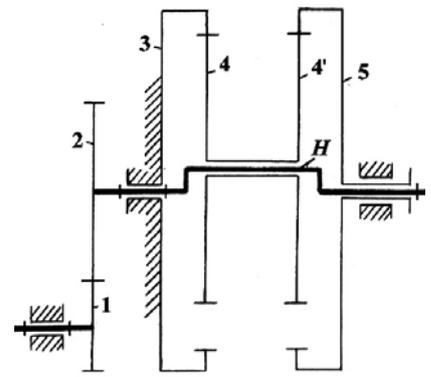


Рисунок 2.2.49

**2.2.50.**

$n_1 = 1710 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 18$ ;  $z_2 = 80$ ;  
 $z_2' = 90$ ;  $z_3 = 32$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_H$ ,  $n_3$ .

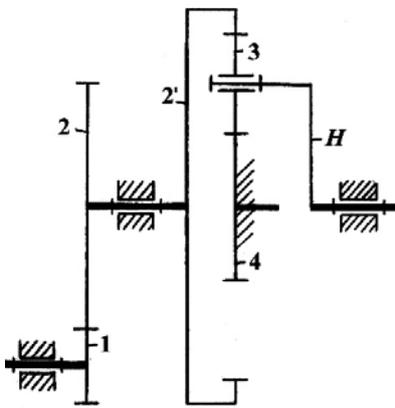


Рисунок 2.2.50

**2.2.51.**

$n_1 = 600 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_2 = 40$ ;  $z_2' = 20$ ;  
 $z_3' = 40$ ;  $z_4 = 25$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_H$ ,  $n_3$ .

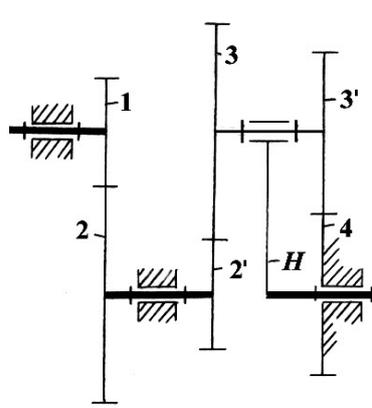


Рисунок 2.2.51

**2.2.52.**

$n_1 = 80 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 14$ ;  $z_2 = 42$ ;  
 $z_2' = 50$ ;  $z_3 = 15$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_H$ ,  $n_3$ .

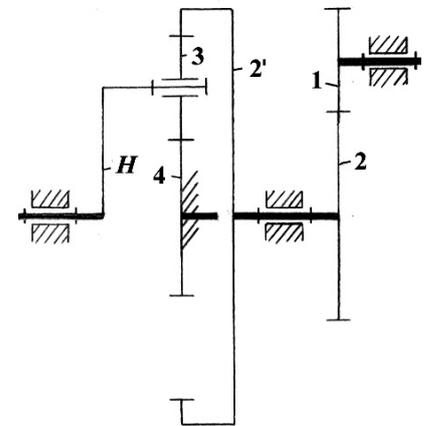


Рисунок 2.2.52

**2.2.53.**

$n_1 = 450 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 40$ ;  
 $z_2 = 30$ ;  
 $z_3 = 90$ ;  
 $z_4 = 25$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{15}$ ,  $n_5$ ,  $n_4$ .

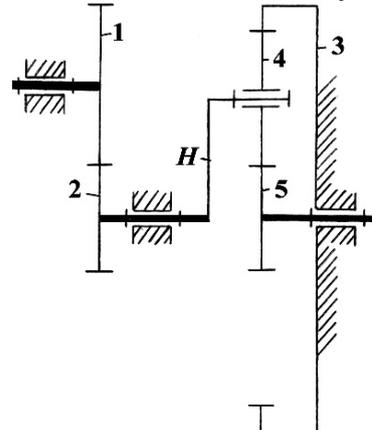


Рисунок 2.2.53

**2.2.54.**

$n_H = 180 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  
 $z_2 = 48$ ;  
 $z_2' = 20$ ;  
 $z_3 = 50$ ;  
 $z_4 = 35$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H1}$ ,  $n_1$ ,  $n_3$ .

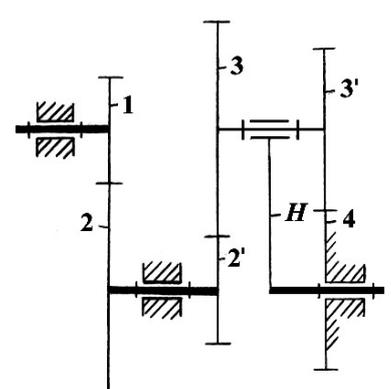


Рисунок 2.2.54

**2.2.55.**

$n_1 = 600 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 10$ ;  $z_2 = 45$ ;  $z_2' = 10$ ;  
 $z_3 = 50$ ;  $z_3' = 18$ ;  $z_4 = 24$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_4$ ,  $n_H$ .

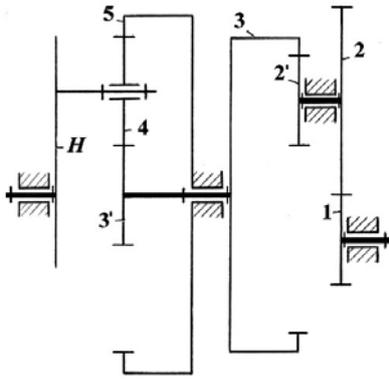


Рисунок 2.2.55

**2.2.56.**

$n_1 = 1460 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_H = 130$ ;  $z_3 = 28$ ;  
 $z_3' = 22$ ;  $z_4' = 24$ ;  $z_5 = 20$ ;  
 $z_6 = 24$ ;  $z_6' = 15$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{17}$ ,  $n_7$ ,  $n_H$ .

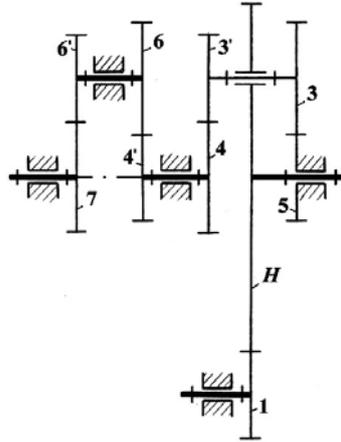


Рисунок 2.2.56

**2.2.57.**

$n_{H_1} = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2 = 20$ ;  $z_2' = 22$ ;  
 $z_4 = 32$ ;  $z_5 = 25$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H_1 6}$ ,  $n_6$ ,  $n_2$ .

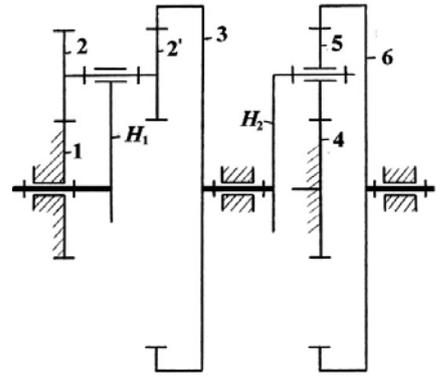


Рисунок 2.2.57

**2.2.58.**

$n_{H_1} = 1250 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 28$ ;  $z_2 = 20$ ;  
 $z_3 = 30$ ;  $z_3' = 18$ ;  
 $z_4 = 22$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H_1 H_2}$ ,  $n_3$ ,  $n_{H_2}$ .

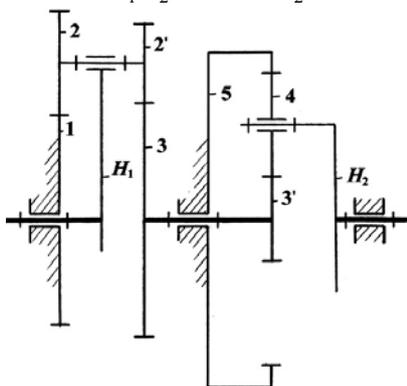


Рисунок 2.2.58

**2.2.59.**

$n_1 = 2100 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_2 = 30$ ;  
 $z_4 = 20$ ;  $z_5 = 30$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H_2}$ ,  $n_2$ ,  $n_{H_2}$ .

