МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ
«ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ТОЧКИ ШАТУНА КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ II КУРСУ
СПЕЦІАЛЬНОСТІ «ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ»

Затверджено на засіданні
кафедри матеріалознавства.
Протокол № 8 від 20.04.2016

Дніпропетровськ УДХТУ 2016

Методичні вказівки до виконання комп'ютерної лабораторної роботи «Дослідження кінематики точки шатуна кривошипно-шатунного механізму» для студентів II курсу спеціальності «Галузеве машинобудування» / Укл.: С.І. Немчинов, Б.В. Виноградов, Д.О. Федін. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2016. – 16 с.

Укладачі: С.І. Немчинов, канд. техн. наук
Б.В. Виноградов, д-р техн. наук
Д.О. Федін, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск О. Б. Гірін, д-р техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання комп'ютерної лабораторної роботи
«Дослідження кінематики точки шатуна
кривошипно-шатунного механізму» для студентів
II курсу спеціальності «Галузеве машинобудування»

Укладачі: НЕМЧИНОВ Сергій Ілліч
ВИНОГРАДОВ Борис Володимирович
ФЕДІН Дмитро Олександрович

Редактор Л.М. Тонкошкур
Коректор Л.Я. Гоцуцова

Підписано до друку 26.05.16. Формат 60×84 1/16. Папір ксерокс. Друк різогр. Умов.-друк. арк. 0,66. Облік.-вид. арк. 0,71. Тираж 100 прим. Замов. № 187. Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015.

ДВНЗ УДХТУ, 49005, Дніпропетровськ-5, просп. Гагаріна, 8.

Редакційно-видавничий комплекс

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Способи задання руху точки

Основним завданням кінематики є вивчення залежності між положенням рухомої точки в просторі та часі. Ця залежність визначає закон руху точки, який вважається відомим, якщо можна визначити положення точки у просторі у довільний момент часу.

Лінія, яку описує точка при своєму русі, називається траєкторією. Рух точки буде прямолінійним у випадку, коли траєкторія точки є пряма лінія і криволінійним – коли траєкторія точки крива.

Рух точки визначається трьома способами: векторним, координатним і натуральним.

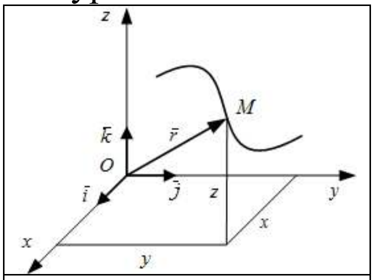


Рисунок 1

Векторний спосіб. При векторному способі задання руху точки її положення визначається за допомогою радіуса-вектора $\bar{r}$, який проводиться з деякої заданої нерухомої точки O в дану точку M (рис. 1). При русі точки радіус-вектор $\bar{r}$ змінюється за величиною і напрямком. Кожному моменту часу t відповідає певне значення $\bar{r}$, тобто $\bar{r}$ є функцією часу t

$$\bar{r} = \bar{r}(t). \tag{1}$$

Функція $\bar{r}(t)$ має бути однозначною, неперервною і щонайменше двічі диференційованою. Рівняння (1) називають кінематичним рівнянням руху точки у векторній формі. Рівняння виражає закон руху точки.

Координатний спосіб. Положення точки можна визначити і за допомогою координат (рис. 1), які при русі точки змінюються у часі. Тоді рівняння руху точки набувають вигляду:

$$\begin{aligned} x &= x(t), \\ y &= y(t), \\ z &= z(t). \end{aligned} \tag{2}$$

Функції (2) мають бути однозначними, неперервними і двічі диференційованими.

Між векторним і координатним способами руху точки існує зв'язок:

$$\bar{r} = x \cdot \bar{i} + y \cdot \bar{j} + z \cdot \bar{k}, \tag{3}$$

де $\bar{i}$, $\bar{j}$, $\bar{k}$ – одиничні вектори (орти), які спрямовані уздовж осей координат Ox, Oy, Oz відповідно.

Зазначимо, що окрім декартової системи координат можна застосовувати і інші – криволінійні системи координат, зокрема полярні, циліндричні, сферичні тощо.

Натуральний (природний) спосіб.

