

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

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра общепрофессиональных дисциплин

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ТОЧКИ ШАТУНА

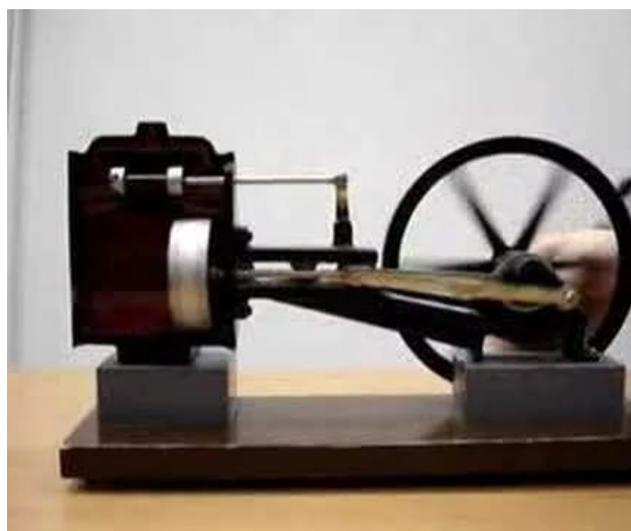
Учебно-методические указания для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по теории механизмов и машин для студентов очной и заочной формы обучения по направлениям подготовки:

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 «Общеинженерные 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.

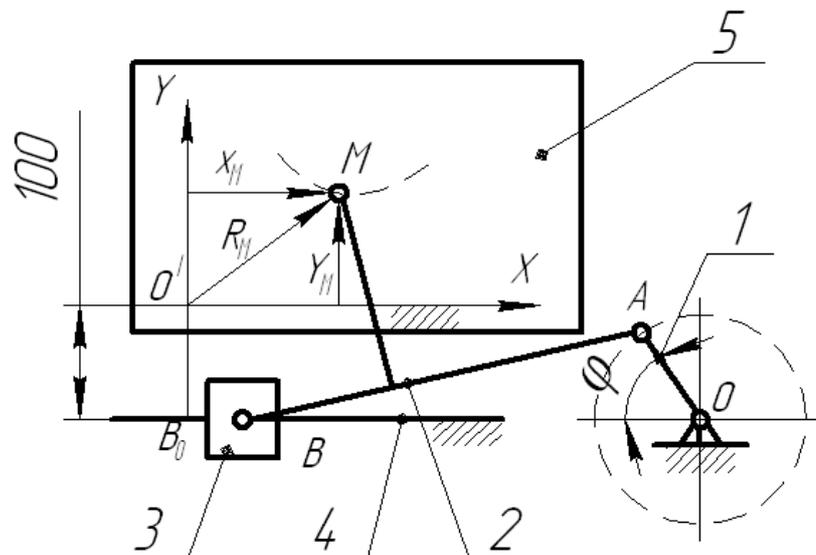


Рисунок 1 - К исследованию кинематики точки шатуна M

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_0O) и отстоит от неё на расстоянии 100 мм, ось Y проходит через точку B_0 – крайнее левое положение центра (точки B) ползуна, когда шатун и кривошип вытянуты в одну линию (угол поворота φ 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 φ (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 φ 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 φ 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), ω_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 ψ_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 ψ_i :

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

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 - ψ_2 , тогда ее скорость в проекции на ось X равна:

$$V_M^X = \frac{K_L}{K_t} \cdot tg\psi_2 = \frac{K_L}{K_t} \cdot \frac{Ob_2}{OB_1} = K_V \cdot Ob_2 = K_V \cdot Y_1'. \quad (4)$$

