УДК 514.18:631.3

УТОЧНЕНА ТЕОРІЯ РУХУ МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ ПО ГРАВІТАЦІЙНИМ ПОВЕРХНЯМ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

Булгаков В.М., д.т.н.,
Національна академія аграрних наук України
Калетнік Г.М., д.е.н.,
Кравченко І.Є., к.т.н.,
Вінницький національний аграрний університет
Пилипака С.Ф., д.т.н.
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Тел.: (044) 527-82-26

***Анотація* – виведені диференціальні рівняння руху матеріальної точки по розгортному гелікоїду під дією сили власної ваги. За результатами розв’язку рівнянь побудовані траєкторії на поверхні гелікоїда для різних початкових умов. Знайдено траєкторії для постійної швидкості руху матеріальної точки.**

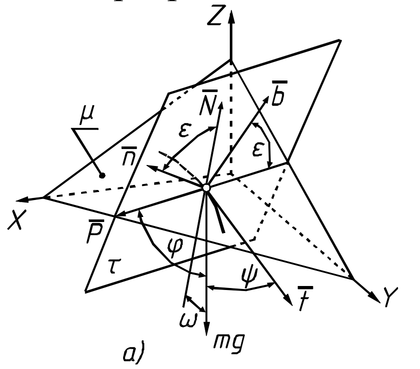
***Ключові слова* – сепаратор, нормальна площина, розгортний гелікоїд, матеріальна точка.**

Постановка проблеми. Фундаментальні дослідження руху матеріальної частинки по фрикційним поверхням сільськогосподарських машин опубліковані у працях академіка Василенко П.М., причому в більшості випадків це здійснюється по кривим або поверхням, які носять назву гравітаційних [1]. Задача по теорії руху частинки по гвинтовій поверхні на даний час розв’язана в достатньо повному і узагальненому вигляді [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Елементарний розв’язок даної задачі в застосуванні до проектування спіральних сепараторів розробив проф. Л.Б. Левенсон [1]. Рух матеріальної частинки по косому (нерозгортному) гелікоїду досить ґрунтовно розглянуто в працях проф. М.І. Акимова [1] і проф. П.М. Заїки [2]. М.І.Сисоєв дав узагальнене розв’язання задачі руху частинки по гравітаційній гвинтовій поверхні сталого кроку, осьовим перерізом якої є довільна крива [3]. Як окремий випадок він розглянув розгортний гелікоїд, а також косий гелікоїд (коли осьовим перерізом є пряма, нахилена під певним кутом до горизонтальної площини). Всі перераховані задачі розв'язані в циліндричній системі координат. Академік Василенко П.М. вказував на можливість розв'язання подібних задач в системі супровідного тригранника траєкторії частинки (так званої натуральної системи координат). В праці [4] в натуральній системі координат розв'язана задача руху матеріальної частинки по нерозгортній гвинтовій поверхні із горизонтальним розташуванням прямолінійних твірних. Така поверхня в нарисній геометрії носить назву прямого закритого гелікоїда або гвинтового коноїда, а в техніці – шнека. В праці показано, що при вертикальному розташуванні осі коноїда матеріальна частинка при русі по ньому спочатку розганяється, а потім сповільнює рух і зупиняється, тобто така поверхня непридатна для гвинтових спусків.

Мета публікації. В статті розв'язана задача знаходження траєкторій руху матеріальних частинок по поверхні розгортного гелікоїда під дією сили власної ваги за наявності тертя.