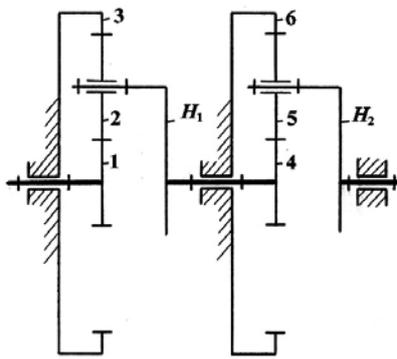


Рисунок 2.2.59

**2.2.60.**

$n_1 = 980 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 70$ ;  $z_2 = 20$ ;  $z_2' = 24$ ;  
 $z_4 = 40$ ;  $z_5' = 22$ ;  $z_6 = 50$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{16}$ ,  $n_6$ ,  $n_H$ .

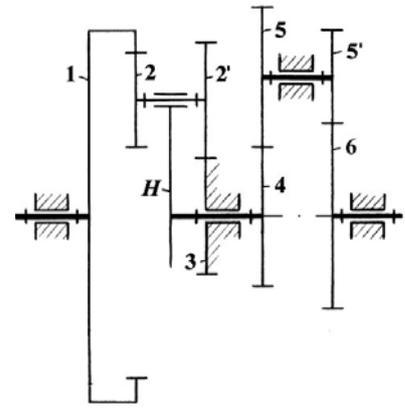


Рисунок 2.2.60

**2.2.61.**

$n_1 = 410 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 40$ ;  $z_2 = 30$ ;  
 $z_2' = 20$ ;  $z_3 = 50$ ;  
 $z_4 = 35$ ;  $z_4' = 28$ ;  
 $z_5 = 50$ ;  
 $z_5' = 30$ ;  $z_6 = 90$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{16}$ ,  $n_6$ ,  $n_4$ ,  $n_H$ .

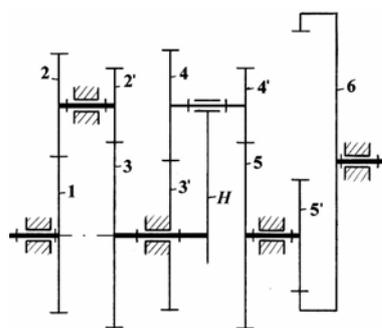


Рисунок 2.2.61

**2.2.62.**

$n_1 = 820 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 96$ ;  $z_2 = 24$ ;  
 $z_3 = 48$ ;  $z_3' = 30$ ;  
 $z_4 = 64$ ;  $z_5 = 60$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{15}$ ,  $n_5$ ,  $n_2$ .

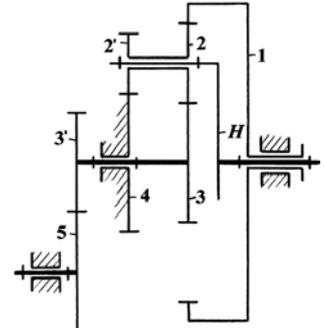


Рисунок 2.2.62

**2.2.63.**

$n_1 = 1100 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_2 = 18$ ;  $z_2' = 26$ ;  
 $z_4 = 22$ ;  $z_5 = 18$ ;  $z_5' = 26$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H_2}$ ,  $n_2$ ,  $n_{H_1}$ ,  $n_{H_2}$ .

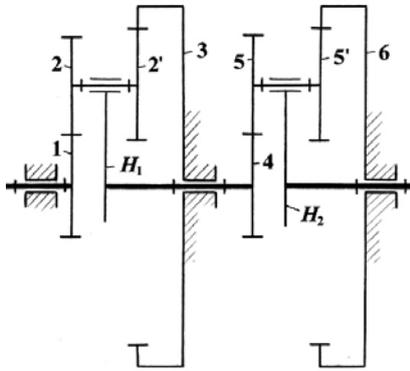


Рисунок 2.2.63.

**2.2.64.**

$n_{H_2} = 720 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 25$ ;  $z_2 = 20$ ;  
 $z_4 = 25$ ;  $z_5 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H_23}$ ,  $n_3$ .

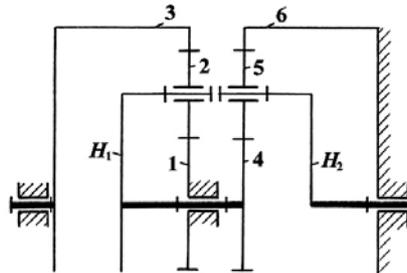


Рисунок 2.2.64

**2.2.65.**

$n_1 = 2200 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2 = 40$ ;  $z_2' = 28$ ;  
 $z_3' = 35$ ;  $z_4 = 40$ ;  $z_5 = 100$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_4$ ,  $n_H$ .

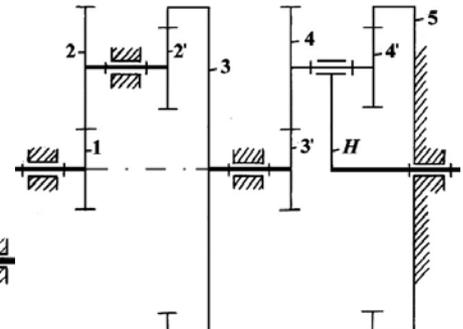


Рисунок 2.2.65

**2.2.66.**

$n_1 = 800 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2 = 20$ ;  $z_2' = 35$ ;  
 $z_3 = 15$ ;  $z_3' = 75$ ;  
 $z_4 = 30$ ;  $z_4' = 40$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_4$ ,  $n_H$ .

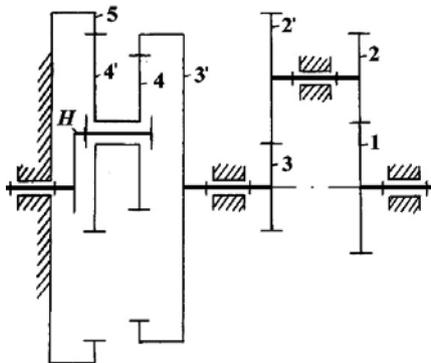


Рисунок 2.2.66

**2.2.67.**

$n_1 = 1320 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 18$ ;  $z_H = 100$ ;  
 $z_2 = 40$ ;  $z_3 = 24$ ;  $z_4 = 44$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{12}$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ .

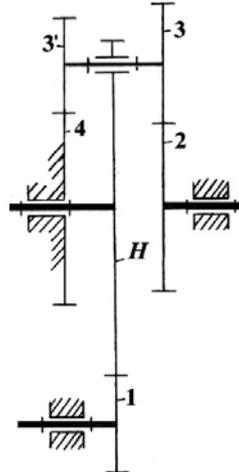


Рисунок 2.2.67

**2.2.68.**

$n_1 = 810 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 18$ ;  
 $z_2 = 24$ ;  $z_2' = 15$ ;  $z_3 = 15$ ;  
 $z_4 = 30$ ;  $z_4' = 25$ ;  $z_5 = 25$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_5$ ,  $n_H$ .

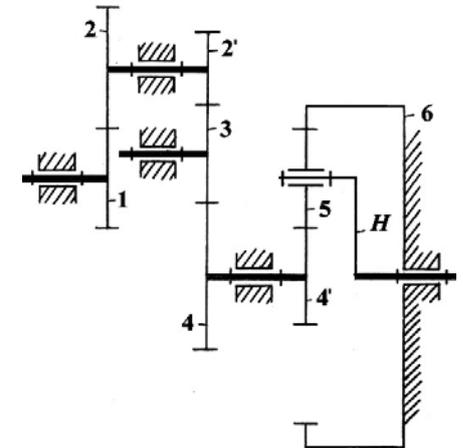


Рисунок 2.2.68

**2.2.69.**

$n_H = 600 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 18$ ;  $z_2 = 24$ ;  
 $z_2' = 22$ ;  
 $z_3' = 15$ ;  
 $z_4 = 13$ ;  $z_4' = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H1}$ ,  $n_1$ ,  $n_4$ .

