

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Казанский государственный аграрный университет»

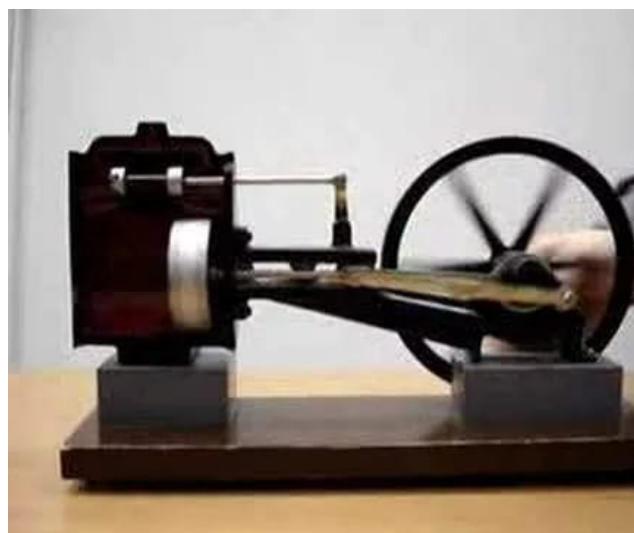
Институт механизации и технического сервиса

Кафедра общеинженерных дисциплин

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ТОЧКИ ШАТУНА

Учебно-методические указания для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по теории механизмов и машин для студентов очной и заочной формы обучения по направлениям подготовки:

35.03.06 - «Агроинженерия»,  
23.03.03 - «Эксплуатация транспортно -  
технологических машин и комплексов»,  
20.03.01 «Техносферная безопасность» и  
23.05.01 – «Наземные транспортно-технологические средства»



Казань, 2017

УДК 621.01

ББК 31.365 я73

Составители: Яхин С.М., Мудров А. П., Пикмуллин Г.В. ,Гургенидзе З.Д.

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация машин и оборудования» Казанского ГАУ Абдрахманов Р.К.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиноведение и инженерная графика» КНИТУ-КАИ Сайманов Р.Г.

Учебно-методические указания для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по теории механизмов и машин обсуждены и рекомендованы к печати на заседании кафедры «Общиеинженерные дисциплины» Казанского ГАУ (протокол №8 от 16.03.2017г.) и заседании методической комиссии Института механизации и технического сервиса Казанского государственного аграрного университета (протокол №7 от 29.03.2017г.).

Яхин С.М. Исследование кинематики точки шатуна: Учебно-метод. указания для выполнения лаб. и самост. работ / С.М. Яхин, А.П. Мудров, Г.В. Пикмуллин, З.Д. Гургенидзе - Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2017. - 16с.

Учебно-методические указания предназначены для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по дисциплине «Теория механизмов и машин» и способствуют формированию общепрофессиональных компетенций для направлений подготовки: 35.03.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 20.03.01 «Техносферная безопасность» и 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

УДК 621.01

ББК 31.365 я73

©Казанский государственный аграрный университет, 2017 г.

## Лабораторная работа №2

### Тема: ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ТОЧКИ ШАТУНА

#### 1. ЦЕЛЬ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

##### 1.1. Цель работы

На примере кривошипно-ползунного механизма рассмотреть применяемые на практике способы определения основных кинематических параметров движения точек звеньев, в частности, точки шатуна. Выявить достоинства и недостатки этих способов и оценить их возможности.

##### 1.2. Теоретические предпосылки проведения работы

К основным кинематическим параметрам движения точек звеньев относятся их траектории, координаты, перемещения, скорости и ускорения, определение которых может осуществляться тремя способами: экспериментальным, графическим и аналитическим. Рассмотрим каждый из них.

**Экспериментальный способ.** Он проводится на реальном натурном образце механизма (или его модели). Покажем его применение для определения кинематики точки  $M$  шатуна механизма лабораторной установки. Её схема, в подготовленном для проведения экспериментального исследования виде, представлена на рисунке 1.

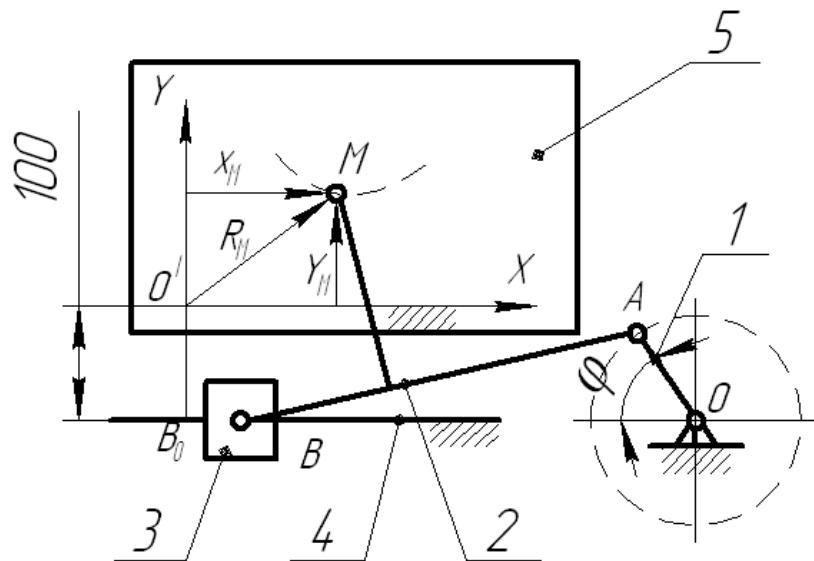


Рисунок 1 - К исследованию кинематики точки шатуна  $M$

Механизм состоит из кривошипа 1, шатуна 2, ползуна 3 и станины 4, соединённой с чертёжной доской, на которой крепится в положении, указанном на рисунке, лист бумаги 5. Прямоугольная координатная система  $XO'Y$  взята так: ось  $X$  параллельна оси направляющих ползуна (линии  $B_oO$ ) и отстоит от неё на расстоянии 100 мм, ось  $Y$  проходит через точку  $B_o$  – крайнее левое положение центра (точки В) ползуна, когда шатун и кривошип вытянуты в одну линию (угол поворота  $\varphi$  кривошипа равен нулю).