Основний зміст. Розглянемо загальний випадок руху матеріальної частинки по гравітаційній поверхні. Припустимо, що точка рухається по певній кривій на поверхні (траєкторії). Проведемо в певній точці траєкторії площину, дотичну до поверхні, яку для наочності покажемо трикутним відсіком з вершинами на осях координат (рис. 1,а). Сама поверхня на рис. 1 (а) не показана, оскільки рух по ній в околі точки на траєкторії можна розглядати як рух по дотичній площині. Проведемо із точки пряму, дотичну до траєкторії, одиничний орт $\bar{t}$ якої направлений в сторону руху (співпадає із вектором швидкості). Перпендикулярно до орта $\bar{t}$ проведемо через точку на траєкторії площину τ, в якій знаходяться наступні вектори: $\bar{n}$ - одиничний орт головної нормалі траєкторії; $\bar{N}$ - нормаль до поверхні; $\bar{b}$ - бінормаль. Орти $\bar{t}$ і $\bar{n}$ взаємно перпендикулярні; разом із третім ортом $\bar{b}$, який перпендикулярний до перших двох, ці орти утворюють супровідний тригранник Френе траєкторії. Розглянемо діючі на точку сили. Відцентрова сила, яка виникає внаслідок руху точки по криволінійній траєкторії, завжди направлена вздовж головної нормалі $\bar{n}$ в протилежну сторону від центра кривини. Оскільки орт $\bar{n}$ знаходиться в площини τ, то і відцентрова сила mv^2k, де m – маса частинки, v – швидкість її руху і k – кривина траєкторії в даній точці теж буде діяти в даній площині перпендикулярно до траєкторії руху. На рис. 1,б нормальна площина траєкторії τ показана без спотворення, тобто напрям погляду на неї вибраний зі сторони орта $\bar{t}$; при цьому орт $\bar{t}$ проеціюється в точку, а дотична площина μ - в пряму лінію. Перетин двох перпендикулярних площин τ і μ дає пряму лінію, вздовж якої направлений орт $\bar{P}$ перпендикулярно до $\bar{N}$ і $\bar{t}$. Ця ж лінія буде дотичною до кривої q – лінії перерізу поверхні нормальною площиною τ. Три взаємно перпендикулярних вектори $\bar{t}\bar{N}\bar{P}$ утворюють другий супровідний тригранник траєкторії – тригранник Дарбу. Якщо супровідний тригранник Френе можна побудувати для кривої незалежно від того, знаходиться вона на поверхні чи існує незалежно, то тригранник Дарбу будується тільки для кривої на поверхні, оскільки його орти $\bar{t}$ і $\bar{P}$ знаходяться в площині, дотичній до поверхні в даній точці траєкторії. У названих тригранників орт $\bar{t}$ спільний, а між ортами $\bar{N}$ і $\bar{n}$ та $\bar{b}$ і $\bar{P}$ попарно існує кут *ε,* який при русі частинки змінюється і залежить від її положення на траєкторії, тобто є функцією довжини дуги траєкторії *s*. Оскільки рух частинки по поверхні в конкретній точці траєкторії можна розглядати як рух по дотичній площині, то розкладання діючих на частинку сил доцільно здійснювати в триграннику Дарбу, два орти якого - $\bar{t}$ і $\bar{P}$ - утворюють дотичну площину μ. Як відомо із теоретичної механіки, основне рівняння динаміки точки має вигляд $m\bar{a} = \bar{F}$, де *m* – маса точки, $\bar{a}$ - прискорення яке придає їй рівнодійна прикладених до точки сил $\bar{F}$. Більшість авторів розглядають наведене рівняння в проекціях на осі нерухомої системи координат *OXYZ,* ми ж будемо розглядати в проекціях на орти супровідного тригранника Дарбу $\bar{t}\bar{N}\bar{P}$. В цьому є певний резон, оскільки при русі точки по гравітаційній поверхні тільки сила ваги *mg* (*g=9,81 м/с*^{2}) має змінний напрям в натуральній системі координат, решта ж сил строго орієнтована вздовж осей супровідних тригранників.



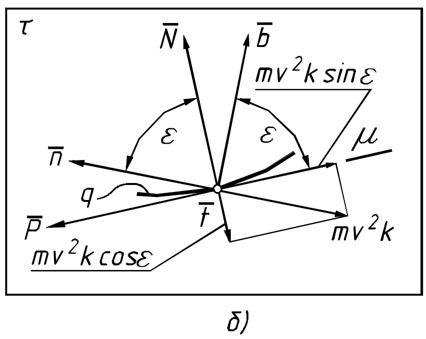


Рис.1. Супровідні тригранники Френе та Дарбу кривої – траєкторії руху частинки по поверхні: а) загальний випадок розташування дотичної площини μ до поверхні в конкретній точці траєкторії; б) дотична площина μ проеціюється в пряму лінію.