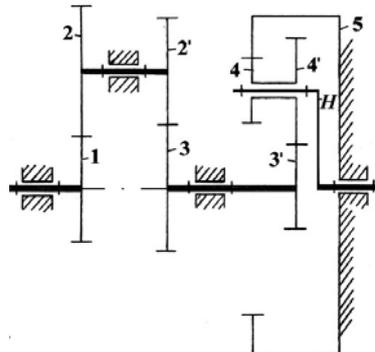


Рисунок 2.2.69

**2.2.70.**

$n_1 = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 18$ ;  $z_2 = 30$ ;  
 $z_2' = 20$ ;  $z_3 = 22$ ;  
 $z_4 = 36$ ;  $z_4' = 22$ ;  
 $z_5 = 30$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_5$ ,  $n_H$ .

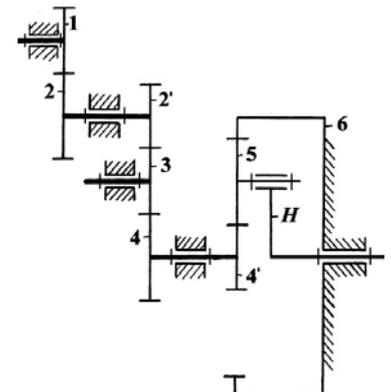


Рисунок 2.2.70

**2.2.71.**

$n_1 = 420 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 14$ ;  $z_2 = 22$ ;  
 $z_4 = 10$ ;  $z_4' = 12$ ;  
 $z_5 = 16$ ;  $z_6 = 90$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{16}$ ,  $n_6$ ,  $n_5$ .

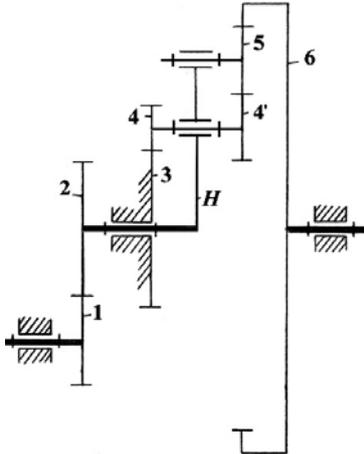


Рисунок 2.2.71

**2.2.72.**

$n_7 = 900 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 80$ ;  $z_3 = 20$ ;  $z_3' = 40$ ;  
 $z_4 = 17$ ;  $z_4' = 30$ ;  $z_5 = 25$ ;  
 $z_6 = 21$ ;  $z_7 = 21$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{7H}$ ,  $n_2$ ,  $n_H$ .

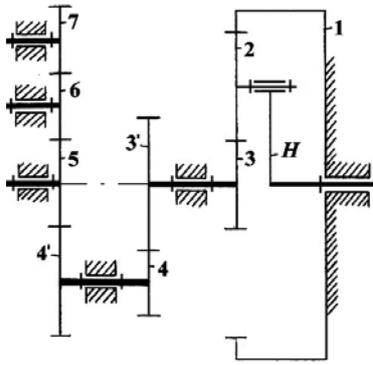


Рисунок 2.2.72

**2.2.73.**

$n_1 = 1800 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 40$ ;  $z_2 = 90$ ;  $z_2' = 25$ ;  
 $z_3 = 36$ ;  $z_3' = 20$ ;  $z_5 = 30$ ;  
 $z_6 = 18$ ;  $z_7 = 24$ ;  $z_7' = 22$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{18}$ ,  $n_8$ ,  $n_H$ .

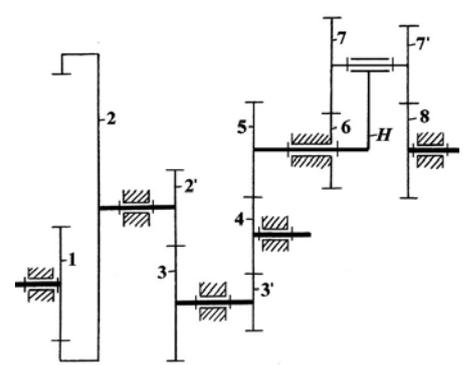


Рисунок 2.2.73

**2.2.74.**

$\omega_1 = 100 \text{ с}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_2 = 60$ ;  $z_2' = 30$ ;  
 $z_2'' = 21$ ;  $z_4 = 101$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ ,  $\omega_H$ ,  $\omega_4$ .

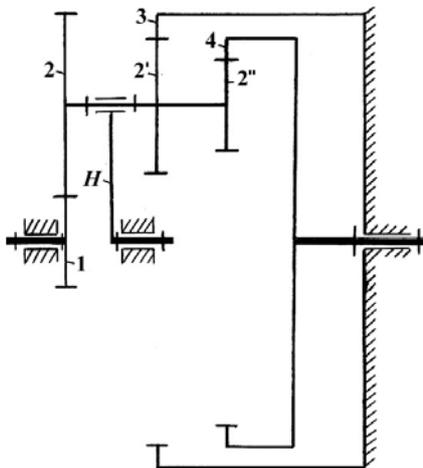


Рисунок 2.2.74

**2.2.75.**

$n_1 = 1200 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_2 = 60$ ;  $z_4 = 62$ ;  
 $z_5 = 18$ ;  $z_5' = 20$ ;  $z_6 = 60$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{16}$ ,  $n_6$ .

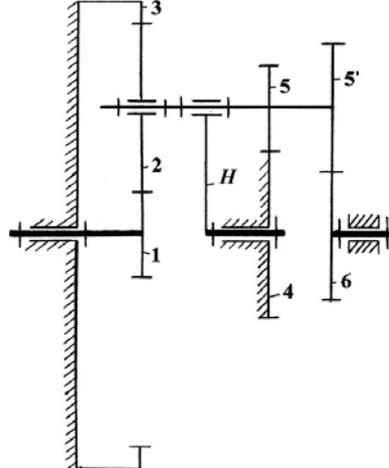


Рисунок 2.2.75

**2.2.76.**

$n_1 = 2100 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 22$ ;  $z_3 = 72$ ;  
 $z_4 = 22$ ;  $z_6 = 72$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H_2}$ ,  $n_{H_1}$ ,  $n_{H_2}$ ,  $n_5$ .

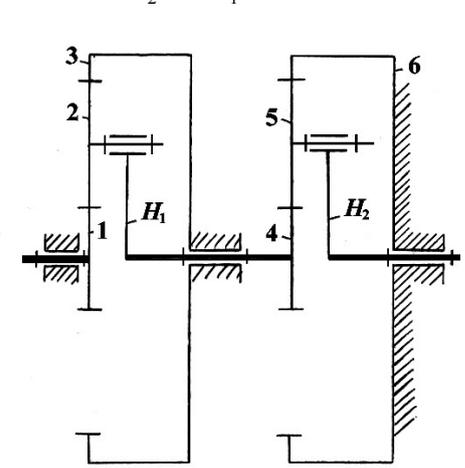


Рисунок 2.2.76

**2.2.77.**

$n_1 = 520 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 18$ ;  $z_2 = 30$ ;  
 $z_2' = 15$ ;  
 $z_2'' = 24$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H1}$ ,  $n_1$ ,  $n_3$ .