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

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

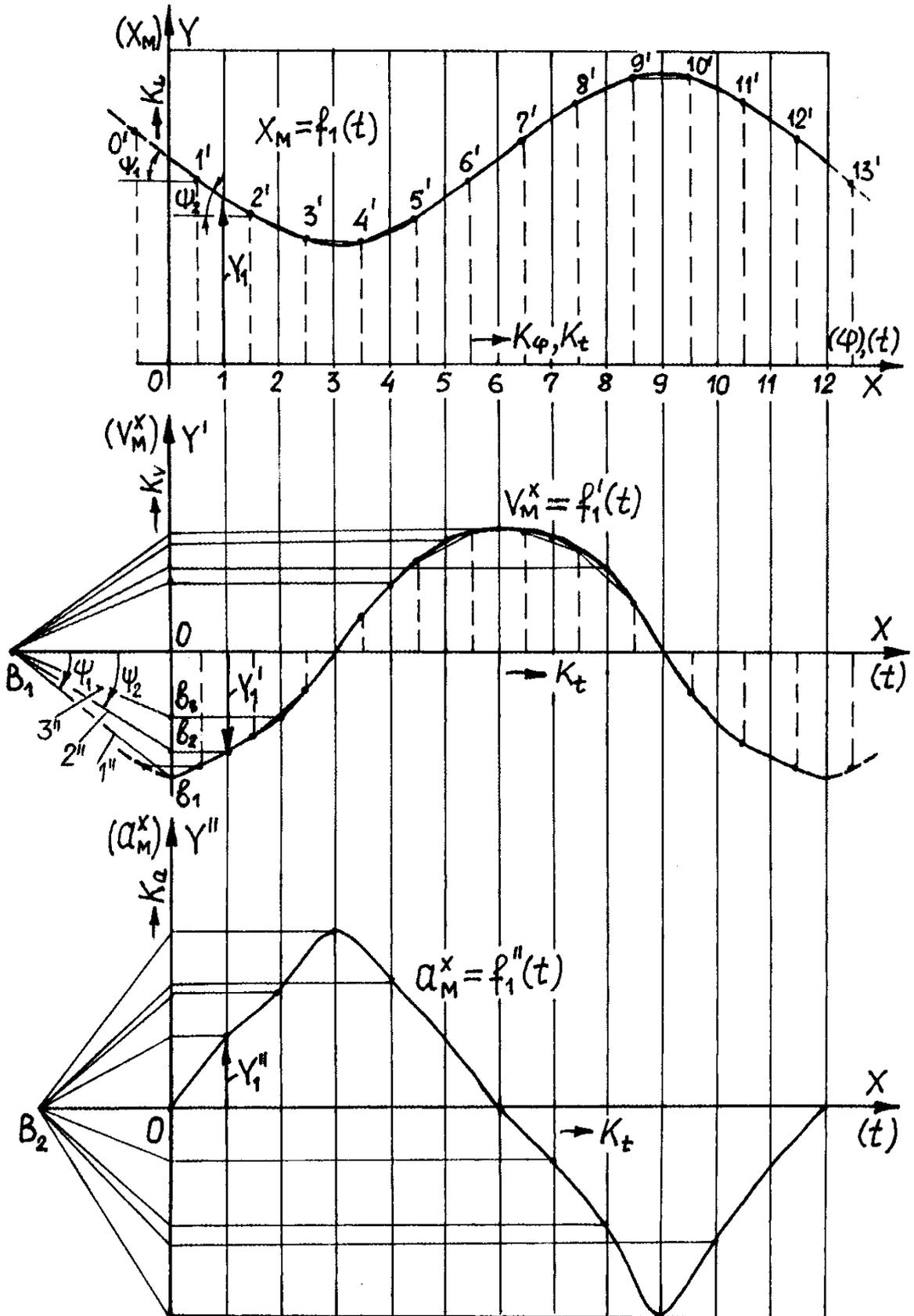


Рисунок 2 – Графики координаты X_M , проекций скорости V_M^X и ускорения a_M^X

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 φ , в масштабе K_L , м/мм (рисунок 3а). Угловая скорость кривошипа ω_1 , рад/с задана. Определяются скорости и ускорения точек.

Модуль скорости точки А 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 А сторону угловой скорости ω_1 , т.е. $V_A \perp OA$.