Результати досліджень. Запишемо основне рівняння динаміки точки в проекції на орт $\bar{t}$. Оскільки прискорення є похідною швидкості *v* по часу *t* (не путати із ортом $\bar{t}$. В тексті і надалі зустрічатимуться позначення скалярних і векторних величин одними і тими ж літерами), то можна записати в переході від змінної *t* до змінної *s*:

$$\frac{dv}{dt}=\frac{dv}{ds}\cdot\frac{ds}{dt}=v\frac{dv}{ds}, \quad \text{тому що} \quad \frac{ds}{dt}=v. \tag{1}$$

Силою, яка спричинює рух частинки і надає їй прискорення, є складова сили ваги, яка в проекції на орт $\bar{t}$ запишеться $mg\cdot\cos\Psi$, де Ψ - кут між ортом $\bar{t}$ і вектором сили ваги mg (рис. 1, а). Іншою силою, направленою вздовж орта $\bar{t}$ протилежно напряму руху, є сила тертя fG, де f – коефіцієнт тертя, G – тиск, який чинить частинка на поверхню. Враховуючи вищесказане, запишемо

$$mv\frac{dv}{ds}=mg\cos\psi - fG. \tag{2}$$

Сила тиску G направлена вздовж нормалі до поверхні $\overline{N}$ і є сумою двох складових: сили ваги в проекції на орт $\overline{N}$ ($mg\cdot\cos\omega$ - рис. 1,а) і відцентрової сили в проекції на орт $\overline{N}$ ($mv^2k\cdot\cos\varepsilon$ - рис. 1,б). Слід зазначити, що складова відцентрової сили може як збільшувати тиск на поверхню, так і зменшувати його. Напрям її дії залежатиме від того, по якій стороні поверхні рухається частинка (пояснимо на прикладі сфери: якщо по внутрішній стороні, то знак “+”, якщо по зовнішній, то знак “-”). Отже, вираз для сили тиску приймає вигляд

$$G=mg\cos\omega \pm mv^2k\cos\varepsilon. \tag{3}$$

Запишемо основне рівняння динаміки точки в проекції на орт $\overline{P}$. Орт $\overline{P}$ знаходиться в площині τ, перпендикулярній до напряму руху. Складова відцентрової сили $mv^2k\cdot\sin\varepsilon$ намагається змістити частинку в поперечному до траєкторії напрямі вгору по кривій поперечного перерізу q (рис.1,б). Частинка зміщається до тих пір, поки не врівноважиться складовою сили ваги $mg\cdot\cos\varphi$ (рис. 1,а). Отже, рівняння руху в проекції на орт $\overline{P}$ запишеться

$$mv^2k\sin\varepsilon = mg\cos\varphi. \tag{4}$$

Нарешті, рівняння руху частинки в проекції на орт $\overline{N}$ у нас по суті є. Це сила тиску (3), яка врівноважується реакцією поверхні (це рівняння вже входить у рівняння (2), тому система складатиметься із двох рівнянь – в проекціях на орти $\bar{t}$ і $\overline{P}$). Слід зазначити, що рівність нулю виразу (3) свідчить про те, що в даній точці траєкторії тиск на поверхню відсутній і відбувається відрив частинки від поверхні.