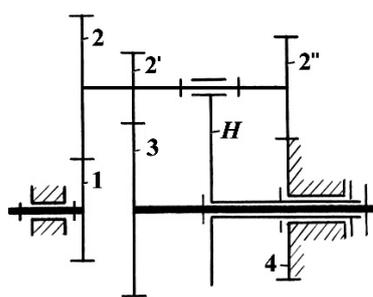


Рисунок 2.2.77

**2.2.78.**

$n_1 = 2800 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 108$ ;  $z_2 = 20$ ;  
 $z_2' = 60$ ;  $z_3 = 28$ ;  
 $z_4 = 32$ ;  $z_5 = 40$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ ,  $n_4$ ,  $n_5$ ,  $n_H$ .

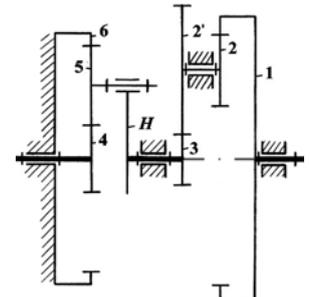


Рисунок 2.2.78

**2.2.79.**

$n_6 = 920 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 90$ ;  $z_2 = 35$ ;  $z_3 = 90$ ;  
 $z_4 = 35$ ;  $z_5 = 25$ ;  $z_6 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{6H}$ ,  $n_2$ ,  $n_H$ .

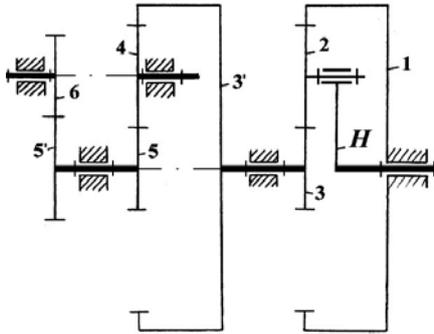


Рисунок 2.2.79

**2.2.80.**

$n_1 = 2100 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 60$ ;  $z_2 = 30$ ;  $z_3 = 120$ ;  
 $z_5 = 45$ ;  $z_5' = 30$ ;  $z_6 = 120$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{16}$ ,  $n_6$ ,  $n_2$ .

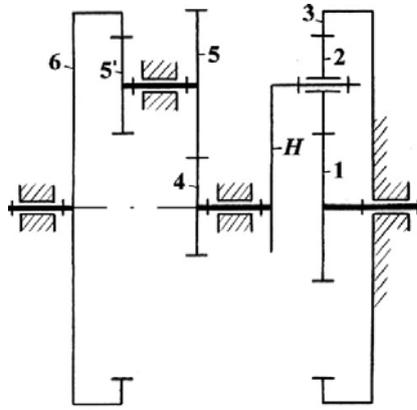


Рисунок 2.2.80

**2.2.81.**

$n_1 = 880 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 40$ ;  $z_2 = 60$ ;  $z_2' = 20$ ;  
 $z_3 = 80$ ;  $z_3' = 90$ ;  $z_4 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_4$ ,  $n_H$ .

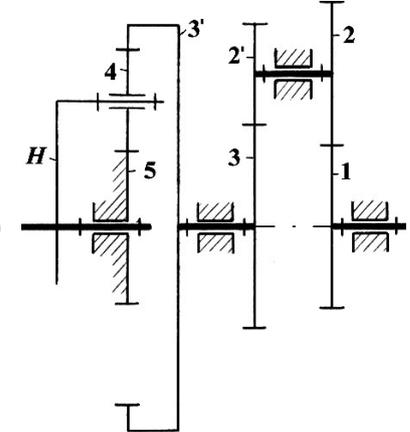


Рисунок 2.2.81

**2.2.82.**

$n_1 = 180 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 22$ ;  $z_2 = 24$ ;  $z_3 = 20$ ;  
 $z_4 = 60$ ;  $z_4' = 25$ ;  $z_5 = 75$ ;  
 $z_5' = 40$ ;  $z_6 = 30$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_6$ ,  $n_H$ .

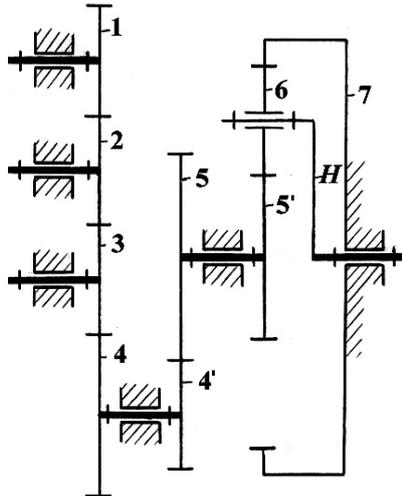


Рисунок 2.2.82

**2.2.83.**

$n_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 28$ ;  $z_2 = 28$ ;  $z_2' = 20$ ;  
 $z_2'' = 38$ ;  $z_3 = 18$ ;  $z_4 = 36$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_4$ ,  $n_H$ .

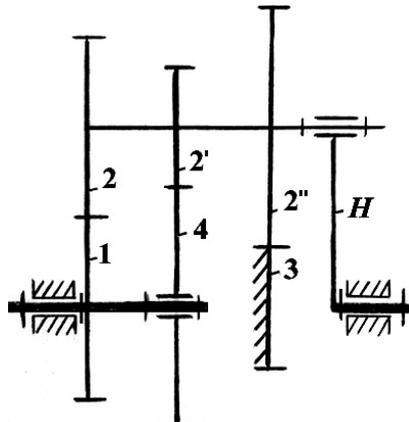


Рисунок 2.2.83

**2.2.84.**

$n_1 = 600 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_2 = 38$ ;  
 $z_2' = 18$ ;  $z_2'' = 16$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ ,  $n_4$ ,  $n_2$ .

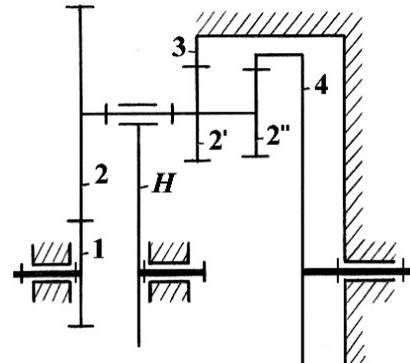


Рисунок 2.2.84

**3.1.85.**

$n_1 = 1400 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 15$ ;  $z_2 = 45$ ;  
 $z_3 = 75$ ;  $z_4 = 45$ ;  
 $z_5 = 15$ ;  $z_5' = 17$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{16}$ ,  $n_6$ ,  $n_5$ .

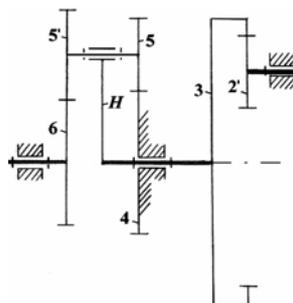


Рисунок 2.2.85

**2.2.86.**

$n_1 = 760 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 20$ ;  $z_2 = 40$ ;  
 $z_3 = 30$ ;  $z_4 = 90$ ;  
 $z_4' = 30$ ;  $z_6 = 90$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_5$ ,  $n_H$ .

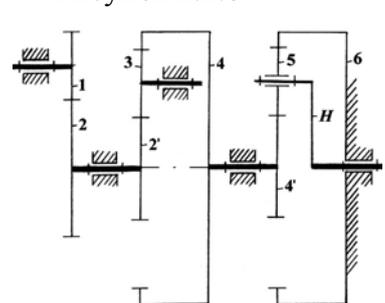


Рисунок 2.2.86

**2.2.87.**

$n_1 = 580 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 14$ ;  $z_2 = 26$ ;  
 $z_4 = 18$ ;  $z_4' = 22$ ;  $z_5 = 22$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{16}$ ,  $n_6$ .