Положение точки  $M$  относительно указанной координатной системы определяют две координаты:  $X_M$ ,  $Y_M$ . Изменение их за полный оборот кривошипа (угол  $\varphi = 0 \dots 360^\circ$ ) можно проследить, отмечая на листе бумаги местоположение точки  $M$  для различных значений угла  $\varphi$  (изменяя его с определённым интервалом, например  $\Delta\varphi=30^\circ$ ). При необходимости для определения модуля радиус-вектора  $R_M$  точки  $M$  используют формулу:

$$R_M = \sqrt{X_M^2 + Y_M^2}, \quad (1)$$

или измеряют по листу бумаги расстояние  $O'M$  (смотри рисунок 1). Если требуется показать траекторию точки  $M$ , то её можно получить, соединяя указанные отметки плавной линией, или прочертив на бумаге пишущим устройством.

Полученные значения координат  $X_M$  и  $Y_M$  в зависимости от угла  $\varphi$  поворота кривошипа, удобно для их анализа отразить в виде графиков  $X_M=f_1(\varphi)$  и  $Y_M=f_2(\varphi)$ . А так как кинематика точки  $M$  шатуна рассматривается при равномерном движении кривошипа (угол  $\varphi$  прямо пропорционален времени  $t$ ), то их можно принять за графики  $X_M=f_1(t)$  и  $Y_M=f_2(t)$ . В этом случае масштаб времени  $K_t$  (в с/мм) вычисляется по формуле:

$$K_t = \frac{2 \cdot \pi}{A \cdot \omega_1}, \quad (2)$$

где  $A$  – отрезок в мм, соответствующий полному обороту кривошипа (рекомендуется в работе брать  $A=120$  мм),  $\omega_1$  - угловая скорость кривошипа (считаем, что  $\omega_1 = 1$  рад/с).

Скорость  $V_M$  точки  $M$  определяется через проекции  $V_M^X$ ,  $V_M^Y$  на оси координат, которые получаем в виде графиков  $V_M^X = f_1'(t)$  и  $V_M^Y = f_2'(t)$ , графическим дифференцированием графиков координат  $X_M = f_1(t)$  и  $Y_M = f_2(t)$ , так как

$$V_M^X = \frac{dX_M}{dt}; V_M^Y = \frac{dY_M}{dt}.$$

Графическое дифференцирование проводим методом хорд. Он показан на рисунке 2 и состоит в следующем. На дифференцируемой кривой (в нашем случае это график  $X_M = f_1(t)$ ) отмечают ряд точек:  $0', 1', 2' \dots 13'$ , которые соединяют хордами, то есть заменяют кривую ломаной линией, близкой к ней. При этом характерные точки кривой  $X_M = f_1(t)$  должны лежать посередине соответствующих хорд. Принимается допущение, что угол  $\psi_i$  наклона хорды к горизонтальной координатной оси равен углу наклона касательной к кривой в соответствующей характерной точке. Тогда получаем, что скорость  $V_M^X$  пропорциональна тангенсу угла наклона  $\psi_i$ :

$$V_M^X = \frac{dX_M}{dt} = \frac{\Delta y \cdot K_L}{\Delta x \cdot K_t} = \frac{K_L}{K_t} \cdot \operatorname{tg} \psi_i, \quad (3)$$

где  $K_L$  - масштаб, в котором на первом графике рисунка 2 показана координата  $X_M$ . Таким образом, если взять на горизонтальной оси второго графика отрезок  $OB_1$  произвольной длины в мм, провести через его конец (точку  $B_1$ ) линии, параллельные соответствующим хордам, то в пересечении их с вертикальной координатной осью получим точки  $b_i$ . Ординаты  $Ob_i$  в масштабе будут определять скорость  $V_M^X$  точки шатуна. Например, для характерной точки при  $x=1$  угол наклона хорды -  $\psi_2$ , тогда ее скорость в проекции на ось  $X$  равна:

$$V_M^X = \frac{K_L}{K_t} \cdot \operatorname{tg} \psi_2 = \frac{K_L}{K_t} \cdot \frac{Ob_2}{OB_1} = K_V \cdot Ob_2 = K_V \cdot Y'_1. \quad (4)$$

Здесь  $K_V$  - масштаб скорости (в м/с·мм). Он находится по формуле:

$$K_V = \frac{K_L}{K_t \cdot OB_1}. \quad (5)$$

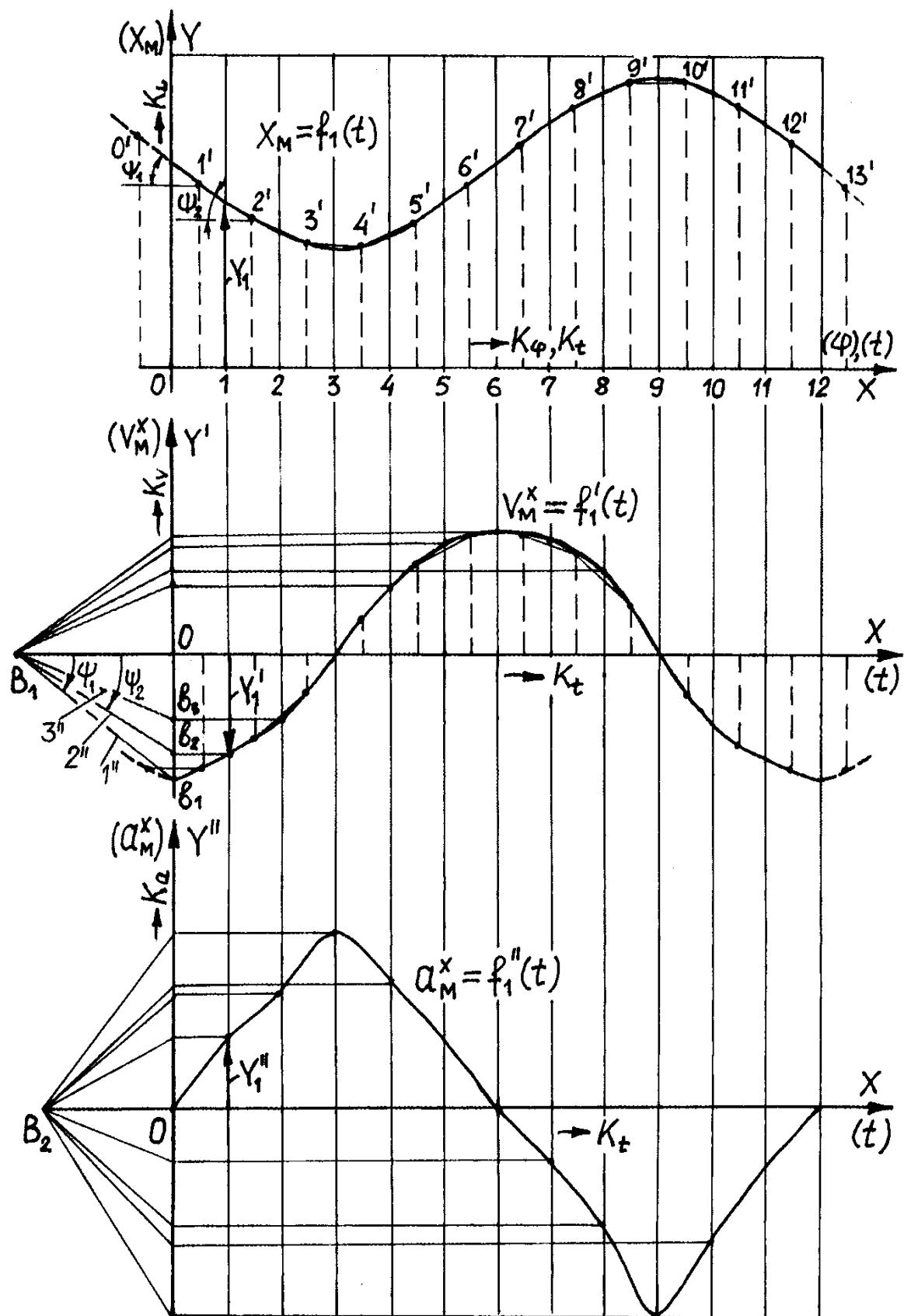


Рисунок 2 – Графики координаты  $X_M$ , проекций скорости  $V_M^X$  и ускорения  $a_M^X$

Графически дифференцируя полученную кривую  $V_M^X = f_1'(t)$  построим график  $a_M^X = f_1''(t)$ , с помощью которого можно найти численное значение проекции ускорения:

$$a_M^X = K_a \cdot Y_1'', \quad (6)$$

где  $K_a$  - масштаб ускорения (в  $\text{м/с}^2 \cdot \text{мм}$ ), определяемый по формуле

$$K_a = \frac{K_V}{K_t \cdot OB_2}. \quad (7)$$

Аналогично находятся проекции скорости и ускорения точки М на ось Y. Имея обе проекции скорости и ускорения определяют их модули по формулам:

$$V_M = \sqrt{(V_M^X)^2 + (V_M^Y)^2}, \quad (8)$$

$$a_M = \sqrt{(a_M^X)^2 + (a_M^Y)^2}. \quad (9)$$

**Графический способ.** Заключается в графическом решении соответствующих векторных уравнений, связывающих собой скорости и ускорения точек звеньев механизма, путем построения плана скоростей и плана ускорений.

В этом случае вычерчивается схема механизма для заданного положения кривошипа, определяемого углом  $\varphi$ , в масштабе  $K_L$ , м/мм (рисунок 3а). Угловая скорость кривошипа  $\omega_1$ , рад/с задана. Определяются скорости и ускорения точек.

Модуль скорости точки A вычисляется по известной формуле:

$$V_A = \omega_1 \cdot r = \omega_1 \cdot K_L \cdot OA, \quad (10)$$

где  $r$  - длина кривошипа, мм;  $OA$  - отрезок на чертеже (мм), изображающий длину кривошипа в масштабе  $K_L$ .

Направлена скорость по касательной к траектории точки A сторону угловой скорости  $\omega_1$ , т.е.  $V_A \perp OA$ .

Затем определяется скорость точки B, которую можно представить как состоящую из переносной скорости  $V_A$  и относительной  $V_{BA}$ , то есть