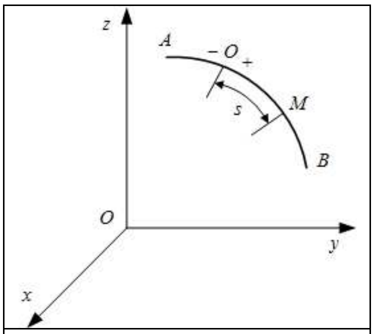


Рисунок 2

Натуральним способом задання руху доцільно користуватися у випадку коли траєкторія руху точки заздалегідь відома. Нехай крива AB є траєкторією точки M при її русі відносно системи відліку $Oxyz$ (рис. 2). Візьмемо на цій траєкторії будь-яку нерухому точку O, яку будемо вважати за початок відліку і встановимо на траєкторії додатній і від'ємний напрямок відліку. Тоді положення точки M на траєкторії буде визначатися криволінійною координатою точки s. При русі точка M переміщується у положення $M_1, M_2, \ldots$, тобто відстань s буде змінюватися у часі. Щоб знати положення точки M на траєкторії у будь-який момент часу, необхідно знати залежність

$$s = s(t). \tag{4}$$

Рівняння (4) виражає закон руху точки M уздовж траєкторії.

2. Швидкість руху точки

Важливою характеристикою руху точки є її швидкість.

При векторному способі задання руху швидкість точки дорівнює першій похідній від радіуса-вектора точки за часом:

$$\bar{v} = \frac{d\bar{r}}{dt}. \tag{5}$$

Вектор швидкості точки в заданий момент часу напрямлений по дотичній до траєкторії точки у бік руху.

При координатному способі задання руху модуль швидкості визначається за формулою

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \tag{6}$$

де v_x, v_y, v_z – проекції швидкості на вісі координат, які визначаються за формулами:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x}; \;\; v_y = \frac{dy}{dt} = \dot{y}; \;\; v_z = \frac{dz}{dt} = \dot{z}. \tag{7}$$

Напрямок швидкості в цьому випадку знаходиться за напрямними косинусами

$$\cos\left(\overline{v}, \hat{x}\right) = \frac{v_x}{v}; \;\; \cos\left(\overline{v}, \hat{y}\right) = \frac{v_y}{v}; \;\; \cos\left(\overline{v}, \hat{z}\right) = \frac{v_z}{v}. \tag{8}$$

При натуральному способі задання руху вираз для швидкості має вигляд:

$$\overline{v} = \dot{s} \cdot \overline{\tau}, \tag{9}$$

де $\overline{\tau}$ – орт, $\dot{s} = \dfrac{ds}{dt} = v_\tau$

Із виразу випливає, що при $v_\tau > 0$ точка рухається у додатному напрямку, а при $v_\tau < 0$ – у від’ємному.

3. Прискорення точки

Прискоренням точки називається векторна величина, яка характеризує зміну модуля і напрямку швидкості точки за часом.

При векторному способі задання руху, вектор прискорення точки в даний момент часу дорівнює першій похідній від вектора швидкості, або другій похідній від радіуса – вектора точки за часом

$$\overline{a} = \frac{d\overline{v}}{dt} = \frac{d^2\overline{r}}{dt^2}. \tag{10}$$

У загальному випадку вектор прискорення $\overline{a}$ лежить у стичній площині і напрямлений у бік угнутості.

При координатному способі задання руху модуль вектора прискорення визначається через його проекції на координатні вісі a_x, a_y, a_z за формулою

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}, \tag{11}$$

де $a_x = \dfrac{dv_x}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2}$, $a_y = \dfrac{dv_y}{dt} = \dfrac{d^2y}{dt^2}$, $a_z = \dfrac{dv_z}{dt} = \dfrac{d^2z}{dt^2}$. (12)

Напрямні косинуси

$$\cos\left(\overline{a},\hat{}\,x\right)=\frac{a_x}{a};\ \cos\left(\overline{a},\hat{}\,y\right)=\frac{a_y}{a};\ \cos\left(\overline{a},\hat{}\,z\right)=\frac{a_z}{a}. \qquad (13)$$

При натуральному способі задання руху, вектор прискорення $\overline{a}$ дорівнює векторній сумі нормального $\overline{a}_n$ і дотичного $\overline{a}_\tau$ прискорень

$$\overline{a}=\overline{a}_n+\overline{a}_\tau. \qquad (14)$$

Модулі нормального і дотичного прискорень визначаються за формулами:

$$a_n=\frac{v^2}{\rho}, \qquad (15)$$

де ρ – радіус кривизни траєкторії в даній точці;

$$a_\tau=\frac{dv}{dt}. \qquad (16)$$

Вектор $\overline{a}_n$ завжди напрямлений у бік угнутості, а вектор $\overline{a}_\tau$ може бути напрямленим як у додатному, так і від’ємному напрямку в залежності від знака проекції a_τ.