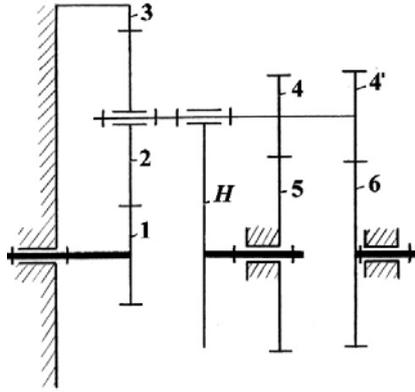


Рисунок 2.2.87

**2.2.88.**

$n_H = 200 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 120$ ;  
 $z_2 = 30$ ;  $z_2' = 40$ ;  $z_3' = 120$ ;  
 $z_4 = 30$ ;  $z_4' = 50$ ;  $z_5 = 40$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H5}$ ,  $n_5$ ,  $n_2$ .

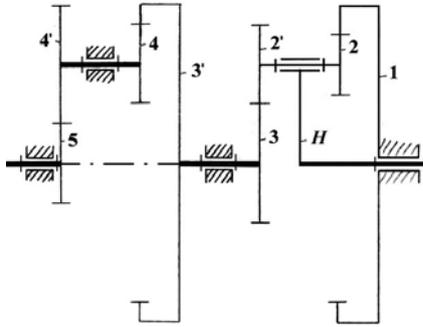


Рисунок 2.2.88

**2.2.89.**

$n_1 = 720 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 22$ ;  $z_2 = 30$ ;  $z_2' = 20$ ;  
 $z_3 = 32$ ;  $z_4 = 18$ ;  $z_5 = 32$ ;  
 $z_5' = 30$ ;  $z_6' = 24$ ;  $z_7 = 60$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{17}$ ,  $n_7$ ,  $n_5$ .

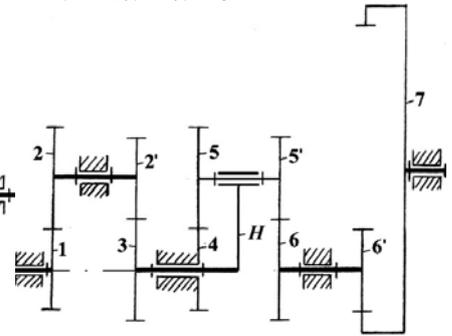


Рисунок 2.2.89

**2.2.90.**

$n_3 = 180 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 32$ ;  
 $z_2 = 28$ ;  $z_4 = 26$ ;  $z_5 = 30$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{3H_2}$ ,  $n_{H_2}$ .

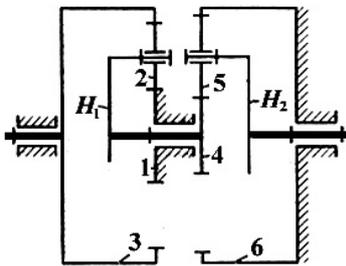


Рисунок 2.2.90

**2.2.91.**

$n_H = 740 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2 = 18$ ;  $z_2' = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H_4}$ ,  $n_4$ ,  $n_2$ ,  $U_{H_1}$ ,  $n_1$ .

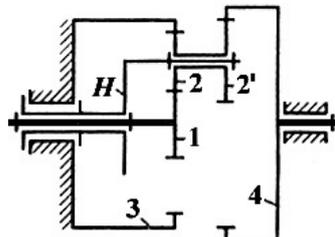


Рисунок 2.2.91

**2.2.92.**

$n_1 = 820 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 24$ ;  $z_2 = 22$ ;  $z_3' = 60$ ;  
 $z_4 = 26$ ;  $z_4' = 30$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{15}$ ,  $n_5$ ,  $n_2$ .

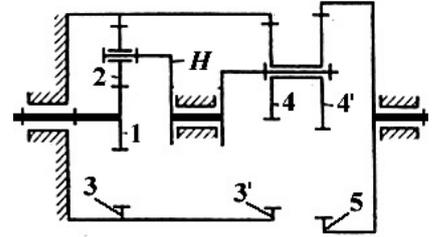


Рисунок 2.2.92

**2.2.93.**

$n_1 = 1520 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_2 = 40$ ;  $z_2' = 25$ ;  
 $z_3 = 60$ ;  $z_3' = 22$ ;  $z_4 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_4$ ,  $n_H$ .

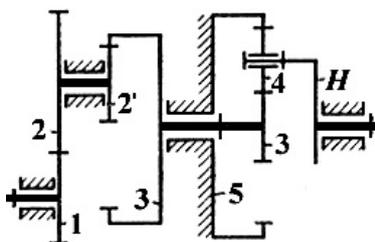


Рисунок 2.2.93

**2.2.94.**

$n_H = 210 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 26$ ;  $z_2 = 30$ ;  $z_2' = 20$ ;  
 $z_3 = 32$ ;  $z_3' = 30$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{H_1}$ ,  $n_1$ ,  $n_3$ .

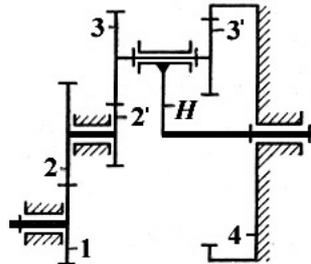


Рисунок 2.2.94

**2.2.95.**

$n_1 = 820 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 30$ ;  
 $z_2 = 20$ ;  $z_4 = 24$ ;  $z_5 = 22$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H_2}$ ,  $n_{H_2}$ ,  $n_2$ .

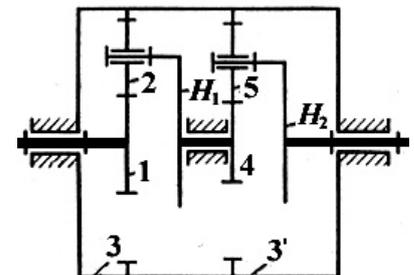


Рисунок 2.2.95

**2.2.96.**

$n_1 = 960 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 18$ ;  $z_2 = 30$ ;  $z_2' = 26$ ;  
 $z_3 = 22$ ;  $z_3' = 20$ ;  $z_4 = 26$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_4$ ,  $n_H$ .

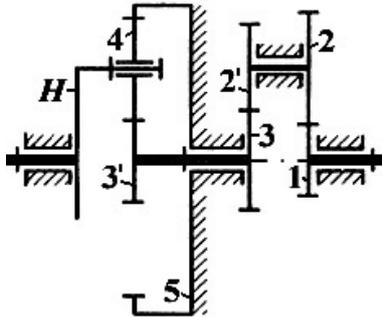


Рисунок 2.2.96

**2.2.97.**

$n_1 = 600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 16$ ;  
 $z_2 = 38$ ;  $z_2' = 26$ ;  $z_3 = 80$ ;  
 $z_3' = 77$ ;  $z_4 = 30$ ;  $z_5 = 17$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{13}$ ,  $n_3$ .

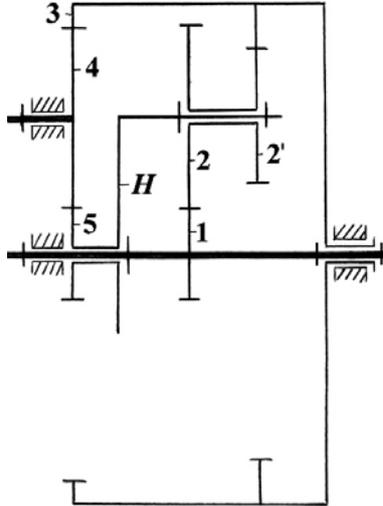


Рисунок 2.2.97

**2.2.98.**

$n_1 = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 42$ ;  $z_2 = 18$ ;  $z_2' = 40$ ;  
 $z_2'' = 15$ ;  $z_3 = 45$ ;  $z_4 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_H$ ,  $n_4$ .

