

УДК 621.81

**М.Пилипець, канд.тех.наук; І.Гевко, канд.тех.наук; М.Паньків**  
*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КУЛАЧКОВИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ МАШИН**

*Подано методологію визначення кінематичних і технологічних параметрів еліптичних і кулачкових транспортно-технологічних систем машин різного службового призначення для виконання технологічних процесів транспортування, очищення, обдирання та інших операцій.*

Транспортно-технологічні системи машин різного службового призначення є важливими елементами механізації і автоматизації машин, що забезпечують необхідну продуктивність і якість виконання технологічних процесів транспортування, очищення, оброблювання зовнішніх поверхонь тіл обертання та ін. Методи і засоби механізації і автоматизації мають здебільшого визначатися тими технологічними параметрами, що характерні для даних операцій і конструкції машини. Іншими словами, засоби і об'єкти автоматизації перебувають у постійному взаємозв'язку, тому їх необхідно розглядати не окремо, а як єдине ціле. При цьому важливими є обґрунтування конструктивних, технологічних і динамічних параметрів з метою правильного розрахунку і компонування конструкторсько-технологічних схем машин і механізмів. У різних типах машин транспортно-технологічні системи визначають якісні і кількісні параметри машини і її конкурентну здатність.

Для прикладу розглянемо процес транспортування і очищення коренеплодів у коренезбиральних машинах, що переміщуються на руслі, утвореному поверхнями вальців із гвинтовими елементами. При цьому коренеплід у початковий момент часу може перекочуватися через поверхню чергового вальця, але при втраті запасу кінетичної енергії розміщується в руслі між вальцями. При виконанні вальців круглого перетину поперечного зміщення коренеплоду практично не буде, що не сприяє їх інтенсивному очищенню. Суттєво підвищують сепараційні властивості очисники виконання їх еліпсні у поперечному перетині [1].

Цьому випадку траєкторія руху центрів ваги коренеплоду має вигляд фігур Ліссажу із суттєвою циклічною зміною прискорень осциляційних переміщень.

Технологія виготовлення таких вальців допускає суттєві відхилення їх профілю від еліпсного, що дозволяє використовувати й інші моделі формалізованого опису поверхні вальців, наприклад, у вигляді овалів чи з використанням тригонометричних функцій. В останньому випадку моделі дозволяють ефективно апроксимувати не тільки поверхні з еліпсним перетином, але кулачкового профілю з  $k$ -виступами. На рис.1 подана схема кулачкового очисника тригранної форми, в якому кулачки, що обертаються в один бік, показані у двох позиціях з кутом провороту  $\varphi=30^\circ$ .

У полярних координатах такі поверхні описуються залежностями

$$\rho = r + \Delta \cos[k(\varphi + \varphi_0)],$$

де  $r$  – середній радіус вальців;  $\Delta$  – максимальне відхилення поверхні від номінальної із середнім радіусом  $r$ ;  $\varphi_0$  – початкове монтажне розміщення перетину;  $k$  – кількість виступів (впадин) кулачкового вальця;  $\rho$  та  $\varphi$  – відповідно радіальний та кутовий параметри довільної точки лінії перетину.

Формалізовано описувати пару вальців доцільніше у параметричній формі. Відповідно для  $i$ -го вальця лінія контуру поверхні буде

$$\begin{aligned} x_i &= [r_i + \Delta_i \cos(k(\varphi_i + \varphi_{i0}))] \cos \varphi_i + x_{0i}; \\ y_i &= [r_i + \Delta_i \cos(k(\varphi_i + \varphi_{i0}))] \sin \varphi_i + y_{0i}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $x_{0i}$  та  $y_{0i}$  – координати центру перерізу.