Вектор прискорення $\overline{a}$ зображується діагоналлю паралелограма, побудованого на складових $\overline{a}_n$ і $\overline{a}_\tau$. Оскільки ці складові взаємно перпендикулярні, то модуль вектора $\overline{a}$ визначається за формулою

$$a=\sqrt{a_n^2+a_\tau^2}. \qquad (17)$$

4. Рекомендації до розв’язання задач кінематики точки

При розв’язуванні задач по визначенню закону руху і рівнянь траєкторії, необхідно притримуватися такої послідовності:

1) вибирається система нерухомих координат (декартова, полярна або інша) і початок координат. Бажано, щоб, виходячи з цих умов, розв’язування задачі було простим;

2) за даними умовами задачі складаються рівняння руху точки, тобто знаходиться залежність координат від часу;

3) на основі закону руху знаходиться положення точки в будь-який

момент часу, напрямок руху.

При розв'язуванні задач по визначенню швидкостей і прискорень точки корисно притримуватися наступної послідовності:

– вибрати систему координат;

– склaсти рівняння руху точки у вибраний системі координат;

– за рівнянням руху визначити проекції швидкості точки на вісь координат, модуль і напрямок швидкості;

– за проекціями швидкостей визначити проекції прискорень точки на вісі координат, модуль і напрямок прискорення.

5. Лабораторна робота «Дослідження кінематики точки шатуна кривошипно-шатунного механізму»

Мета роботи. Провести дослідження кінематичних характеристик руху точки шатуна кривошипно-шатунного механізму.

Об'єкт дослідження. Кривошип OA кривошипно-шатунного механізму (рис. 3), який обертається з постійною кутовою швидкістю ω. Радіус кривошипа $OA = r$, довжина шатуна $AB = L$, відстань $MB = l$.

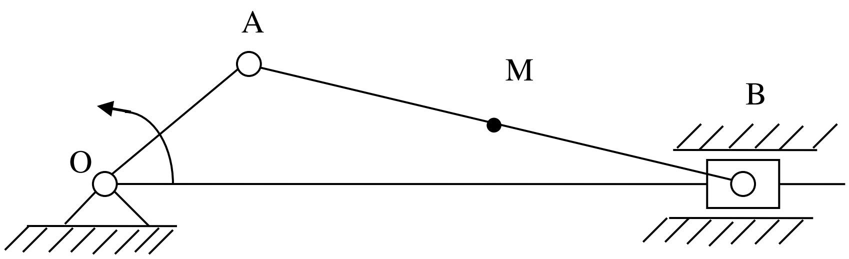


Рисунок 3 – Кривошипно-шатунний механізм

Потрібно:

1) знайти рівняння руху точки M шатуна AB;

2) побудувати траєкторію руху точки M;

3) визначити проекції та модулі швидкості та прискорення точки M для 24 положень механізму і побудувати графіки залежностей цих кінематичних характеристик від кута повороту кривошипу φ ($\varphi = 0 \div 2\pi$);

4) визначити значення дотичного і нормального прискорень, радіуси кривизни точки M для 24 положень і побудувати графіки їх залежностей від кута повороту кривошипу φ;

5) всі розрахунки виконати на ЕОМ.

Вихідні дані взяти із табл. 1.

Вказівки для складання рівнянь руху точки M

Для складання рівнянь руху точки необхідно зобразити кривошипно-шатунний механізм у довільний момент часу t і визначити координати точки M як функції часу t.

Таблиця 1 – Варіанти задач

Варіант	Кутова швидкість кривошипа ω, с$^{-1}$	Довжина кривошипа OA r, см	Довжина шатуна AB L, см	Відношення MB/AB, $\alpha = l/L$
1	2,4π	0,2	0,64	0,1
2	2,3π	0,21	0,68	0,13
3	2,2π	0,22	0,76	0,16
4	2,1π	0,23	0,82	0,19
5	2π	0,24	0,88	0,22
6	1,9π	0,25	0,94	0,25
7	1,8π	0,26	1	0,28
8	1,7π	0,27	0,92	0,31
9	1,6π	0,28	0,98	0,34
10	1,5π	0,29	0,9	0,37
11	1,4π	0,30	0,86	0,4
12	1,3π	0,31	0,94	0,43
13	1,2π	0,32	1,01	0,47
14	1,1π	0,33	1,05	0,5
15	π	0,2	0,6	0,53
16	0,9π	0,21	0,62	0,56
17	0,8π	0,22	0,66	0,59
18	0,7π	0,23	0,68	0,62
19	0,6π	0,24	0,72	0,65
20	0,5π	0,25	0,76	0,68
21	0,4π	0,26	0,84	0,71
22	0,3π	0,27	1,04	0,74
23	0,4π	0,28	1,0	0,77
24	0,5π	0,29	0,98	0,8
25	0,6π	0,3	0,92	0,83
26	0,7π	0,22	0,72	0,86
27	0,8π	0,23	0,74	0,89
28	0,9π	0,24	0,82	0.92
29	0,8π	0,25	0,88	0,95
30	0,7π	0,26	0,94	0,52