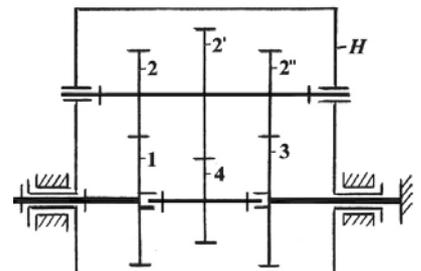


Рисунок 2.2.98

**2.2.99.**

$z_1 = 30$ ;  $z_2 = 35$ ;  $z_3 = 100$ ;  
 $z_3' = 23$ ;  $z_4 = 23$ ;  $z_5 = 23$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{14}$ .

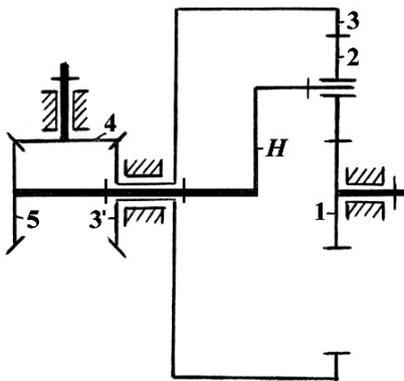


Рисунок 2.2.99

**2.2.100.**

$n_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_1' = 40$ ;  $z_2 = 20$ ;  
 $z_3 = 70$ ;  $z_3' = 80$ ;  $z_4 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_H$ .

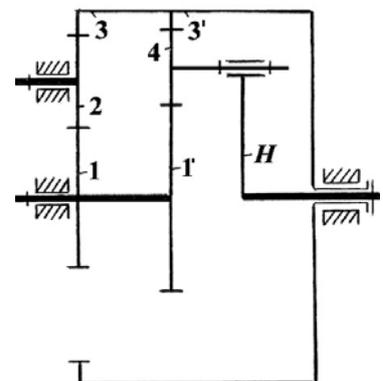


Рисунок 2.2.100

**2.2.101.**

$n_1 = 800 \text{ мин}^{-1}$ ;  $z_1 = 24$ ;  
 $z_2 = 33$ ;  $z_2' = 21$ ;  $z_3 = 78$ ;  
 $z_3' = 18$ ;  $z_4 = 30$ ;  $z_5 = 78$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{1H}$ ,  $n_H$ .

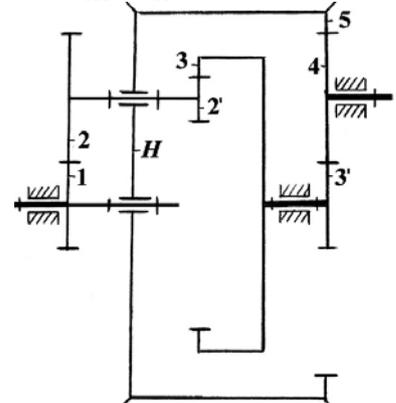


Рисунок 2.2.101

**2.2.102.**

$n_1 = 550 \text{ мин}^{-1}$ ;  
 $z_1 = 30$ ;  $z_1' = 18$ ;  
 $z_2 = 18$ ;  $z_3 = 54$ ;  
 $z_4 = 64$ ;  $z_5 = 17$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{13}$ ,  $n_3$ .

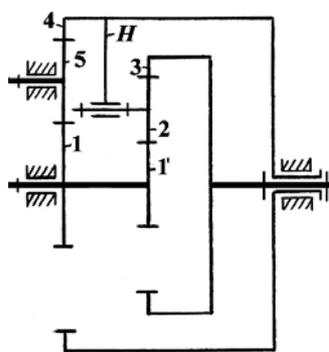


Рисунок 2.2.102

**3.2.103.**

$z_1 = 40$ ;  $z_2 = 50$ ;  
 $z_2' = 42$ ;  $z_3 = 48$ ;  
 $z_3' = 30$ ;  $z_4 = 40$ ;  
 $z_4' = 90$ ;  $z_5 = 20$ .

**Определить:**

$W$ ,  $U_{15}$ .

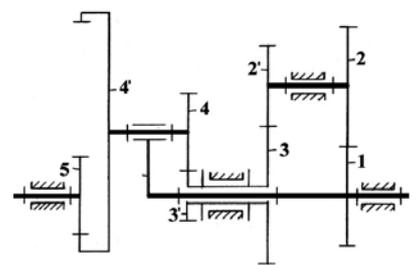


Рисунок 2.2.103

**2.2.104.**

$z_1 = 30; z_2 = 40; z_2' = 48;$   
 $z_3 = 35; z_3' = 38; z_4 = 37;$   
 $z_4' = 48; z_5 = 48.$

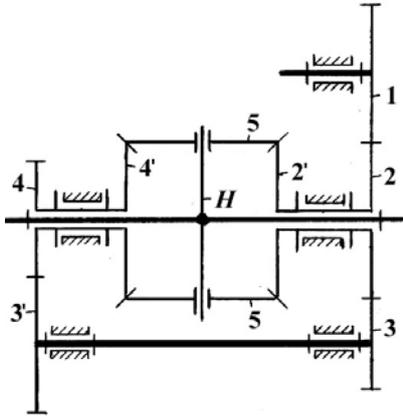
**Определить:** $W, U_{1H}.$ 

Рисунок 2.2.104

**2.2.105.**

$z_1 = 40; z_1' = 20; z_2 = 60;$   
 $z_2' = 67; z_3 = 120;$   
 $z_3' = 67; z_4 = 67.$

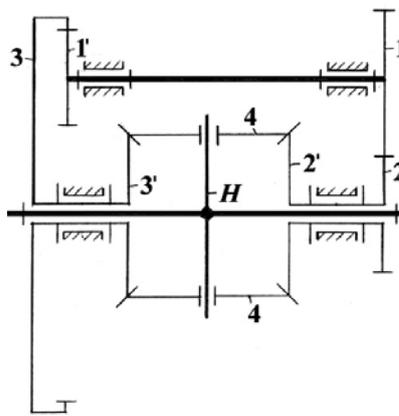
**Определить:** $W, U_{1H}.$ 

Рисунок 2.2.105

**2.2.106.**

$z_1 = 20; z_1' = 40; z_2 = 15;$   
 $z_3 = 50; z_3' = 20; z_4 = 80;$   
 $z_4' = 120; z_5 = 60; z_5' = 20.$

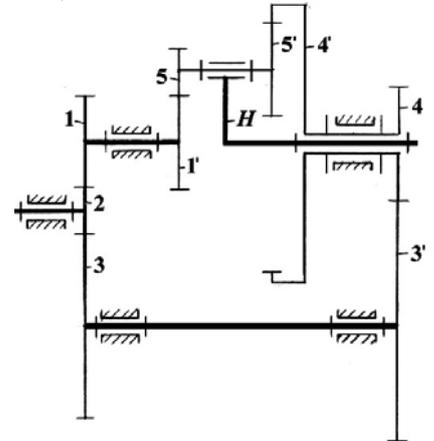
**Определить:** $W, U_{1H}.$ 

Рисунок 2.2.106

**2.2.107.**

$z_1 = 20; z_2 = 35; z_2' = 30;$   
 $z_3 = 25; z_3' = 18; z_4 = 31;$   
 $z_5 = 80.$

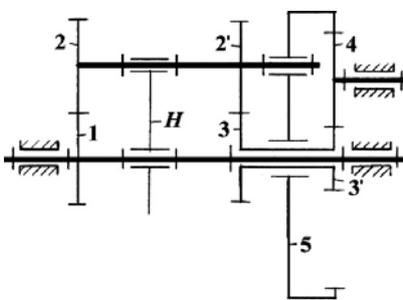
**Определить:** $W, U_{1H}.$ 

Рисунок 2.2.107

**2.2.108.**

$z_1 = 45; z_2 = 25; z_2' = 20;$   
 $z_3 = 50; z_3' = 40; z_4 = 30;$   
 $z_4' = 40; z_5 = 110.$