Об’єднаємо рівняння (2) і (4) в систему, зробивши деякі спрощення. По-перше, вирази $k\cos\varepsilon = k_н$ і $k\sin\varepsilon = k_г$ в диференціальній геометрії носять назву відповідно нормальної і геодезичної кривини кривої на поверхні [5]. Ці вирази є проекціями кривини кривої на відповідні орти тригранника Дарбу. По-друге, підстановка виразу (3), який для подальшого застосування беремо із знаком “+”, в рівняння (2) дає можливість скоротити його на масу m. Те ж саме стосується рівняння (4). Із врахуванням вищесказаного, остаточно запишемо систему рівнянь (2) і (4)

$$\begin{cases} v\dfrac{dv}{ds} = g\cos\psi - f\,(g\cos\omega + v^2 k_{\text{í}}); \\ v^2 k_{\text{ã}} = g\cos\varphi. \end{cases} \tag{5}$$

Система (5) описує рух матеріальної точки по гравітаційній поверхні в загальному випадку, при цьому кути ψ, φ, ω, швидкість v, геодезична $k_г$ та нормальна $k_н$ кривина траєкторії є функціями її дуги s або іншого параметра, який задає криву на поверхні. Якщо поверхня задана параметричними рівняннями $X=X(\alpha, u)$; $Y=Y(\alpha, u)$; $Z=Z(\alpha, u)$, де α і u – незалежні змінні, то розв'язання системи (5) означає знайти таку залежність між змінними α і u, щоб у кожній точці кривої, яка утвориться на поверхні при знайденій залежності, виконувались умови системи (5).

Розглянемо сказане на конкретному прикладі розгортної поверхні. Така поверхня утворюється множиною прямолінійних твірних, дотичних до просторової кривої. За таку криву візьмемо гвинтову лінію $x=R\cos\alpha$; $y=R\sin\alpha$; $z=b\alpha$, де R – радіус циліндра, на якому розташована гвинтова лінія, b – гвинтовий параметр (постійні величини), α - кут повороту точки навколо осі при її русі по гвинтовій лінії (незалежна змінна). В кожній точці гвинтової лінії проходить прямолінійна твірна, напрямним вектором якої є похідні рівнянь лінії, тому рівняння поверхні (в даному випадку розгортного гелікоїда) запишуться

$$X = R\cos\alpha - wR\sin\alpha;\; Y = R\sin\alpha + wR\cos\alpha;\; Z = b\alpha + wb, \tag{6}$$

де w – друга незалежна змінна поверхні, пропорційна довжині твірної.

Між параметрами R і b гвинтової лінії існує співвідношення $b=R\cdot\mathrm{tg}\beta$, де β - кут підйому гвинтової лінії і він же буде кутом нахилу прямолінійних твірних до горизонтальної площини. З врахуванням сказаного остання строчка рівнянь (6) запишеться

$$Z = R\alpha\cdot\mathrm{tg}\beta + wR\cdot\mathrm{tg}\beta. \tag{7}$$

Знайдемо коефіцієнти першої квадратичної форми поверхні (6) із врахуванням (7). Частинні похідні та коефіцієнти G, F, E будуть:

$$\frac{\partial X}{\partial\alpha} = X_\alpha = -R\sin\alpha - wR\cos\alpha; \qquad \frac{\partial X}{\partial w} = X_w = -R\sin\alpha;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial\alpha} = Y_\alpha = R\cos\alpha - wR\sin\alpha; \qquad \frac{\partial Y}{\partial w} = Y_w = R\cos\alpha;$$

$$\frac{\partial Z}{\partial\alpha} = Z_\alpha = R\cdot\mathrm{tg}\beta; \qquad \frac{\partial Z}{\partial w} = Z_w = R\cdot\mathrm{tg}\beta. \tag{8}$$

$$G = X_\alpha^2 + Y_\alpha^2 + Z_\alpha^2 = \frac{R^2}{\cos^2\beta} + R^2w^2; \quad F = X_\alpha X_w + Y_\alpha Y_w + Z_\alpha Z_w = \frac{1}{\cos^2\beta};$$