Вказівки до розв'язання задачі на ЕОМ

Всі необхідні розрахунки виконуються за допомогою загально математичного пакета прикладних програм Mathcad (версія 11). З метою спрощення роботи в Mathcad на кафедрі матеріалознавства розроблено файл-шаблон*, за допомогою якого студент виконує розрахунки.

6. Приклад виконання лабораторної роботи

Об'єкт дослідження. Кривошип OA кривошипно-шатунного механізму OAB (рис. 4), який обертається з постійною кутовою швидкістю ω. Радіус кривошипа $OA = r$, довжина шатуна $AB = L$, відстань $MB = l$.

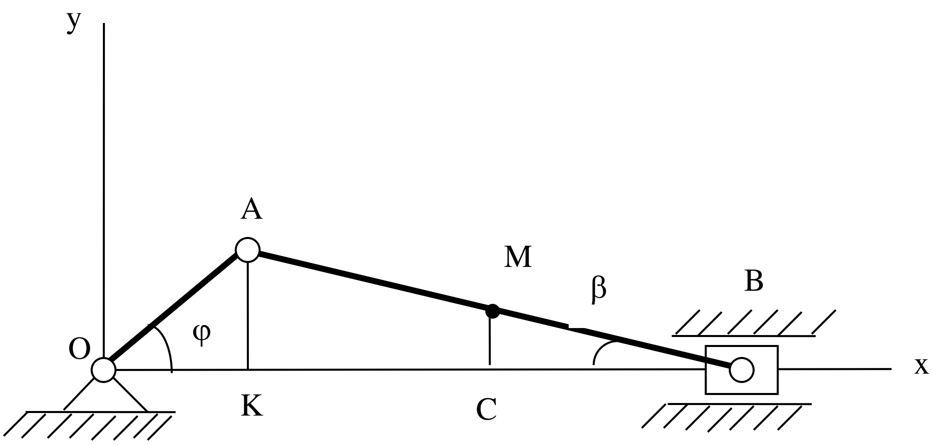


Рисунок 4 – Розрахункова схема кривошипно-шатунного механізму

Дано: $\omega = \pi/6$ с$^{-1}$, $r = 0{,}2$ м, L=0,8 м, $\alpha = 0{,}4$.

Необхідно:

1) знайти рівняння руху точки M шатуна AB;

2) побудувати траєкторію руху точки M ;

3) визначити проекції та модулі швидкості та прискорення точки M для 24 положень механізму і побудувати графіки залежностей цих кінематичних характеристик від кута повороту кривошипу φ (φ=$0 \div 2\pi$);

4) визначити значення дотичного і нормального прискорень, радіуси кривизни точки M для 24 положень і побудувати графіки їх залежностей від кута повороту кривошипу φ;

5) всі розрахунки виконати на ЕОМ.

Примітка

* – у розробці файл-шаблона приймав участь ас. Трубіцин М.М.

Розв’язання задачі

1. Для складання рівнянь руху точки зображаємо кривошипно-шатунний механізм у довільний момент часу t (рис. 4). Вибираємо систему координат Oxy і визначаємо координати точки M як функції часу t. Із рис. 4 знаходимо координати x, y точки M:

$$x = OK + KC, \tag{18}$$

$$y = MC. \tag{19}$$

$$OK = OA\cos\varphi = r\cos\varphi. \tag{20}$$

$$KC = KB - CB = L\cos\beta - MB\cos\beta = L\cos\beta - \alpha L\cos\beta = L\cos\beta(1-\alpha). \tag{21}$$

$$MC = MB\sin\beta = \alpha L\sin\beta. \tag{22}$$

Знайдемо залежності між φ й β.