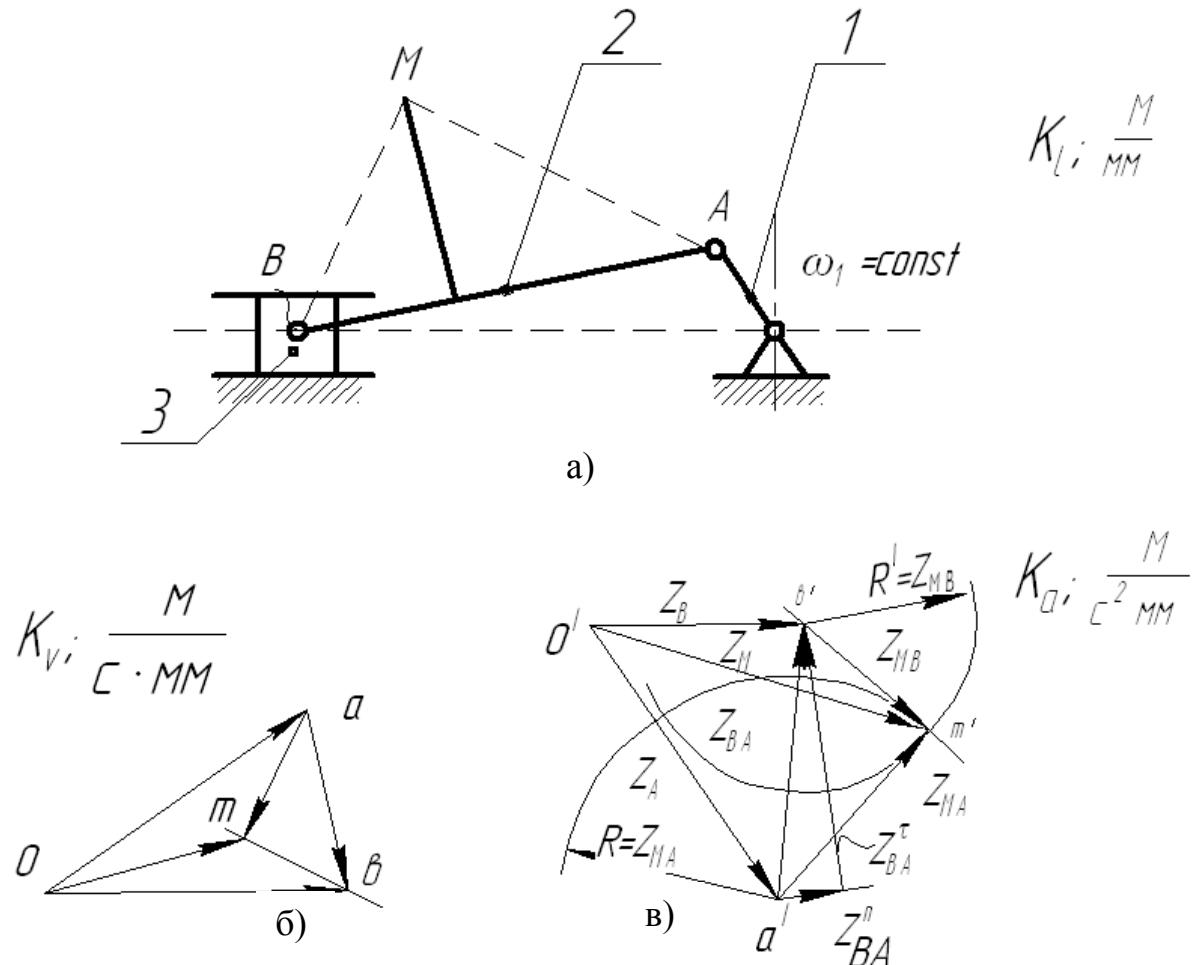
$$\frac{\overline{V_B}}{\square OB} = \frac{\overline{V_A}}{\perp OA} + \frac{\overline{V_{BA}}}{\perp AB} \quad . \quad (11)$$

В этом уравнении известна величина и направление  $V_A$  (отмечена двумя черточками), а также направление  $V_B$  и  $V_{BA}$ .

Решается уравнение графическим способом - построением плана скоростей (рисунок 3б). Для чего подсчитывается масштаб скорости (м/с мм)

$$K_V = V_A / Oa, \quad (12)$$

где  $Oa$  - отрезок, изображающий на чертеже скорость  $V_A$  (рекомендуется брать  $Oa = 50$  мм).



а) схема механизма б) план скоростей в) план ускорений

Рисунок 3 – Графический способ исследования механизма

Этот отрезок откладывается на плане из точки  $O$  перпендикулярно  $OA$ . Через точку  $a$  проводится прямая перпендикулярно  $AB$ , а через точку

$O$  - прямая параллельно  $OB$ . Пересечение этих прямых дает точку  $\mathcal{B}$ , которая определяет отрезки  $O\mathcal{B}$  и  $a\mathcal{B}$ , изображающих на плане скорости  $V_B$  и  $V_{BA}$ . Модули этих скоростей (м/с):

$$V_B = O\mathcal{B} \cdot K_v \text{ и } V_{BA} = a\mathcal{B} \cdot K_v. \quad (13)$$

Скорость точки  $M$  находится из двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_M &= \bar{V}_A + \bar{V}_{MA} \\ &\quad \left. \begin{aligned} & \bar{V}_A \\ & \bar{V}_{MA} \end{aligned} \right\} \perp AM \\ \bar{V}_M &= \bar{V}_B + \bar{V}_{MB} \\ &\quad \left. \begin{aligned} & \bar{V}_B \\ & \bar{V}_{MB} \end{aligned} \right\} \perp BM \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Для решения первого уравнения через точку  $a$  плана скоростей проводится прямая перпендикулярно  $AM$ , а для решения второго - через точку  $\mathcal{B}$  прямая перпендикулярно  $BM$ . Эти прямые пересекаются в точке  $m$ , которая определяет отрезки  $am$  и  $\mathcal{B}m$ , изображающие относительные скорости  $V_{MA}$  и  $V_{MB}$ , и отрезок  $Om$ , изображающий искомую скорость  $V_M$ . Её модуль:

$$V_M = Om \cdot K_v. \quad (15)$$

Модули относительных скоростей:

$$V_{MA} = am \cdot K_v, \quad V_{MB} = \mathcal{B}m \cdot K_v. \quad (16)$$

После этого переходят к построению плана ускорений. Ускорение точки  $A$  находят по формуле (м/с<sup>2</sup>):

$$a_A = \bar{a}_A^n = \omega_1^2 \cdot r, \quad (17)$$

Ускорения точки  $A$  будет состоять только из нормальной составляющей ускорения ( $\bar{a}_A^n$ ), так как кривошип  $OA$  вращается с постоянной угловой скоростью ( $\omega_1 = \text{const}$ ) и поэтому касательная (тангенциальная) составляющая будет равно нулю ввиду отсутствия углового ускорения ( $\varepsilon_1$ ) ( $\bar{a}_A^\tau = \varepsilon_1 \cdot r = 0$ , так как  $\varepsilon_1 = 0$ ) и направлено оно по кривошипу  $AO$  от точки  $A$  к  $O$ .