$$E = X_w^2 + Y_w^2 + Z_w^2 = \frac{1}{\cos^2\beta}.$$

Сітка координатних ліній поверхні (6) складається із двох сімей: однією сім'єю є прямолінійні твірні, другою – гвинтові лінії. Ця сітка не ортогональна, оскільки середній коефіцієнт F не дорівнює нулю. Для подальшої роботи нам бажано спростити першу квадратичну форму, перейшовши до ортогональної сітки (це єдина можливість спрощення, оскільки крайні коефіцієнти не можуть бути рівними нулю). Тут у нас є дві можливості: залишити одну сім'ю координатних ліній (наприклад, прямолінійні твірні) без змін і відшукати до неї ортогональні траєкторії або ж відшукувати ортогональні траєкторії до сім'ї гвинтових ліній. Ми підемо по першому варіанту з двох причин: по-перше, залишивши сім'ю прямолінійних твірних, ми тим самим спрощуємо другу квадратичну форму, оскільки один із крайніх коефіцієнтів її буде рівний нулю; по-друге, відшукавши ортогональні траєкторії до сім'ї прямолінійних твірних, які є лініями кривини для розгортних поверхонь, ми тим самим одержимо другу сім'ю ліній кривини, що ще більше спростить другу квадратичну форму поверхні, оскільки середній член її в такому випадку буде рівний нулю.

Для відшукання ортогональних траєкторій до сім'ї прямолінійних твірних необхідно розв'язати диференціальне рівняння

$$\mathrm{E}d\mathrm{w} + \mathrm{F}d\alpha = 0. \tag{9}$$

Підставивши в (9) значення відповідних коефіцієнтів із (8), після розв'язання одержимо

$$\mathrm{w} = -\alpha + \mathrm{u}, \tag{10}$$

де u – постійна інтегрування. Надавши для постійної u конкретне значення і підставивши (10) в (6), ми одержимо лінію, перпендикулярну до прямолінійних твірних розгортного гелікоїда. Оскільки таких значень може бути багато і кожному із них буде відповідати своя лінія, то u приймаємо за нову незалежну змінну замість w. Таким чином, після підстановки (10) в (6) і (7) ми одержимо рівняння розгортного гелікоїда, віднесеного до координатних ліній кривини:

$$\begin{aligned} X &= R\cos\alpha + R\alpha\sin\alpha - uR\sin\alpha; \\ Y &= R\sin\alpha - R\alpha\cos\alpha + uR\cos\alpha; \\ Z &= uR\cdot \mathrm{tg}\beta. \end{aligned} \tag{11}$$

Нарешті, щоб параметр u був не пропорційний довжині прямолінійної твірної, а дорівнював її довжині, потрібно напрямний вектор твірної нормувати, тобто одержати напрямні косинуси. Для цього знаходимо модуль вектора, складовими якого є вирази в рівняннях (11) при змінній u. Добувши квадратний корінь із суми їх квадратів, одержимо: $R/\cos\beta$. Розділивши кожну складову на знайдений вираз, одержимо напрямні косинуси і рівняння (11) приймають остаточний вигляд:

$$X = R\cos\alpha + (R\alpha - u\cos\beta)\sin\alpha;$$
$$Y = R\sin\alpha - (R\alpha - u\cos\beta)\cos\alpha;$$
$$Z = u\sin\beta. \qquad (12)$$

Для знаходження нормальної кривини лінії на поверхні необхідно мати вирази першої і другої квадратичних форм. Знайдемо перші, другі і змішані частинні похідні рівнянь (12):

$$\begin{aligned}
&X_\alpha = (R\alpha - u\cos\beta)\cos\alpha; && X_u = -\cos\beta\sin\alpha;\\
&Y_\alpha = (R\alpha - u\cos\beta)\sin\alpha; && Y_u = \cos\beta\cos\alpha;\\
&Z_\alpha = 0; && Z_u = \sin\beta;\\
&X_{\alpha\alpha} = R\cos\alpha - (R\alpha - u\cos\beta)\sin\alpha; && X_{uu} = 0;\\
&Y_{\alpha\alpha} = R\sin\alpha + (R\alpha - u\cos\beta)\cos\alpha; && Y_{uu} = 0;\\
&Z_{\alpha\alpha} = 0; && Z_{uu} = 0;
\end{aligned} \qquad (13)$$
$$X_{\alpha u} = -\cos\beta\cos\alpha; \qquad Y_{\alpha u} = -\cos\beta\sin\alpha; \qquad Z_{\alpha u} = 0.$$