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

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

$$V_B = Oв \cdot K_V \text{ и } V_{BA} = ав \cdot K_V. \quad (13)$$

Скорость точки M находится из двух уравнений

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

Для решения первого уравнения через точку a плана скоростей проводится прямая перпендикулярно AM , а для решения второго - через точку $в$ прямая перпендикулярно BM . Эти прямые пересекаются в точке m , которая определяет отрезки am и vm , 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:

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

После этого переходят к построению плана ускорений. Ускорение точки A находят по формуле (м/с²):

$$a_A = a_A^n = \omega_1^2 \cdot r, \quad (17)$$

Ускорения точки A будет состоять только из нормальной составляющей ускорения (a_A^n), так как кривошип OA вращается с постоянной угловой скоростью ($\omega_1 = \text{const}$) и поэтому касательная (тангенциальная) составляющая будет равно нулю в виду отсутствия углового ускорения (ϵ_1) ($a_A^t = \epsilon_1 \cdot r = 0$, так как $\epsilon_1 = 0$) и направлено оно по кривошипу AO от точки A к O .

Ускорение точки B определяют из уравнения:

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

$\square_{BO} \qquad \qquad \qquad \square_{AO} \quad \square_{BA} \quad \square_{BA}$

Входящее сюда a_A найдено выше, а 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/с²мм). 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 v' и отрезки Z_B , Z_{BA} и Z_{BA}^t , которые определяют в масштабе K_a ускорение a_B , a_{BA} и составляющую a_{BA}^t . Их модули (м/с²):

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

Ускорение точки M находят из двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \bar{a}_M &= \bar{a}_A + \bar{a}_{MA} \\ \bar{a}_M &= \bar{a}_A + \bar{a}_{MA} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

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 v' 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:

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:

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

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

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:

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

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

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 :

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

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

ω_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 $\omega_1 = \text{const}$:

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

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

ε_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).