Ускорение точки  $B$  определяют из уравнения:

$$\bar{\underline{a}}_B = \bar{\underline{a}}_A + \bar{\underline{a}}_{BA} = \bar{\underline{a}}_A + \bar{\underline{a}}_{BA}^n + \bar{\underline{a}}_{BA}^\tau \quad (18)$$

Входящее сюда  $\bar{a}_A$  найдено выше, а  $\bar{a}_{BA}^n$  вычисляют по формуле

$$a_{BA}^n = \frac{V_{BA}^2}{l_{AB}} = \frac{(abK_V)_{BA}^2}{AB \cdot K_L}, \quad (19)$$

где  $l_{AB}$  – длина шатуна, м.

Для решения уравнения произвольно выбирают масштаб ускорения  $K_a$ , (м/с<sup>2</sup>мм). Его можно найти и по формуле:

$$K_a = K_V^2 / K_L. \quad (20)$$

Затем подсчитывают отрезки  $Z_A$  и  $Z_{BA}^n$  (мм):

$$Z_A = a_A / K_a, \quad Z_{BA}^n = a_{BA}^n / K_a. \quad (21)$$

Из взятой на чертеже точки  $O'$  (рисунок 3в) проводят отрезок  $Z_A \parallel AO$  в сторону  $O$ . Из конца его (точки  $a'$ ) откладывают отрезок  $Z_{BA}^n \parallel BA$  в сторону  $A$  и через его конец чертят прямую  $\perp AB$  ( $\perp Z_{BA}^n$ ), а через точку  $O'$  – прямую  $\parallel BO$ . Пересечение этих прямых дает точку  $b'$  и отрезки  $Z_B$ ,  $Z_{BA}$  и  $Z_{BA}^\tau$ , которые определяют в масштабе  $K_a$  ускорение  $a_B$ ,  $a_{BA}$  и составляющую  $a_{BA}^\tau$ . Их модули (м/с<sup>2</sup>):

$$a_B = Z_B \cdot K_a, \quad a_{BA} = Z_{BA} \cdot K_a, \quad a_{BA}^\tau = Z_{BA}^\tau \cdot K_a. \quad (22)$$

Ускорение точки  $M$  находят из двух уравнений:

$$\begin{cases} \bar{a}_M = \bar{a}_A + \bar{a}_{MA} \\ \bar{a}_M = \bar{a}_A + \bar{a}_{MA} \end{cases} \quad (23)$$

Приняв во внимание, что

$$\frac{a_{MA}}{a_{BA}} = \frac{AM}{AB}, \quad (24)$$

после деления на масштаб  $K_a$ , будем иметь

$$Z_{MA} = Z_{BA} \cdot \frac{AM}{AB}. \quad (25)$$

Аналогично получаем

$$Z_{MB} = Z_{BA} \cdot \frac{AM}{AB}. \quad (26)$$

Для решения уравнений (23) из точки  $a'$  плана ускорений радиусом  $R = Z_{MA}$  и из точки  $b'$  радиусом  $R = Z_{MB}$  проводят дуги до их пересечения. Получают две точки, одна из которых является действительной. Для её установления поступают следующим образом. Определяют направление углового ускорения шатуна:

$$\varepsilon_2 = a_{BA}^\tau / l, \quad (27)$$

где  $l$  – длина шатуна, м.

Для чего переносят на схему механизма в точку  $B$  из плана ускорений вектор  $Z_{BA}^{\tau}$  и мысленно замечают направление вращения шатуна от этого вектора вокруг точки  $A$ . В нашем случае (рисунок 3а) - это направление по часовой стрелке. Теперь располагают по направлению  $\varepsilon_2$  точки шатуна ( $B \rightarrow M \rightarrow A \rightarrow B$ ), в таком же направлении будут располагаться такие же точки и на плане ускорений, т.е. ( $b' \rightarrow m' \rightarrow a' \rightarrow b'$ ). Таким способом получают на плане ускорений местоположение точки  $m'$  и, соединяя ее с полюсом  $O'$ , отрезок и искомое ускорение  $a_m = Z_m \cdot K_a$ .

Аналитический способ. Суть его такова. Схема исследуемого механизма заменяется соответствующим векторным контуром, по которому составляется векторное уравнение. Затем оно проецируется на оси координат и из полученных уравнений находятся аналитические зависимости, определяющие искомые величины.

Векторный контур  $OB_0O'MKAO$  для исследования движения точки шатуна  $M$  кривошипно-ползунного механизма представлен на рисунке 4.

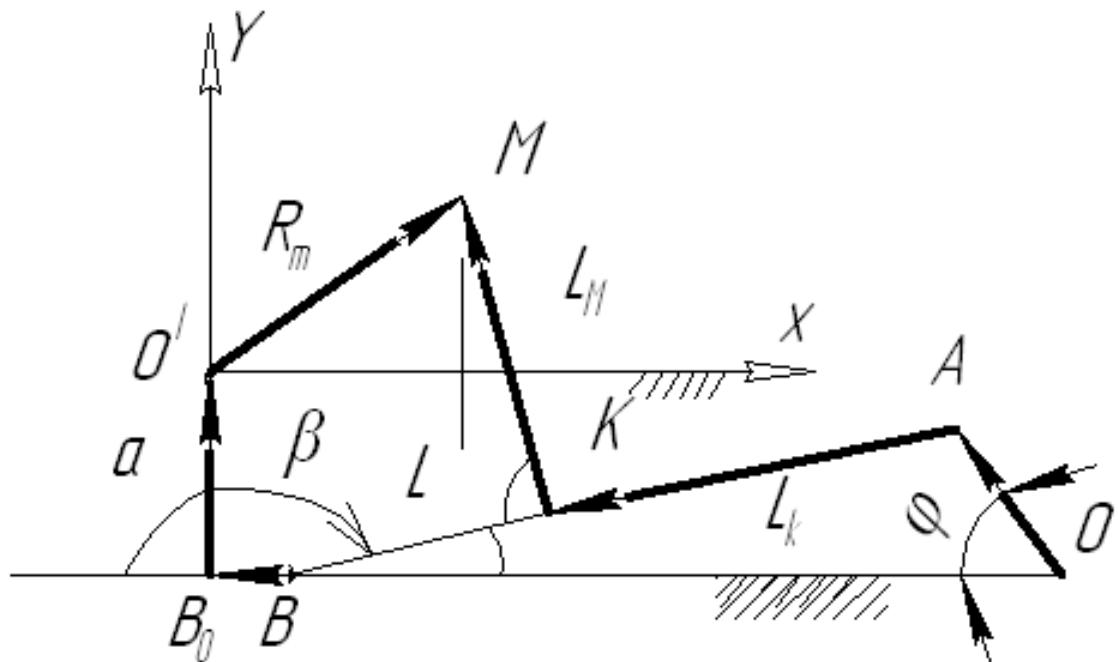


Рисунок 4 – К аналитическому способу исследования механизма.