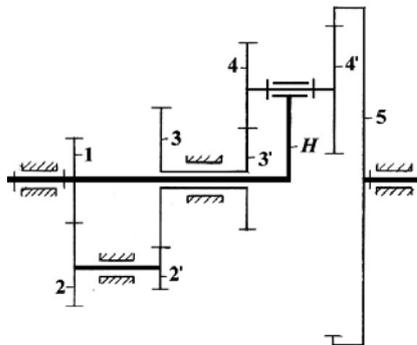
**Определить:** $W, U_{15}.$ 

Рисунок 2.2.108

**2.2.109.**

$z_1 = 80; z_1' = 40; z_2 = 30;$   
 $z_3 = 20; z_4 = 60; z_4' = 41;$   
 $z_5 = 21.$

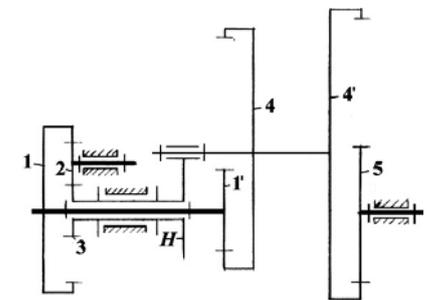
**Определить:** $W, U_{15}.$ 

Рисунок 2.2.109

**2.2.110.**

$z_1 = 20;$   
 $z_1' = 40;$   
 $z_2 = 34;$   
 $z_2' = 25;$   
 $z_3 = 29;$   
 $z_3' = 92;$   
 $z_4 = 26.$

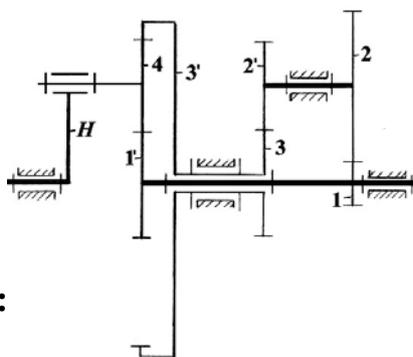
**Определить:** $W, U_{1H}.$ 

Рисунок 2.2.110

**2.2.111.**

$z_1 = 20;$   
 $z_2 = 40;$   
 $z_3 = 100;$   
 $z_3' = 94;$   
 $z_4 = 24;$   
 $z_4' = 30;$   
 $z_5 = 100.$

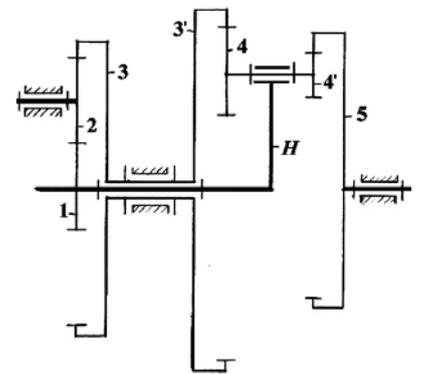
**Определить:** $W, U_{15}.$ 

Рисунок 2.2.111

**2.2.112.**

$z_1 = 36; z_{1'} = 26; z_2 = 18;$   
 $z_{2'} = 27; z_3 = 27; z_{3'} = 20;$   
 $z_4 = 30; z_{4'} = 24.$

**Определить:**

$W, U_{1H}.$

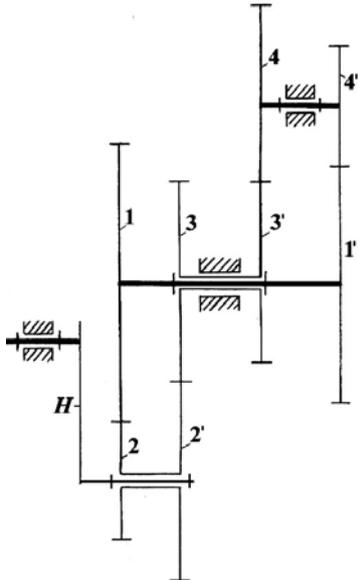


Рисунок 2.2.112

**2.2.113.**

$z_1 = 80; z_2 = 40; z_{2'} = 35;$   
 $z_3 = 85; z_4 = 20; z_5 = 48;$   
 $z_{5'} = 36; z_6 = 32.$

**Определить:**

$W, U_{16}.$

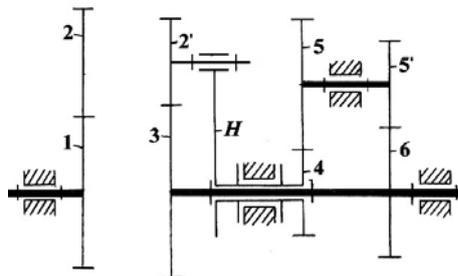


Рисунок 2.2.113

**2.2.114.**

$z_1 = 70; z_2 = 14; z_{2'} = 35;$   
 $z_3 = 21; z_{3'} = 32; z_4 = 42;$   
 $z_{4'} = 38; z_5 = 25; z_6 = 16.$

**Определить:**

$W, U_{16}.$

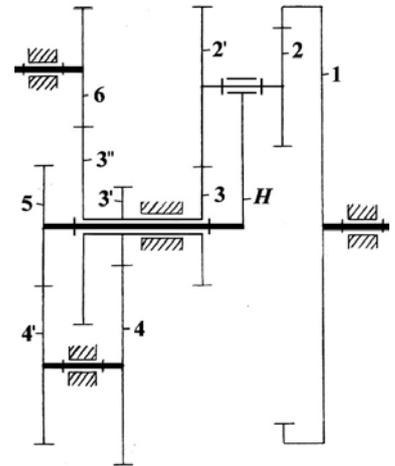


Рисунок 2.2.114

**2.2.115.**

$z_1 = 45; z_{1'} = 42; z_2 = 19;$   
 $z_{2'} = 43; z_3 = 21; z_4 = 60;$   
 $z_{4'} = 40; z_5 = 22.$

**Определить:**

$W, U_{15}.$

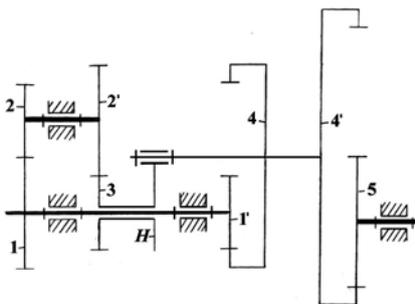


Рисунок 2.2.115

**2.2.116.**

$z_1 = 55; z_2 = 30; z_{2'} = 60;$   
 $z_3 = 25; z_{3'} = 115; z_4 = 25;$   
 $z_{4'} = 135; z_5 = 45.$

**Определить:**

$W, U_{15}.$

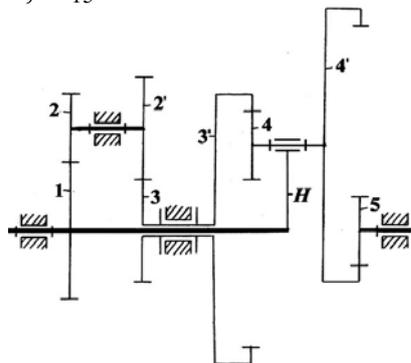


Рисунок 2.2.116

**2.2.117.**

$z_1 = 25; z_{1'} = 20; z_2 = 75;$   
 $z_{2'} = 45; z_3 = 20; z_{3'} = 90;$   
 $z_4 = 25; z_H = 80.$

**Определить:**

$W, U_{1H}.$

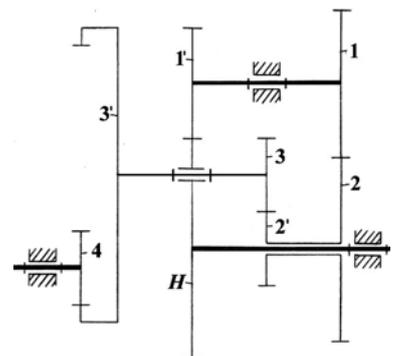


Рисунок 2.2.117

**2.2.118.**

$n_1 = 1400 \text{ мин}^{-1};$   
 $z_1 = 40; z_2 = 20;$   
 $z_3 = 80; z_{3'} = 76;$   
 $z_4 = 25; z_5 = 26.$