Із рис. 4 видно, що

$$AK = OA\sin\varphi = AB\sin\beta.$$

Звідси

$$r\sin\varphi = L\sin\beta \Rightarrow \sin\beta = \frac{r}{L}\sin\varphi,$$

$$\cos\beta = \sqrt{1-\sin^2\beta} = \sqrt{1-(\frac{r}{L}\sin\varphi)^2}. \tag{23}$$

Підставляємо (20), (21) у (18), а (22), (23) у (19) і отримуємо рівняння руху точки M:

$$x = r \cdot \cos\varphi + L \cdot (1-\alpha) \cdot \sqrt{1 - (\frac{r}{L}\sin\varphi)^2}\,, \tag{24}$$

$$y = \alpha \cdot L \cdot \frac{r}{L} \cdot \sin\varphi = \alpha \cdot r \cdot \sin\varphi\,. \tag{25}$$

2. Визначаємо швидкість точки M. При координатному способі задання руху точки модуль швидкості визначається за формулою

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}\,, \tag{26}$$

де v_x – проекція швидкості точки M на вісь Ox;

v_y – проекція швидкості точки M на вісь Oy;

v – модуль швидкості точки M.

Для визначення v_x і v_y застосуємо меню Математика (CalculusToolbar, Derivative) для знаходження перших похідних від відповідних функцій.

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -r \cdot \omega \cdot \sin\varphi - (1-\alpha) \cdot r^2 \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot \frac{\omega}{L\sqrt{1 - (\frac{\mathrm{r}}{L}\sin\varphi)^2}}\,. \tag{27}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \alpha \cdot r \cdot \omega \cdot \cos\varphi\,. \tag{28}$$

Напрямні косинуси

$$cos(\bar{v}, x) = \frac{v_x}{v} \Rightarrow (\bar{v}, x) = \arccos\frac{v_x}{v}\,,$$

$$cos(\bar{v}, y) = \frac{v_y}{v} \Rightarrow (\bar{v}, y) = \arccos\frac{v_y}{v}\,. \tag{29}$$

3. Визначаємо прискорення точки M. Модуль прискорення точки M визначимо за формулою

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}\,,$$

де a_x – проекція прискорення точки M на вісь Ox;

a_y – проекція прискорення точки M на вісь Oy.

Для визначення a_x і a_y застосуємо меню Математика (CalculusToolbar, Derivative) для знаходження других похідних від відповідних функцій.

$$a_x = \frac{dV_x}{dt} = -r \cdot \omega^2 \cdot \cos\varphi - ((1-\alpha) \cdot r^4 \cdot \omega^2 \cdot \sin^2\varphi \cdot \cos^2\varphi) / L^3 \cdot (1-(r^2/L^2) \cdot \sin^2\varphi)^{\frac{3}{2}} -$$

$$-((1-\alpha) \cdot r^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos 2\varphi) / L \cdot (1-(r^2/L^2) \cdot \sin^2\varphi)^{\frac{1}{2}}. \tag{30}$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -\alpha \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin\varphi. \tag{31}$$

Напрямні косинуси

$$\cos(\bar{a}, x) = \frac{a_x}{a} \Rightarrow (\bar{a}, x) = \arccos(\frac{a_x}{a}), \tag{32}$$

$$\cos(\bar{a}, y) = \frac{a_y}{a} \Rightarrow (\bar{a}, y) = \arccos(\frac{a_y}{a}). \tag{33}$$

Дотичне прискорення точки M a_τ визначаємо за формулою

$$a_\tau = \frac{v_x \cdot a_x + v_y \cdot a_y}{v}. \tag{34}$$

Нормальне прискорення точки M a_n визначатимемо за формулою

$$a_n = \sqrt{a^2 - a_\tau^2}. \tag{35}$$

Радіус кривизни ρ дорівнює

$$\rho = \frac{V^2}{a_n}. \tag{36}$$

Всі розрахунки виконуємо за допомогою Mathcad (версія 11).

Mathcad-документ надано на сторінках 13-15.

В кінці Mathcad-документу надається тестовий контроль (Test) для перевірки вірності обчислених кінематичних характеристик, які отримав студент.

Mathcad-документ

$$\phi(t,\omega) := \omega\cdot t$$

$$x(t,r,\omega,\alpha,L) := r\cdot\cos(\phi(t,\omega)) + (1-\alpha)\cdot L\cdot\sqrt{1-\left(\frac{r}{L}\cdot\sin(\phi(t,\omega))\right)^2}$$

$$y(t,r,\omega,\alpha) := \alpha\cdot r\cdot\sin(\phi(\omega,t))$$

$$\frac{d}{dt}x(t,r,\omega,\alpha,L) \rightarrow \frac{\omega\cdot r^2\cdot\cos(\omega\cdot t)\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot(\alpha-1)}{L\cdot\sqrt{1-\frac{r^2\cdot\sin(\omega\cdot t)^2}{L^2}}} - \omega\cdot r\cdot\sin(\omega\cdot t)$$