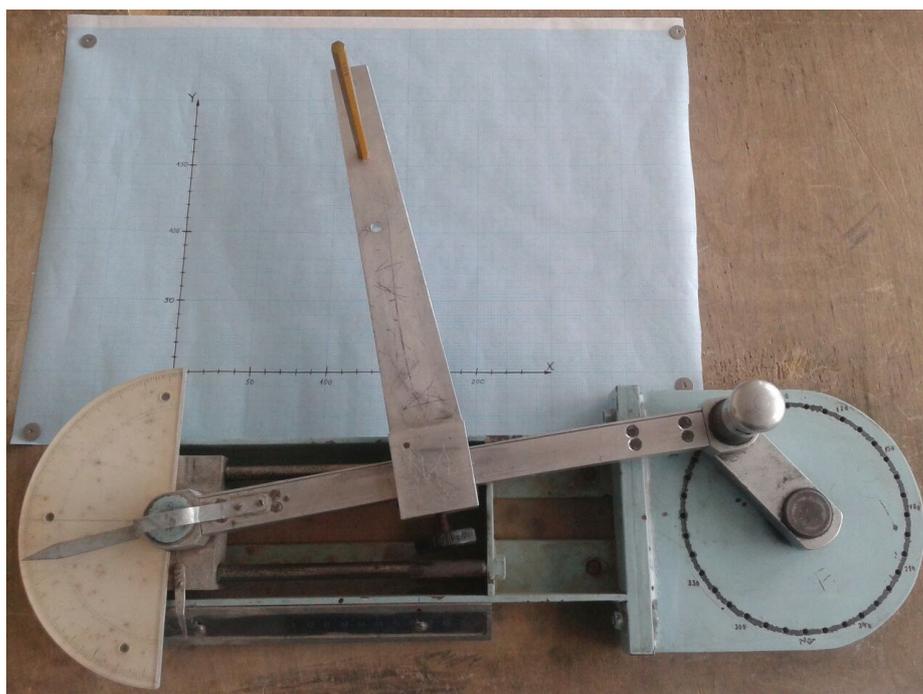


Рисунок 5 – Установка ТММ-К для исследования кинематики точки шатуна

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

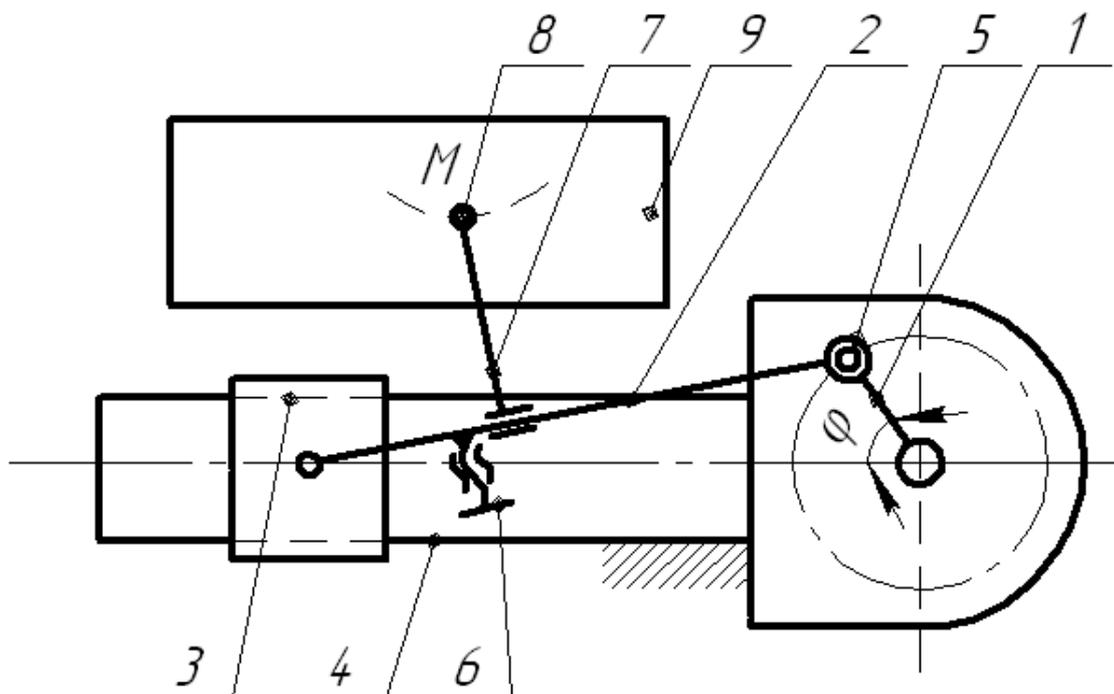


Рисунок 6 - Схема лабораторной установки

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 φ (градуировка шкалы сделана через 10°). 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 φ в пределах одного оборота кривошипа через интервал в 30° .

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 φ°	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 ШАГГ")
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 * Atn(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))

```

$$E2 = W1 * W1 * d * S1$$

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

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

$$M3(I) = \text{Sqr}(A1(I) * A1(I) + A2(I) * A2(I))$$

$$I = I + 1$$

Next f1

$$I = 0$$

$$j = 0$$

For f1 = H1 To H2 Step H

$$\text{Cells}(j + 3, 1) = f1$$

$$\text{Cells}(j + 3, 2) = X(I)$$

$$\text{Cells}(j + 3, 3) = Y(I)$$

$$\text{Cells}(j + 3, 4) = M1(I)$$

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

$$\text{'Cells}(j + 4, 2) = "*"$$

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

$$\text{'Cells}(j + 4, 4) = "I"$$

$$\text{Cells}(j + 3, 5) = f1$$

$$\text{Cells}(j + 3, 6) = U1(I)$$

$$\text{Cells}(j + 3, 7) = U2(I)$$

$$\text{Cells}(j + 3, 8) = M2(I)$$

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

$$\text{'Cells}(j + 4, 6) = "*"$$

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

$$\text{'Cells}(j + 4, 8) = "I"$$

```
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
```