Этот контур образован на основании рассмотренной ранее схемы механизма – см. рисунки 1 и 3.

Все принятые обозначения понятны из рисунка.

Найдем радиус-вектор (его проекции), определяющий положение точки  $M$  из векторного уравнения:

$$\overline{OB_0} + \overline{B_0O'} + \overline{O'M} = \overline{OA} + \overline{AK} + \overline{KM}.$$

$$\text{Отсюда } \overline{O'M} = \overline{OA} + \overline{AK} + \overline{KM} - \overline{OB_0} - \overline{B_0O'}. \quad (28)$$

Это же уравнение в проекциях на оси  $X$  и  $Y$ :

$$\left. \begin{aligned} X_M &= X_{OA} + X_{AK} + X_{KM} - X_{OB_0} - X_{B_0O'}, \\ Y_M &= Y_{OA} + Y_{AK} + Y_{KM} - Y_{OB_0} - Y_{B_0O'}. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

После подстановки значений проекций векторов, взятых из рисунка 4, окончательно получаем искомые проекции:

$$\left. \begin{aligned} X_M &= -r \cos \varphi + L_K \cos \beta - L_M \sin \varphi + r + L, \\ Y_M &= -r \sin \varphi - L_K \sin \beta - L_M \cos \varphi - a. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

$$\text{Здесь } \beta = 180^\circ - \arcsin(\lambda \sin \varphi), \quad (31)$$

$$\text{где } \lambda = r/L.$$

Модуль радиуса-вектора определяется по формуле (1).

Продифференцировав по времени выражения (30) и, принимая во внимание что  $d\varphi / dt = \omega_1$  и  $d\beta / dt = \omega_2$ , будем иметь следующие проекции скорости точки  $M$ :

$$\left. \begin{aligned} V_M^X &= \omega_1 r \sin \varphi - \omega_2 (L_K \sin \beta + L_M \cos \beta), \\ V_M^Y &= -\omega_1 r \cos \varphi - \omega_2 (L_K \cos \beta - L_M \sin \beta). \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$\text{где } \omega_2 = -\omega_1 \cdot \lambda \cos \varphi, \quad (33)$$

$\omega_2$  – угловая скорость шатуна.

Модуль скорости точки  $M$  находится по формуле (8).

И, наконец, продифференцировав по времени уравнения (32), запишем проекции ускорения точки  $M$ , при условии  $\omega_1 = \text{const}$ :

$$\left. \begin{aligned} a_M^X &= \omega_1^2 r \cos \varphi - \varepsilon_2 (L_K \sin \beta + L_M \cos \beta) - \omega_2^2 (L_K \cos \beta - L_M \sin \beta), \\ a_M^Y &= -\omega_1^2 r \sin \varphi - \varepsilon_2 (L_K \cos \beta - L_M \sin \beta) + \omega_2^2 (L_K \sin \beta + L_M \cos \beta). \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

где

$$\varepsilon_2 = \omega_1^2 \cdot \lambda \sin \varphi, \quad (35)$$

$\varepsilon_2$  - угловое ускорение шатуна.

Модуль ускорения находится аналогично модулю скорости.

Программа решения этой задачи на ЭВМ прилагается.

Вводимые параметры  $r, l, L_K, L_M, a, 0 \ll \varphi \ll 360^\circ$  с шагом просчета  $\Delta\varphi$ .

Угол вводится и выводится в градусах.

Выводимые параметры  $X_M, Y_M, R_M; V_M^X, V_M^Y, V_M; a_M^X, a_M^Y, a_M$ .

При этом должен предусматриваться вывод всех проекций, как в численном, так и графическом виде.

## 2 ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

### 2.1 Лабораторная установка

Представляет из себя учебную установку ТММ-К для исследования кинематики точки шатуна (рисунок 5).