$$vx(t,r,\omega,\alpha,L) := -r\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot\omega - \frac{1-\alpha}{L\cdot\left(1-\frac{r^2}{L^2}\cdot\sin(\omega\cdot t)^2\right)^{\frac{1}{2}}}\cdot r^2\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot\cos(\omega\cdot t)\cdot\omega$$

$$\frac{d}{dt}y(t,r,\omega,\alpha) \rightarrow \alpha\cdot\omega\cdot r\cdot\cos(\omega\cdot t) \qquad vy(t,r,\omega,\alpha) := \alpha\cdot r\cdot\cos(\omega\cdot t)\cdot\omega$$

$$v(t,r,\omega,\alpha,L) := \sqrt{(vy(t,r,\omega,\alpha))^2 + (vx(t,r,\omega,\alpha,L))^2}$$

$$\frac{d^2}{dt^2}x(t,r,\omega,\alpha,L) \rightarrow \frac{\omega^2\cdot r^2\cdot\cos(\omega\cdot t)^2\cdot(\alpha-1)}{L\cdot\sqrt{1-\frac{r^2\cdot\sin(\omega\cdot t)^2}{L^2}}} - \omega^2\cdot r\cdot\cos(\omega\cdot t) - \frac{\omega^2\cdot r^2\cdot\sin(\omega\cdot t)^2\cdot(\alpha-1)}{L\cdot\sqrt{1-\frac{r^2\cdot\sin(\omega\cdot t)^2}{L^2}}} + \frac{\omega^2\cdot r^4\cdot\cos(\omega\cdot t)^2\cdot\sin(\omega\cdot t)^2\cdot(\alpha-1)}{L^3\cdot\left(1-\frac{r^2\cdot\sin(\omega\cdot t)^2}{L^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

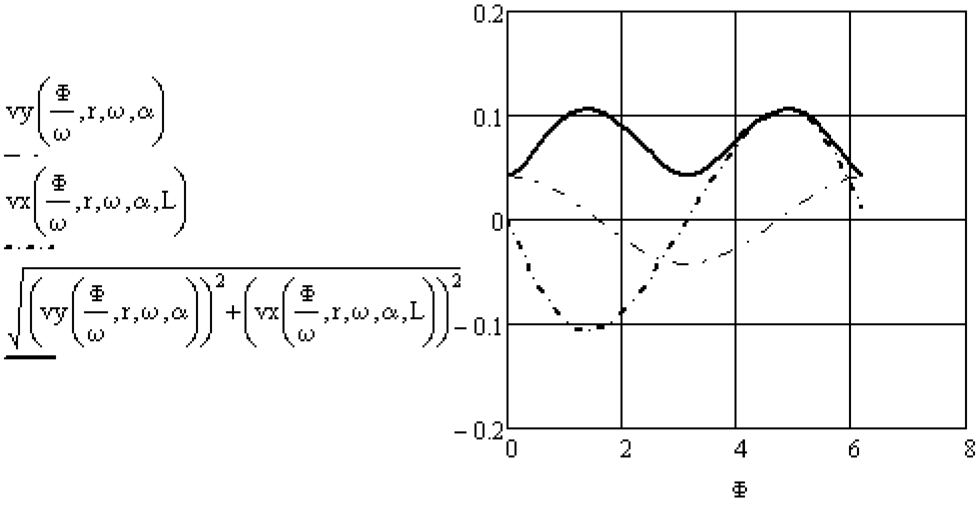
$$a_x(t,r,\omega,\alpha,L) := \frac{d^2}{dt^2}x(t,r,\omega,\alpha,L)$$

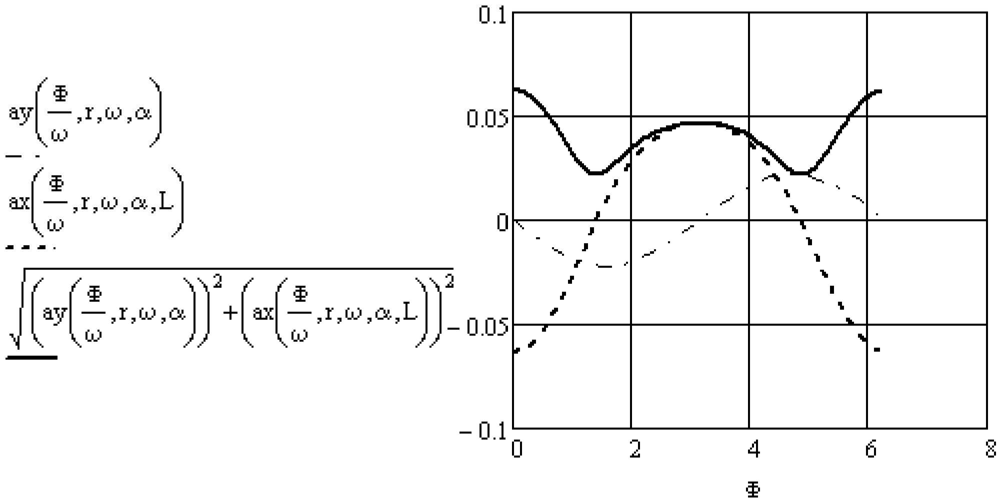
$$\frac{d^2}{dt^2}y(t,r,\omega,\alpha) \rightarrow -\alpha\cdot\omega^2\cdot r\cdot\sin(\omega\cdot t)$$