Коли вальці обертаються з однаковою кутовою швидкістю  $\omega_i$  навколо своєї осі, що направлена паралельно вісі  $Oz$ , зв'язок рухомої системи координат  $O'x'y'$  з нерухомою  $Oxy$  у матричній формі виглядатиме так:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t & 0 \\ \sin \omega t & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Відповідно для рухомих вальців з урахуванням (1) та (2) рівняння їх формалізованого опису виглядатимуть так:

$$\begin{aligned} x_i &= [r_i + \Delta_i \cos(k(\varphi_i + \varphi_{i0}))] \cos(\varphi_i + \omega_i t) + x_{0i}; \\ y_i &= [r_i + \Delta_i \cos(k(\varphi_i + \varphi_{i0}))] \sin(\varphi_i + \omega_i t) + y_{0i}. \end{aligned} \quad (3)$$

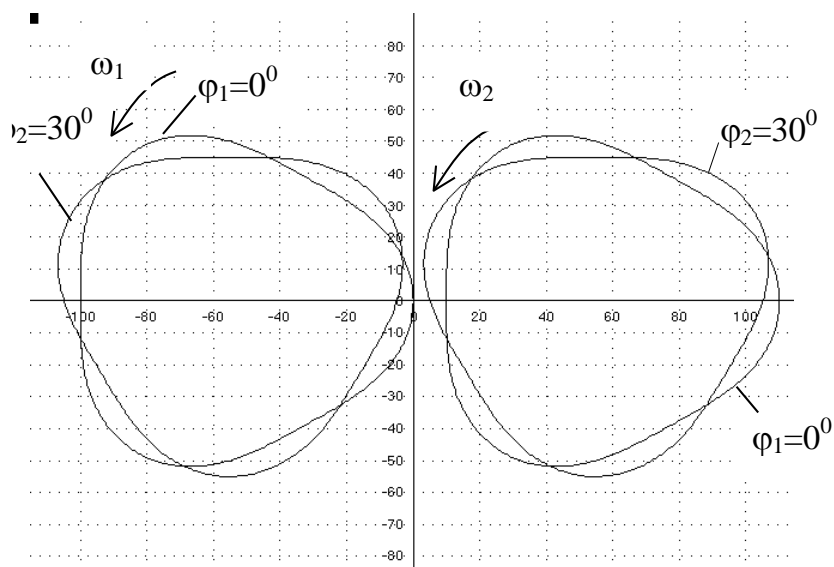


Рис.1. Схема кулачкового очисника коренеплодів тригранної форми з параметрами перетину:  $r_1=r_2=50$  мм,  $\Delta_1=\Delta_2=5$  мм і кутами установки сусідніх секцій, що дорівнюють  $\varphi_1=0^\circ$  і  $\varphi_2=30^\circ$ .

Якщо на поверхні вальців лежить коренеплід, що в першому наближенні моделюється сферою, то центр сфери лежатиме на перетині поверхонь, що є еквідистантами до поверхонь вальців і відстають від них на відстань  $R$  – радіус коренеплоду.

Еквідистанту описує лінія, що є геометричним місцем точок, що лежать на нормалі, проведеній до лінії контуру на віддалі  $U$ .

Рівняння нормалі до довільної точки контура  $E(x_e, y_e)$

$$(y - y_e) \frac{\partial y}{\partial \varphi} = -(x - x_e) \frac{\partial x}{\partial \varphi}. \quad (4)$$

Відповідно координати довільної точки еквідистанти, що відповідає точці  $E(x_e, y_e)$  контура будуть

$$\begin{aligned} x_u &= x_e + u \frac{dy}{d\varphi_i} / \sqrt{\left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2}; \\ y_u &= y_e - u \frac{dx}{d\varphi_i} / \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для лінії контура за залежністю (3)

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\varphi_i} &= -k\Delta_i \sin(k(\varphi_i + \varphi_{i0})) \cos((\varphi_i + \omega_i t)) - \\ &+ [r_i + \Delta_i \cos(k(\varphi_i + \varphi_{i0}))] \sin(\varphi_i + \omega_i t) \\ \frac{dy}{d\varphi_i} &= -k\Delta_i \sin(k(\varphi_i + \varphi_{i0})) \sin((\varphi_i + \omega_i t)) + \\ &+ [r_i + \Delta_i \cos(k(\varphi_i + \varphi_{i0}))] \cos(\varphi_i + \omega_i t) \end{aligned} \quad (6)$$

Розглянемо випадок, коли  $k = 1$ .