Коефіцієнти *G, F, E* першої квадратичної форми будуть:

$$G = X_\alpha^2 + Y_\alpha^2 + Z_\alpha^2 = (R\alpha - u\cos\beta)^2;$$
$$F = X_\alpha X_u + Y_\alpha Y_u + Z_\alpha Z_u = 0; \quad E = X_u^2 + Y_u^2 + Z_u^2 = 1. \qquad (14)$$

Коефіцієнти *N, L, M* другої квадратичної форми будуть:

$$N = \frac{1}{\sqrt{GE - F^2}}\begin{vmatrix} X_{\alpha\alpha} & Y_{\alpha\alpha} & Z_{\alpha\alpha} \\ X_u & Y_u & Z_u \\ X_\alpha & Y_\alpha & Z_\alpha \end{vmatrix} = \sin\beta\cdot(R\alpha - u\cos\beta);$$
$$(15)$$
$$M = \frac{1}{\sqrt{GE - F^2}}\begin{vmatrix} X_{\alpha u} & Y_{\alpha u} & Z_{\alpha u} \\ X_u & Y_u & Z_u \\ X_\alpha & Y_\alpha & Z_\alpha \end{vmatrix} = 0; \quad L = \frac{1}{\sqrt{GE - F^2}}\begin{vmatrix} X_{uu} & Y_{uu} & Z_{uu} \\ X_u & Y_u & Z_u \\ X_\alpha & Y_\alpha & Z_\alpha \end{vmatrix} = 0.$$

Знайдемо першу та другу квадратичну форми поверхні (12) та їх відношення – нормальну кривину:

$$I = ds^2 = Edu^2 + 2Fdud\alpha + Gd\alpha^2 = du^2 + (R\alpha - u\cos\beta)^2 d\alpha^2; \qquad (16)$$
$$II = Ldu^2 + 2Mdud\alpha + Nd\alpha^2 = \sin\beta\cdot(R\alpha - u\cos\beta)d\alpha^2; \qquad (17)$$
$$k_{í} = \frac{II}{I} = \frac{\sin\beta\cdot(R\alpha - u\cos\beta)d\alpha^2}{du^2 + (R\alpha - u\cos\beta)^2 d\alpha^2}. \qquad (18)$$

Для того, щоб на поверхні (12) була задана лінія, необхідно встановити певну залежність між змінними u і α. Будемо вважати змінну u функцією змінної α: $u = u(\alpha)$. Тоді перша квадратична форма (16), яка є лінійним елементом поверхні (диференціалом дуги траєкторії) і нормальна кривина $k_н$ (18) запишуться:

$$\left(\frac{\mathrm{ds}}{\mathrm{d}\alpha}\right)^2 = \mathrm{u}'^2 + (\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta)^2; \;\; \mathrm{k}_{\text{н}} = \frac{\sin\beta\cdot(\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta)}{\mathrm{u}'^2 + (\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta)^2}, \tag{19}$$

де u' - похідна змінної *u* по параметру α. Для знаходження геодезичної кривини $k_г$ необхідно мати перші і другі похідні рівнянь, що задають траєкторію. Вважаючи, що траєкторія руху точки по поверхні задана залежністю $u = u(\alpha)$, знайдемо похідні рівнянь (12):

$$\begin{aligned}
&\mathrm{x}' = (\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta)\cos\alpha - \mathrm{u}'\cos\beta\sin\alpha;\\
&\mathrm{y}' = (\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta)\sin\alpha + \mathrm{u}'\cos\beta\cos\alpha;\\
&\mathrm{z}' = \mathrm{u}'\sin\beta.\\
&\mathrm{x}'' = (\mathrm{R} - 2\mathrm{u}'\cos\beta)\cos\alpha - (\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta + \mathrm{u}''\cos\beta)\sin\alpha;\\
&\mathrm{y}'' = (\mathrm{R} - 2\mathrm{u}'\cos\beta)\sin\alpha + (\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta + \mathrm{u}''\cos\beta)\cos\alpha;\\
&\mathrm{z}'' = \mathrm{u}''\sin\beta.
\end{aligned} \tag{20}$$