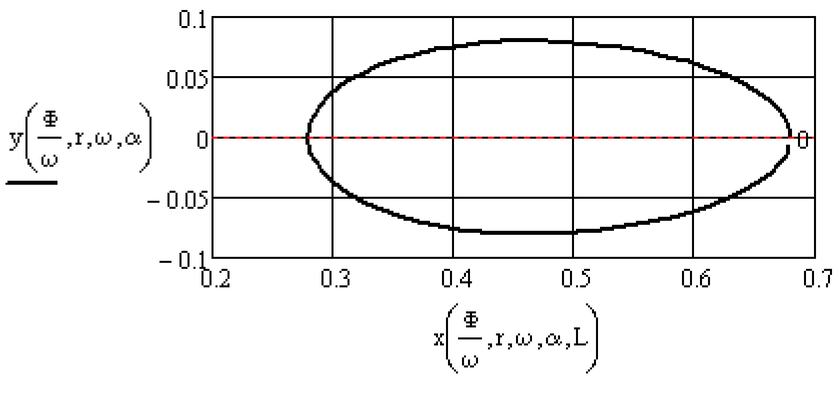
$$a_y(t,r,\omega,\alpha) := \frac{d^2}{dt^2}y(t,r,\omega,\alpha)$$

$$a(t,r,\omega,\alpha,L) := \sqrt{\left(a_x(t,r,\omega,\alpha,L)\right)^2 + \left(a_y(t,r,\omega,\alpha)\right)^2}$$

$$\Phi := 0, 0.1 .. 2\cdot\pi \qquad \begin{pmatrix}\omega & \alpha\\ r & L\end{pmatrix} := \begin{pmatrix}\frac{\pi}{6} & 0.4\\ 0.2 & 0.8\end{pmatrix}$$



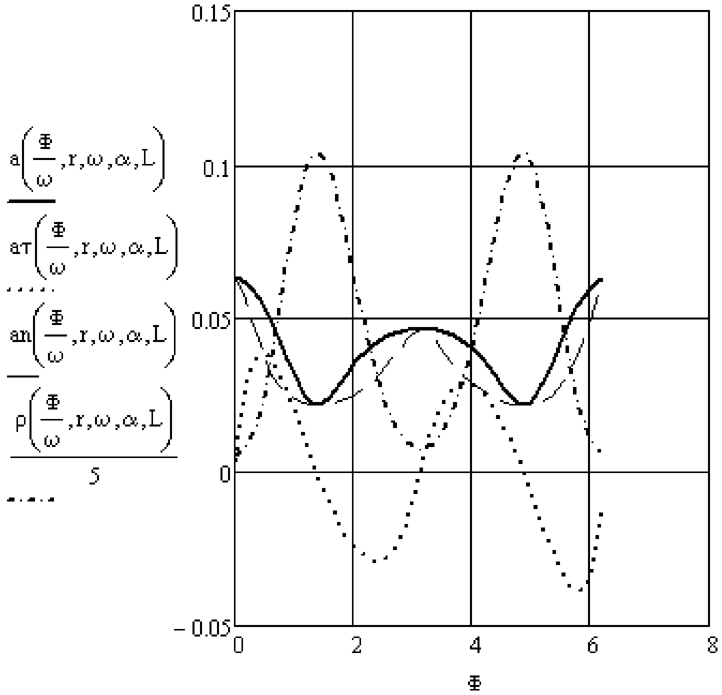




$$a\tau(t,r,\omega,\alpha,L) := \frac{vx(t,r,\omega,\alpha,L)\cdot ax(t,r,\omega,\alpha,L) + vy(t,r,\omega,\alpha)\cdot ay(t,r,\omega,\alpha)}{v(t,r,\omega,\alpha,L)}$$

$$an(t,r,\omega,\alpha,L) := \sqrt{(a(t,r,\omega,\alpha,L))^2 - (a\tau(t,r,\omega,\alpha,L))^2}$$

$$\rho(t,r,\omega,\alpha,L) := \frac{(v(t,r,\omega,\alpha,L))^2}{an(t,r,\omega,\alpha,L)}$$