Відповідно

$$\left(\frac{dx}{d\varphi_i}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi_i}\right)^2 = r_i^2 + \Delta_i^2 + 2\Delta_i r_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0}). \quad (7)$$

Отже, рівняння поверхонь, які є еквідистантами до поверхонь вальців, описаних залежностями (3) для  $U=R$ , виглядатимуть так:

$$\begin{aligned} x_{ui} &= [r_i + \Delta_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})] \cos(\varphi_i + \omega_i t) + \\ &+ R \frac{[r_i \cos(\varphi_i + \omega_i t) + \Delta_i \cos(2\varphi_i + \varphi_{i0} + \omega_i t)]}{\sqrt{r_i^2 + \Delta_i^2 + 2\Delta_i r_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})}} + x_{0i} ; \\ y_{ui} &= [r_i + \Delta_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})] \sin(\varphi_i + \omega_i t) + \\ &+ R \frac{[r_i \sin(\varphi_i + \omega_i t) + \Delta_i \sin(2\varphi_i + \varphi_{i0} + \omega_i t)]}{\sqrt{r_i^2 + \Delta_i^2 + 2\Delta_i r_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})}} + y_{0i} . \end{aligned} \quad (8)$$

Коли коренеплід радіусом  $R$  перекочується через  $i$ -ий валець, то його центр розміщується на поверхні, що описується залежністю (8). Коли коренеплід лежить на поверхні обох вальців, то координати його центра одночасно належать обом еквідистантам, тобто центр коренеплоду лежить у точці їх перетину,

$$x_c = x_{u1} = x_{u2}; \quad y_c = y_{u1} = y_{u2} . \quad (9)$$

Розв'язок системи рівнянь (9) дозволяє визначити параметри  $\varphi_i$ , що є одночасно параметрами центра коренеплоду та точки дотику коренеплоду до поверхні вальця у довільний момент часу  $t$ . В розгорнутому вигляді систему (9) опишуть залежності:

$$\begin{aligned} x_{01} + [r_1 + \Delta_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_{10})] \cos(\varphi_1 + \omega_1 t) + R \frac{[r_1 \cos(\varphi_1 + \omega_1 t) + \Delta_1 \cos(2\varphi_1 + \varphi_{10} + \omega_1 t)]}{\sqrt{r_1^2 + \Delta_1^2 + 2\Delta_1 r_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_{10})}} &= \\ = x_{02} + [r_2 + \Delta_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_{20})] \cos(\varphi_2 + \omega_2 t) + R \frac{[r_2 \cos(\varphi_2 + \omega_2 t) + \Delta_2 \cos(2\varphi_2 + \varphi_{20} + \omega_2 t)]}{\sqrt{r_2^2 + \Delta_2^2 + 2\Delta_2 r_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_{20})}} &; \\ y_{01} + [r_1 + \Delta_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_{10})] \sin(\varphi_1 + \omega_1 t) + R \frac{[r_1 \sin(\varphi_1 + \omega_1 t) + \Delta_1 \sin(2\varphi_1 + \varphi_{10} + \omega_1 t)]}{\sqrt{r_1^2 + \Delta_1^2 + 2\Delta_1 r_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_{10})}} &= \\ = y_{02} + [r_2 + \Delta_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_{20})] \sin(\varphi_2 + \omega_2 t) + R \frac{[r_2 \sin(\varphi_2 + \omega_2 t) + \Delta_2 \sin(2\varphi_2 + \varphi_{20} + \omega_2 t)]}{\sqrt{r_2^2 + \Delta_2^2 + 2\Delta_2 r_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_{20})}} & \end{aligned} \quad (9a)$$

Параметри  $\varphi_i$  загалом є функціями часу і визначаються числовими методами .

Отже, координати розміщення коренеплоду визначають за залежністю

$$x_c = x_{c_i} = x_{c_i}[\varphi_i(t), \quad t]; \quad y_c = y_{c_i} = y_{c_i}[\varphi_i(t), \quad t].$$

Швидкість переміщення центру коренеплоду

$$\begin{aligned} v_{xc} &= \frac{dx_{c_i}}{dt} = \frac{\partial x_{c_i}}{\partial \varphi_i} \cdot \frac{d\varphi_i}{dt} + \frac{\partial x_{c_i}}{\partial t} ; \\ v_{yc} &= \frac{dy_{c_i}}{dt} = \frac{\partial y_{c_i}}{\partial \varphi_i} \cdot \frac{d\varphi_i}{dt} + \frac{\partial y_{c_i}}{\partial t} . \end{aligned} \quad (10)$$