**Определить:**

$W, U_{1H}, n_H.$

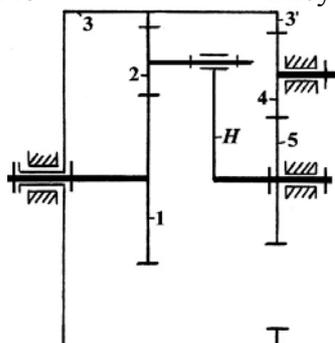


Рисунок 2.2.118

**2.2.119.**

$n_1 = 2200 \text{ мин}^{-1};$   
 $z_1 = 22; z_{1'} = 24;$   
 $z_2 = 25; z_3 = 74;$   
 $z_{3'} = 34; z_4 = 20;$   
 $z_{4'} = 32.$

**Определить:**

$W, U_{1H}, n_H.$

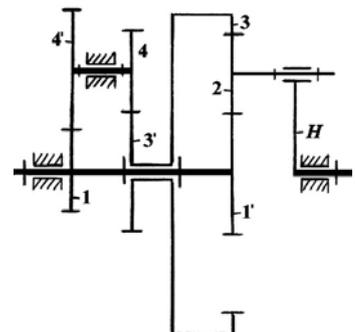


Рисунок 2.2.119

**2.2.120.**

$z_1 = 42; z_{1'} = 18; z_2 = 36;$   
 $z_{2'} = 25; z_3 = 29; z_{3'} = 32;$   
 $z_4 = 60; z_{4'} = 50.$

**Определить:**

$W, U_{1H}.$

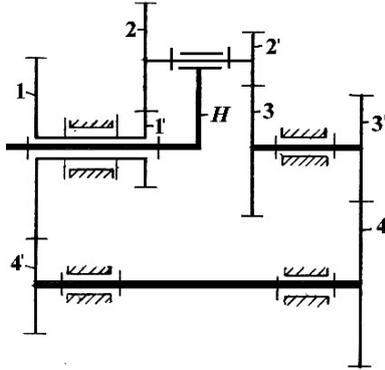


Рисунок 2.2.120

**2.2.121.**

$z_1 = 50; z_{1'} = 55; z_2 = 40;$   
 $z_3 = 130; z_4 = 25; z_{4'} = 22;$   
 $z_5 = 102.$

**Определить:**

$W, U_{15}.$

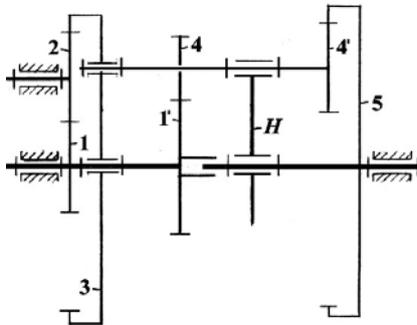


Рисунок 2.2.121

**2.2.122.**

$z_1 = 20; z_2 = 45; z_{2'} = 40;$   
 $z_3 = 25; z_{3'} = 58; z_4 = 46;$   
 $z_{4'} = 22; z_5 = 82.$

**Определить:**

$W, U_{15}.$

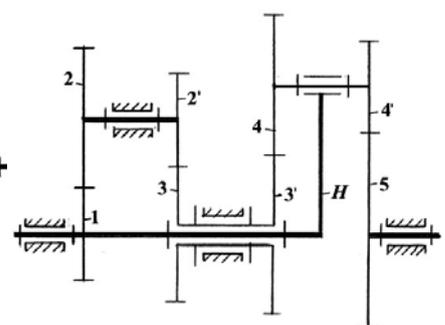


Рисунок 2.2.122

**2.2.123.**

$z_1 = 22; z_2 = 32; z_3 = 86;$   
 $z_{3'} = 22; z_4 = 32; z_5 = 86.$

**Определить:**

$W, U_{15}.$

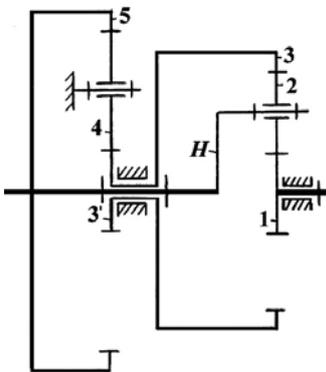


Рисунок 2.2.123

**2.2.124.**

$z_1 = 24; z_{1'} = 27; z_2 = 56;$   
 $z_{2'} = 20; z_3 = 79; z_{3'} = 31;$   
 $z_4 = 83; z_{4'} = 60.$

**Определить:**

$W, U_{1H}.$

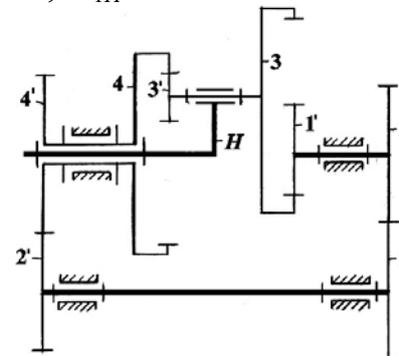


Рисунок 2.2.124

**2.2.125.**

$z_1 = 36; z_2 = 18; z_{2'} = 30;$   
 $z_3 = 24; z_{3'} = 105; z_4 = 35;$   
 $z_{4'} = 32; z_5 = 102.$

**Определить:**

$W, U_{15}.$

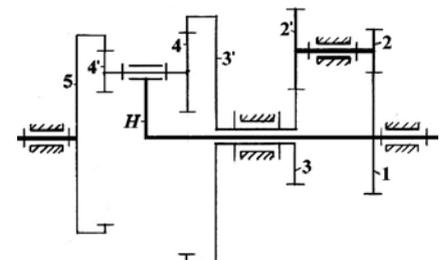


Рисунок 2.2.125

**2.2.126.**

$n_1 = 1400 \text{ мин}^{-1};$   
 $z_1 = 20;$   
 $z_2 = 20;$   
 $z_3 = 60;$   
 $z_4 = 18;$   
 $z_{4'} = 22;$   
 $z_5 = 120;$   
 $z_6 = 80.$

**Определить:**

$W, U_{15}, n_5, n_H.$

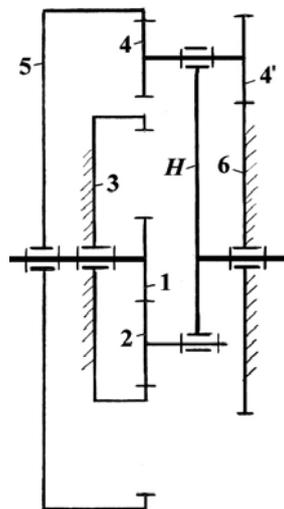


Рисунок 2.2.126

**2.2.127.**

$n_1 = 740 \text{ мин}^{-1};$   
 $z_1 = 80;$   
 $z_2 = 20;$   
 $z_{2'} = 18;$   
 $z_3 = 78;$   
 $z_{3'} = 100;$   
 $z_4 = 25.$

**Определить:**

$W, U_{H4}, n_4, n_3.$

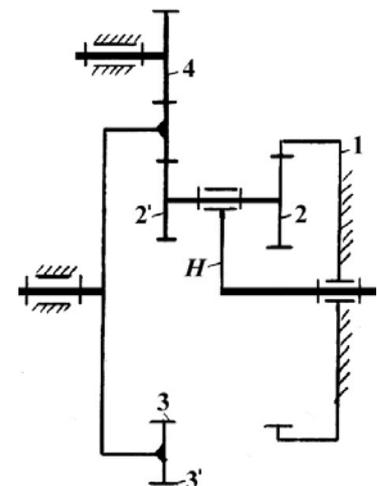


Рисунок 2.2.127