Test $\psi := \frac{\pi}{6}$ $t := \frac{\psi}{\omega}$

Speed

$vx(t,r,\omega,\alpha,L) = -0.059$ $vy(t,r,\omega,\alpha) = 0.036$ $v(t,r,\omega,\alpha,L) = 0.069$

$\gamma1\,(t,r,\omega,\alpha,L) := \mathrm{acos}\left(\frac{vx(t,r,\omega,\alpha,L)}{v(t,r,\omega,\alpha,L)}\right)$ $\gamma1\,(t,r,\omega,\alpha,L)\,\frac{180}{\pi} = 148.508$

$\gamma2\,(t,r,\omega,\alpha,L) := \mathrm{acos}\left(\frac{vy(t,r,\omega,\alpha)}{v(t,r,\omega,\alpha,L)}\right)$ $\gamma2\,(t,r,\omega,\alpha,L)\,\frac{180}{\pi} = 58.508$

Acceleration

$ax(t,r,\omega,\alpha,L) = -0.052$ $ay(t,r,\omega,\alpha) = -0.011$ $a(t,r,\omega,\alpha,L) = 0.053$

$\theta1(t,r,\omega,\alpha,L) := \mathrm{acos}\left(\frac{ax(t,r,\omega,\alpha,L)}{a(t,r,\omega,\alpha,L)}\right)$ $\theta1(t,r,\omega,\alpha,L)\,\frac{180}{\pi} = 168.031$

$\theta2(t,r,\omega,\alpha,L) := \mathrm{acos}\left(\frac{ay(t,r,\omega,\alpha)}{a(t,r,\omega,\alpha,L)}\right)$ $\theta2(t,r,\omega,\alpha,L)\,\frac{180}{\pi} = 101.969$

Radius

$\rho(t,r,\omega,\alpha,L) = 0.133$

7. Питання до захисту лабораторної роботи

1. Що називається кінематикою?
2. Назвати способи задання руху точки.
3. Що називається траєкторією точки?
4. В якому випадку можна задати натуральний спосіб задання руху точки?
5. В чому полягає відмінність між дуговою координатою та пройденим

шляхом точки. Коли вони збігаються?

6. Чому дорівнює радіус кривизни траєкторії в точці її перетину?

7. За якими формулами обчислюються швидкості та прискорення точок при векторному, координатному та натуральному способах задання руху точки?

8. Як можна пояснити, що напрямок прискорення точки напрямлений у бік угнутості?

9. За даними лабораторної роботи записати рівняння руху точки шатуна у координатній формі.

10. Визначити швидкість та прискорення точки шатуна у заданому викладачем положенні кривошипно-шатунного механізму і порівняти з рішенням, яке отримано на ЕОМ.

11. Пояснити взаємне розміщення екстремумів функції $v_x(t)$ і нулів $a_x(t)$.

12. Пояснити по виду функції $a(t)$ характер зміни функції $v(t)$.

13. Визначити радіус кривизни траєкторії точки шатуна у заданому викладачем положенні кривошипно-шатунного механізму.

14. Що являють собою траєкторії довільних точок кривошипа і шатуна кривошипно-шатунного механізму?

15. За якою формулою обчислюється пройдений шлях, якщо рух точки задано координатним способом?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Павловський М.А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.

2. Никитин Н.Н. Курс теоретической механіки: Учебн. для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов. – 5-е узд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.

3. Виноградов Б.В., Немчинов С.І. Теоретична механіка. Практичні заняття. Електронне тестування. Ч.1. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2014. – 397 с.

4. Сборник заданий для курсовых работ по теоретической механике: Учебн. пособие для техн. вузов / Яблонский А.А., Норейко С.С., Вольфсон С.А. и др.; Под ред. А.А.Яблонского. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 367 с.

5. Бертяев В.Д. Теоретическая механика на базе MATHCAD. Практикум. – С.-Пб.: БХВ – Петербург, 2005. – 752 с.

6. Новожилов И.В., Зацепин М.Ф. Типовые расчеты по теоретической механике на базе ЭВМ: Учебн. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1986. – 136 с.

7. Методические указания к выполнению компьютерных лабораторных работ по дисциплине «Теоретическая механика» для студентов всех специальностей / Сост. Ю.А. Мушенков, В.Т. Вышинский. –Днепропетровск: НМетАУ, 1999. – 26 с.