Тут

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_{c_i}}{\partial \varphi_i} = & -\Delta_i \sin(\varphi_i + \varphi_{i0}) \cos(\varphi_i + \omega_i t) - [r_i + \Delta_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})] \sin(\varphi_i + \omega_i t) - \\ & -R \left\{ \frac{[r_i \sin(\varphi_i + \omega_i t) + 2\Delta_i \sin(2\varphi_i + \varphi_{i0} + \omega_i t)]}{\sqrt{r_i^2 + \Delta_i^2 + 2\Delta_i r_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})}} - \right. \\ & \left. - \frac{[r_i \cos(\varphi_i + \omega_i t) + \Delta_i \cos(2\varphi_i + \varphi_{i0} + \omega_i t)]}{\sqrt{r_i^2 + \Delta_i^2 + 2\Delta_i r_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})}} \cdot \Delta_i r_i \sin(\varphi_i + \varphi_{i0}) \right\}; \\ \frac{\partial y_{c_i}}{\partial \varphi_i} = & -\Delta_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0}) \sin(\varphi_i + \omega_i t) + [r_i + \Delta_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})] \cos(\varphi_i + \omega_i t) - \\ & -R \left\{ \frac{[r_i \cos(\varphi_i + \omega_i t) + 2\Delta_i \cos(2\varphi_i + \varphi_{i0} + \omega_i t)]}{\sqrt{r_i^2 + \Delta_i^2 + 2\Delta_i r_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})}} + \right. \\ & \left. + \frac{[r_i \sin(\varphi_i + \omega_i t) + \Delta_i \sin(2\varphi_i + \varphi_{i0} + \omega_i t)]}{\sqrt{r_i^2 + \Delta_i^2 + 2\Delta_i r_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})}} \cdot \Delta_i r_i \sin(\varphi_i + \varphi_{i0}) \right\}. \end{aligned}$$

Складова  $\frac{d\varphi_i}{dt}$  визначається за умовами числового диференціювання чи із рівності швидкостей, визначених за параметрами  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ , а  $\frac{\partial x_c}{dt}$  та  $\frac{\partial y_c}{dt}$  можна визначити диференціюванням залежності (8) за часом