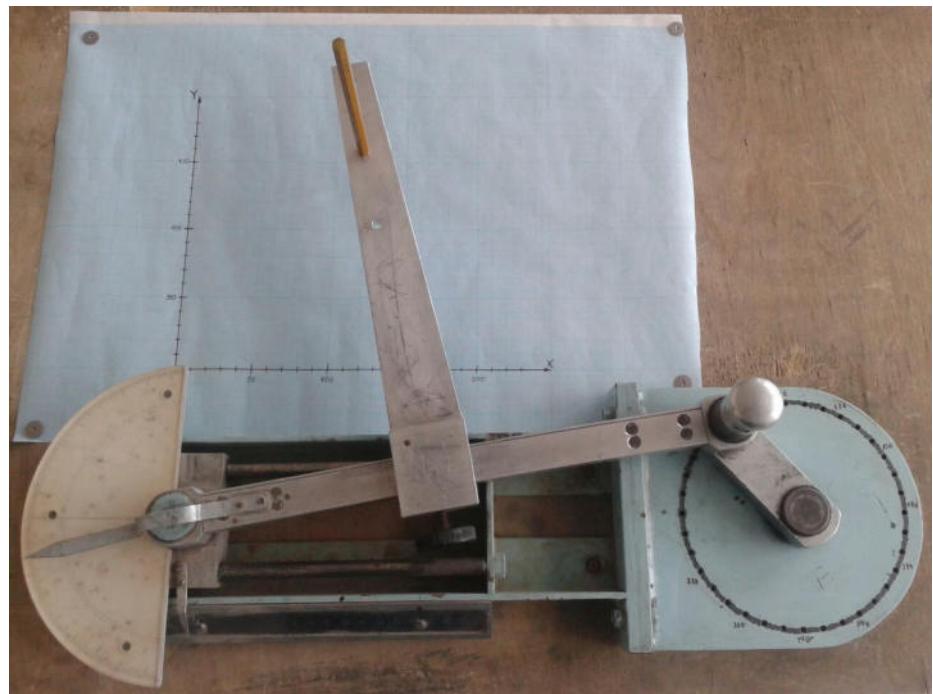


Рисунок 5 – Установка ТММ-К для исследования кинематики точки шатуна

Эта установка (рисунок 6) состоит из кривошипно-ползунного механизма, закрепленного на чертежной доске.

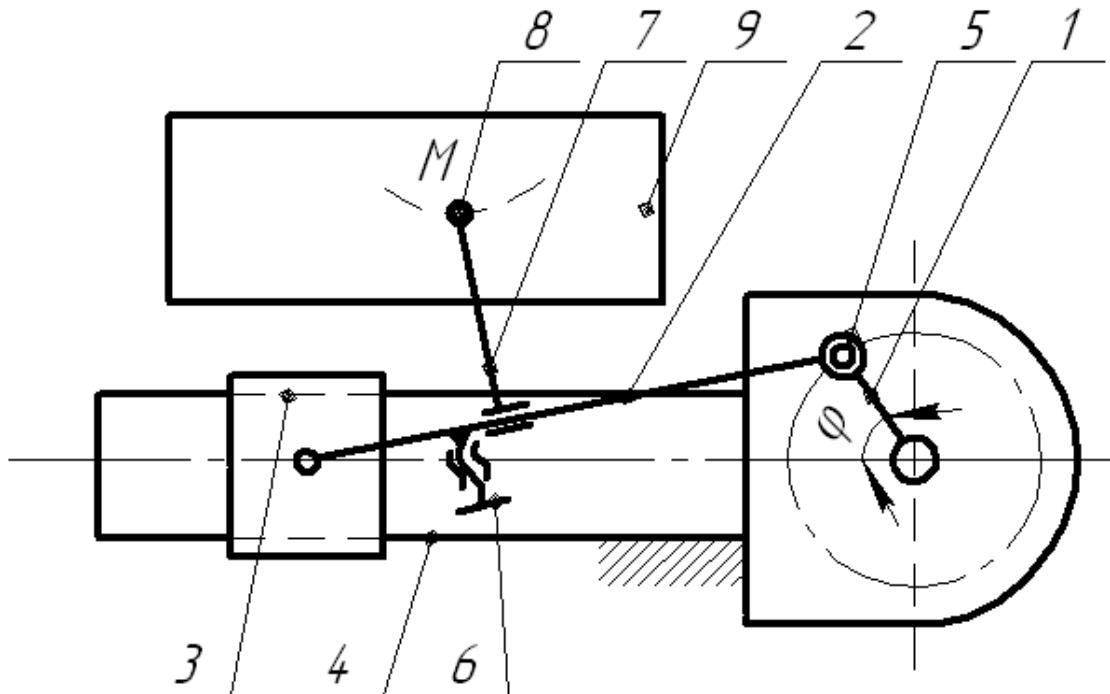


Рисунок 6 - Схема лабораторной установки

Механизм включает в себя кривошип 1, шатун 2, ползун 3, станину с направляющими 4. Кривошип связан с шатуном шарниром - ручкой 5, которая фиксирует кривошип на станине при заданном значении угла  $\varphi$  (градуировка шкалы сделана через  $10^\circ$ ). На шатуне с помощью винта 6 закреплен кронштейн 7 (он может менять место своего крепления) с пишущим приспособлением 8, которое отмечает положение точки  $M$  и её траекторию на листе чертежной или миллиметровой бумаги 9.

## 2.2 Порядок проведения работы.

1. Ознакомиться с содержанием работы и порядком её выполнения.
2. Исследовать движение точки  $M$  кривошипно-ползунного механизма экспериментальным способом. Для чего:
  - 2.1. Закрепить на доске установки лист миллиметровой бумаги и провести оси координат  $XO'Y$  в соответствии с рисунком 1.
  - 2.2. Отметить положение точки и её координаты  $X_m$  и  $Y_m$  при различных

значениях угла  $\phi$  в пределах одного оборота кривошипа через интервал в  $30^\circ$ .

2.3. Построить графики координат и графическим дифференцированием получить графики проекций скорости и ускорения этой точки. Для одного положения, указанного преподавателем, найти их модули.

3. Исследовать движение этой точки графическим способом. Для этого:

3.1. Начертить схему кривошипно-ползунного механизма (см. рисунок 3а) в положении, для которого определены экспериментальным способом модули скорости и ускорения.

3.2. Построить планы скоростей и ускорений и из них определить скорость и ускорение (их модули) точки  $M$ .

4. Изучить вывод зависимостей для определения положения скорости и ускорения точки  $M$ , полученных аналитическим способом.

4.1. Ознакомиться с программой решения этой задачи на ЭВМ и подготовить её к работе (приложение 1).

4.2. Ввести исходные данные, сделать расчет и получить требуемые параметры.

5. Провести сравнительный анализ величин, полученных экспериментальным, графическим и аналитическим способами.

6. Сделать выводы по работе, оценив достоинства, недостатки и возможности, указанных способов исследования.

### **3 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Название работы.

2. Схема механизма установки (рисунок 1) в произвольном масштабе.

3. Таблица с записями результатов замера проекций  $X_m$  и  $Y_m$  (см. табл. 1).