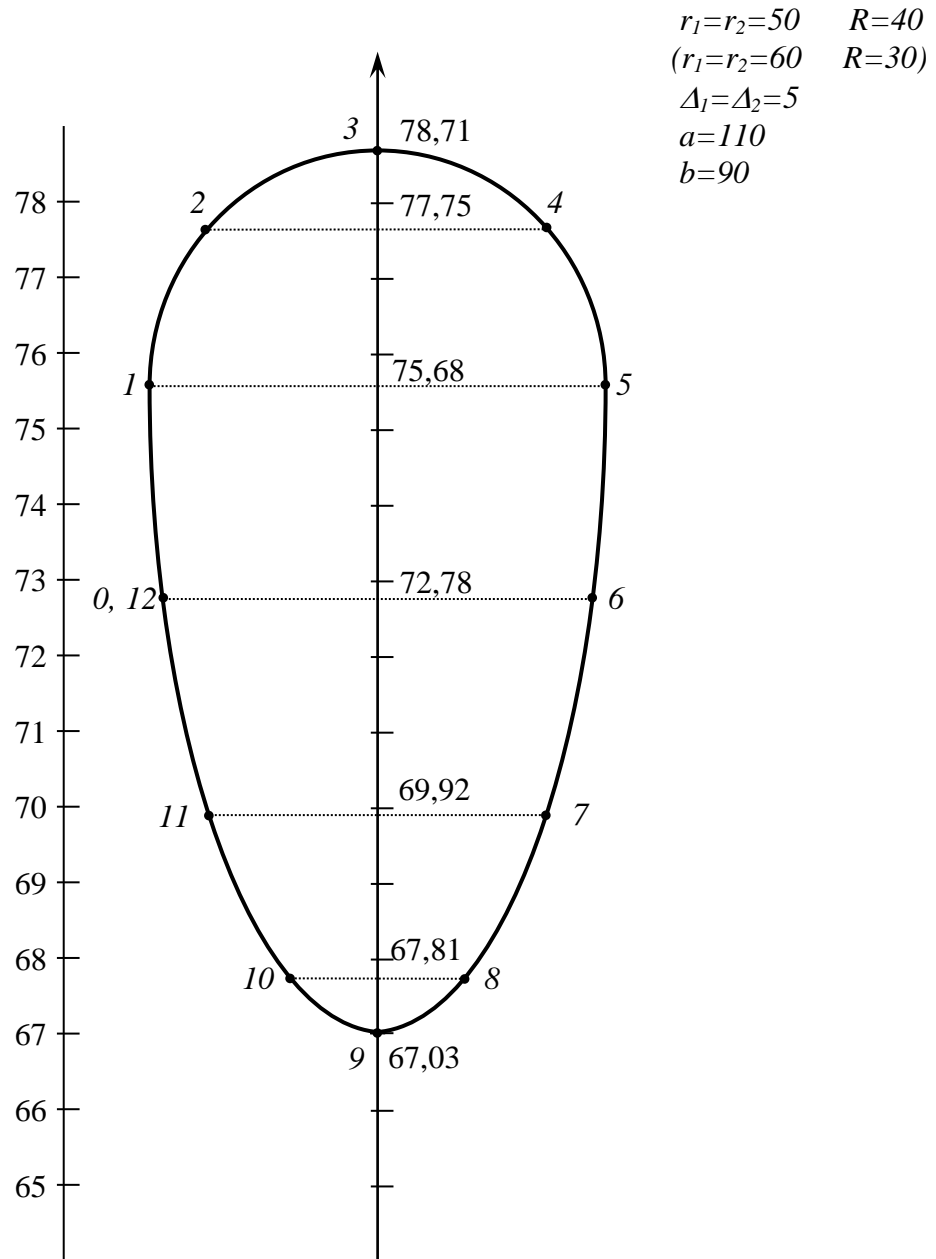
$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} = & -\omega_i [r_i + \Delta_i \cdot \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})] \cdot \sin(\varphi_i + \omega_i t) - \\ & \omega_i R \frac{[r_i \sin(\varphi_i + \omega_i t) + \Delta_i \sin(2\varphi_i + \varphi_{i0} + \omega_i t)]}{\sqrt{r_i^2 + \Delta_i^2 + 2\Delta_i r_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})}} = -\omega_i (y_{c_i} - y_{i0}); \\ \frac{\partial y_{c_i}}{\partial t} = & \omega_i [r_i + \Delta_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})] \cos(\varphi_i + \omega_i t) + \\ & + \omega_i R \frac{[r_i \cos(\varphi_i + \omega_i t) + \Delta_i \cos(2\varphi_i + \varphi_{i0} + \omega_i t)]}{\sqrt{r_i^2 + \Delta_i^2 + 2\Delta_i r_i \cos(\varphi_i + \varphi_{i0})}} = \omega_i (x_{c_i} - x_{i0}). \end{aligned} \tag{11}$$

Прискорення центра перерізу умовного круглого коренеплоду

$$\begin{aligned} a_{x_c} = & \frac{d^2 x_{c_i}}{dt^2} = \frac{\partial^2 x_{c_i}}{\partial \varphi_i^2} \cdot \left( \frac{d\varphi_i}{dt} \right)^2 + \frac{\partial x_{c_i}}{\partial \varphi} \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{\partial^2 x_{c_i}}{\partial t^2}; \\ a_{y_c} = & \frac{d^2 y_{c_i}}{dt^2} = \frac{\partial^2 y_{c_i}}{\partial \varphi_i^2} \cdot \left( \frac{d\varphi_i}{dt} \right)^2 + \frac{\partial y_{c_i}}{\partial \varphi} \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{\partial^2 y_{c_i}}{\partial t^2}. \end{aligned} \tag{12}$$

Рис.2. Траєкторія руху коренеплоду радіусом  $R = 40$  мм у вальцях, середній діаметр яких  $r_1 = r_2 = 50$  мм із двома виступами ( $k = 2$ ), величина яких  $\Delta_1 = \Delta_2 = 5$  мм.