4. Графики  $X_M=f_1(t)$ ,  $V_M^X = f_1'(t)$ ,  $a_M^X = f_1''(t)$ ,  $Y_m=f_2(t)$ ,  $V_M^Y=f_2'(t)$ ,  $a_M^Y = f_2''(t)$ . Расчет масштабов  $K_v$  и  $K_a$ , определение модулей скорости и ускорения.

5. Схема кривошипно-ползунного механизма, построенная в масштабе  $K_L$ , (рисунок 3а). Планы скоростей и ускорений, необходимые для их построения векторные уравнения. Определение масштабов  $K_v$  и  $K_a$ , модулей скорости и ускорения.

6. Результаты просчета на ЭВМ (с указанием вводимых и выводимых параметров).

7. Выводы по работе.

Таблица 1 - Результаты замера проекций  $X_m$  и  $Y_m$

№ полож. кривошипа	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Угол $\phi^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$X_m$ , мм												
$Y_m$ , мм												

**Вопросы для самоконтроля:**

1. Назовите способы определения основных кинематических параметров движения точек звеньев?
2. В чем заключается экспериментальный способ?
3. В чем заключается графический способ?
4. Суть аналитического способа.
5. Достоинства и недостатки этих способов и оценить их возможности.
6. Опишите устройство установки, дайте характеристику звеньев механизма установки.
7. Дайте определение скорости и ускорения точки?
8. Порядок проведения испытаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левитская О.Н., Левитский Н.И. Курс теории механизмов и машин. – М.: Высшая школа, 2008. -279 с.
2. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: [Учеб. для вузов]. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 2009. – 639 с.
3. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. — 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука, 2009. - 592 с.
4. Фролов К.В. Теория механизмов и механика машин / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов и др.; под ред. К.В.Фролова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2008. – 496с.
5. Коровин Ю.В. Теория механизмов и машин. Казань: Изд-во Фэн, 2003. –396 с.
- 6.Машнев М.М., Красковский Е.Я., Лебедев П.А. Теория механизмов и машин и детали машин. – СПб.: Машиностроение, 2005. - 507 с.
7. Горев Э.А. Типовой лабораторный практикум по теории механизмов и машин. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2002. – 155 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1  
Программа решения задачи на ЭВМ

```

Sub Исследование_кинематики_точки_шатуна()
Dim U2(24), M2(24), A1(24), A2(24), M3(254), X(24), Y(24), M1(24), U1(24)
R = InputBox("ВВЕДИТЕ РАДИУС КРИВОШИПА")
L = InputBox("ВВЕДИТЕ ДЛИНУ ШАТУНА")
L1 = InputBox("ВВЕДИТЕ РАСТОЯНИЯ LK")
L2 = InputBox("ВВЕДИТЕ РАСТОЯНИЯ LM")
A = InputBox("ВВЕДИТЕ РАСТОЯНИЯ A")
W1 = InputBox("ВВЕДИТЕ УГЛОВУЮ СКОРОСТЬ КРИВОШИПА")
H1 = InputBox("ВВЕДИТЕ ПЕРВЫЙ ПРЕДЕЛ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ФИ")
H2 = InputBox("ВВЕДИТЕ ВТОРОЙ ПРЕДЕЛ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ФИ")
H = InputBox("ВВЕДИТЕ ШАГ7")
d = R / L
I = 0
For f1 = H1 To H2 Step H
    F = f1 * 3.14 / 180
    S1 = Sin(F)
    C1 = Cos(F)
    B = 3.14 - 2 * Atan(Sqr((1 - d * S1) / (1 + d * S1)))
    S2 = Sin(B)
    C2 = Cos(B)
    X(I) = -R * C1 + L1 * C2 - L2 * S2 + R + L
    Y(I) = R * S1 - L1 * S2 - L2 * C2 - A
    M1(I) = Sqr(X(I) + X(I) + Y(I) * Y(I))
    W2 = -W1 * d * C
    U1(I) = W1 * R * S1 - W2 * (L1 * S2 + L2 * C2)
    U2(I) = W1 * R * C1 - W2 * (L1 * C2 - L2 * S2)
    M2(I) = Sqr(U1(I) * U1(I) + U2(I) * U2(I))

```

E2 = W1 \* W1 \* d \* S1

A1(I) = W1 \* W1 \* R \* C1 - E2 \* (L1 \* S2 + L2 \* C2) - W2 \* W1 \* (L1 \* C2 - L2 \* S2)

A2(I) = -W1 \* W1 \* R \* S1 - E2 \* (L1 \* C2 - L2 \* S2) + W2 \* W2 \* (L1 \* S2 + L2 \* C2)

M3(I) = Sqr(A1(I) \* A1(I) + A2(I) \* A2(I))

I = I + 1

Next f1

I = 0

j = 0

For f1 = H1 To H2 Step H

Cells(j + 3, 1) = f1

Cells(j + 3, 2) = X(I)

Cells(j + 3, 3) = Y(I)

Cells(j + 3, 4) = M1(I)

'Cells(j + 4, 1) = 60 \* X(I) + 50

'Cells(j + 4, 2) = "\*"

'Cells(j + 4, 3) = 60 \* Y(I) + 50

'Cells(j + 4, 4) = "I"

Cells(j + 3, 5) = f1

Cells(j + 3, 6) = U1(I)

Cells(j + 3, 7) = U2(I)

Cells(j + 3, 8) = M2(I)

'Cells(j + 4, 5) = 200 \* U1(I) + 50

'Cells(j + 4, 6) = "\*"

'Cells(j + 4, 7) = 200 \* U2(I) + 10

'Cells(j + 4, 8) = "I"

Cells(j + 3, 9) = f1

Cells(j + 3, 10) = A1(I)

Cells(j + 3, 11) = A2(I)

Cells(j + 3, 12) = M3(I)

'Cells(j + 4, 9) = 60 \* X(I) + 50

'Cells(j + 4, 10) = "\*"

'Cells(j + 4, 11) = 60 \* Y(I) + 50

'Cells(j + 4, 12) = "I"

I = I + 1

j = j + 2

Next f1

End Sub