Аналогічно визначасмо складові швидкостей та прискорень для кулачкового профілю з довільним числом  $k$  виступів. На рис.2 показана траєкторія руху коренеплоду радіусом  $R = 40$  мм у вальцях, середній діаметр яких  $r_1 = r_2 = 50$  мм із двома виступами ( $k = 2$ ), величина яких  $\Delta_1 = \Delta_2 = 5$  мм. Такий профіль близький до еліптичного з



великими піввісями  $a = 110$  мм,  $b = 90$  мм.

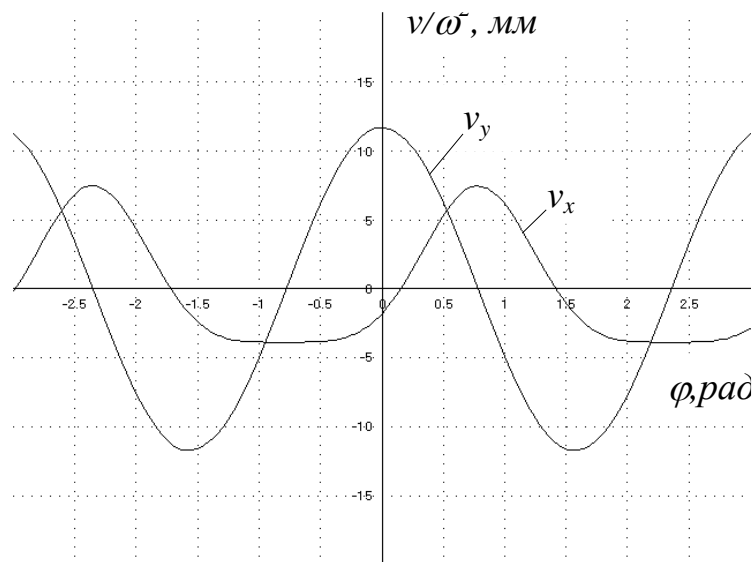


Рис.3. Графік зміни відносних швидкостей коренеплода з кулачкових вальців ( $\kappa=2$ ,  $r_1=r_2=50$  мм,  $\Delta_1=\Delta_2=50$  мм).

Відповідно, на рис. 3 подана зміна складових поданих швидкостей  $\frac{v_x}{\omega}$  та  $\frac{v_y}{\omega}$  по відповідних вісях від кута провороту вальців  $\varphi = \omega \cdot t$  (рад), а на рис. 4 – зміна поданих прискорень  $\frac{a_x}{\omega^2}$  та  $\frac{a_y}{\omega^2}$  від  $\varphi$  для односпрямованого обертання вальців ( $\omega_1 = \omega_2$ ).

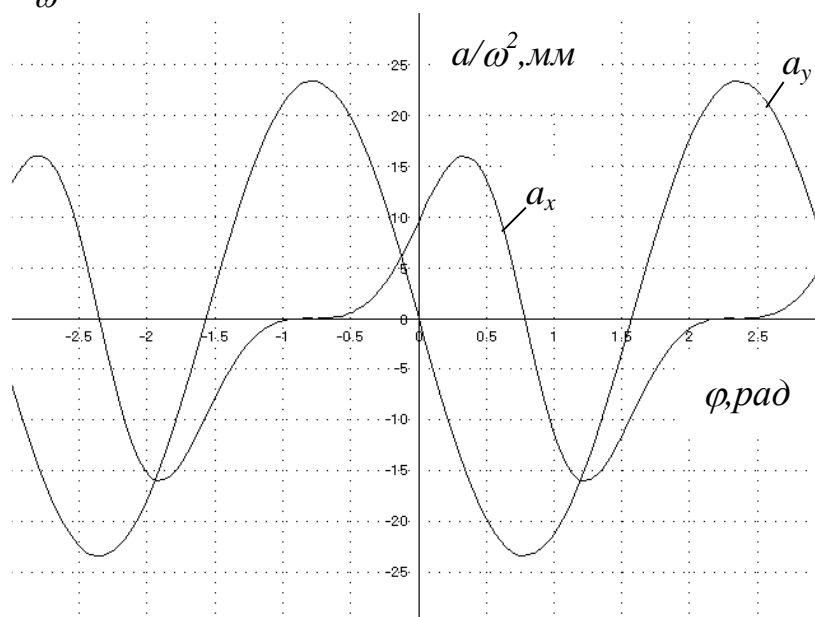


Рис.4. Графік відносних змін прискорень коренеплода з кулачкових вальців ( $\kappa=2$ ,  $r_1=r_2=50$  мм,  $\Delta_1=\Delta_2=50$  мм).

Аналіз залежностей, поданих на графіках рис.3 та рис.4, показує, що у напрямку вісі  $Oy$  (на вертикалі) зміна швидкостей та прискорень практично відповідає гармонійному закону а на вісі  $Ox$  коливання будуть асиметричними. Крім цього, збільшення кількості виступів  $k$  кулачкового вальця приводить до пропорційного збільшення швидкостей коливального процесу та до збільшення їх прискорень пропорційно  $k^2$  при незмінних кутових швидкостях  $\omega_i$  та величин виступів  $\Delta$ , що може використовуватись для підвищення рівня сепарації коренеплодів.

У зв'язку із складністю визначення складових системи (12), прискорення доцільно визначати числовими методами у рамках єдиної задачі визначення

кінематичних, динамічних та силових параметрів коренеплоду у вальцевих очисниках.

Силкові параметри осциляційного руху коренеплоду на кулачкових вальцях визначаються з рівнянь руху

$$\sum X = N_{1x} + N_{2x} + F_{1x}^{mp} + F_{2x}^{mp} - m\ddot{x}_c = 0;$$

$$\sum Y = N_{1y} + N_{2y} + F_{1y}^{mp} + F_{2y}^{mp} - m\ddot{y}_c - mg = 0,$$

де  $N_{i\ x,y}$  – проекції реакції  $i$ -го вальця;  $F_{i\ x,y}^{mp}$  – відповідні складові тертя.

Тут

$$N_{i\ x} = N_i (x_c - x_{c_i}) / R; \quad N_{i\ y} = N_i (y_c - y_{c_i}) / R,$$

де  $x_{c_i}$ ,  $y_{c_i}$  – координати відповідної точки контакту коренеплоду та  $i$ -го вальця.

Відповідно складові тертя

$$F_{i\ x}^{mp} = -\frac{\mu V_{x_i}^{відн} N_i}{|V_i^{відн}|}; \quad F_{i\ y}^{mp} = -\frac{\mu V_{y_i}^{відн} N_i}{|V_i^{відн}|},$$

де  $V_{x_i}^{відн}$ ,  $V_{y_i}^{відн}$  – складові швидкостей відносного переміщення поверхонь коренеплоду та вальців, залежать від напрямку взаємного обертання вальців (одно- чи протилежно спрямованого).

Вказані рівняння можна використовувати лише при стаціонарному розміщенні коренеплоду на поверхнях обох вальців, коли кутова швидкість коренеплоду відсутня чи постійна, а вальці гладкі – без гвинтового накручування. Коли вальці мають гвинтовий ривчак, потрібно розв'язувати систему рівнянь для випадку об'ємного розміщення коренеплоду з урахуванням реакції витка, аналогічно [1].

Для виготовлення шестикулачкових і еліптичних вальців ми реалізували технологічні процеси виготовлення профільних вальців на спеціальному технологічному устаткуванні. Суть процесу полягає у профілюванні труб  $\varnothing 50 \dots 200$  мм на прокатних станах послідовним або суміщеним прокатуванням за одну або декілька операцій.

Таким чином транспортно-технологічні засоби механізації і автоматизації машин різного службового призначення здебільшого визначаються технологічними прийомами, характерними для даних операцій і конструкції машини. Запропонована методика розрахунку кінематичних і технологічних параметрів транспортно-очисних пристроїв коренезбиральних машин дозволяє значно скоротити і спростити порядок розрахунку конструкторсько-компонувальних схем машин для забезпечення якості технологічного процесу з мінімальними затратами людських і матеріальних ресурсів.

*Determining technique of cinematic and technological parameters of ellipse and cam (shaft) transporting-technological systems of machines of different services for conducting technological processes of transportation, cleaning and other operations is presented.*

### Література

1.Гевко Б.М., Рогатинський Р.М., Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин.- Львов: Вища школа, 1989. -175 с.