Геодезичну кривину можна знайти, як змішаний добуток трьох векторів: одиничного вектора нормалі до поверхні, одиничного вектора дотичної до кривої і вектора кривини кривої, що можна записати у вигляді визначника [6]

$$\mathrm{k}_{\text{г}} = \left(\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{ds}}\right)^3 \begin{vmatrix} \mathrm{N_x} & \mathrm{N_y} & \mathrm{N_z} \\ \mathrm{x}' & \mathrm{y}' & \mathrm{z}' \\ \mathrm{x}'' & \mathrm{y}'' & \mathrm{z}'' \end{vmatrix}. \tag{21}$$

Нормаль до поверхні знайдемо із векторного добутку векторів, дотичних до координатних ліній:

$$\overline{N} = \begin{vmatrix} X & Y & Z \\ X_\alpha & Y_\alpha & Z_\alpha \\ X_u & Y_u & Z_u \end{vmatrix}, \quad \text{звідки} \quad \begin{aligned} N_x &= Y_\alpha Z_u - Y_u Z_\alpha;\\ N_y &= -X_\alpha Z_u + X_u Z_\alpha;\\ N_z &= X_\alpha Y_u - X_u Y_\alpha. \end{aligned} \tag{22}$$

Підставивши в (22) частинні похідні із (13), одержимо координати вектора нормалі до поверхні, який після приведення до одиничного приймає вигляд:

$$\mathrm{N_x} = \sin\beta\sin\alpha; \quad \mathrm{N_y} = -\sin\beta\cos\alpha; \quad \mathrm{N_z} = \cos\beta. \tag{23}$$

Вирази для визначника (21) беремо із (23) і (20); вираз $d\alpha/ds$ знаходимо із (19) як величину, обернену до $ds/d\alpha$: $\frac{d\alpha}{ds} = \frac{1}{\sqrt{u'^2 + (R\alpha - u\cos\beta)^2}}$. Після підстановки в (21) і спрощень одержимо

$$\mathrm{k}_{\text{г}} = \frac{\mathrm{u}''(\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta) - \mathrm{u}'(\mathrm{R} - 2\mathrm{u}'\cos\beta) + (\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta)^2\cos\beta}{\left[\mathrm{u}'^2 + (\mathrm{R}\alpha - \mathrm{u}\cos\beta)^2\right]^{3/2}}. \tag{24}$$

Для підстановки в систему (5) нам залишилося знайти вирази для кутів ψ, φ, ω, кожен із яких утворений напрямом сили ваги mg і одним із ортів супровідних тригранників. Оскільки напрям дії сили ваги співпадає із віссю *OZ*, то вказані кути визначаться, як кути між напрямом осі *OZ* і відповідним ортом: (для ψ - орт $\bar{t}$; для φ - орт $\overline{P}$; для ω - орт $\overline{N}$). Вектор сили ваги {*0, 0, 1*} спрямований вниз паралельно осі *OZ*, при цьому будемо вважати, що сама вісь *OZ* теж направлена вниз (це відповідає природі руху, оскільки із зростанням параметра α зростає координата *Z* траєкторії і при цьому частинка рухається вниз). В такому випадку косинус відповідного кута буде напрямним косинусом відповідного орта до осі *OZ*, тобто проекцією одиничного вектора на вісь *OZ*. Таким чином, згідно (23)

$$\cos\omega = \cos\beta. \tag{25}$$

З таких же міркувань знайдемо вираз для кута ψ, приймаючи до уваги перші похідні (20), що є координатами вектора, дотичного до траєкторії

$$\cos\psi = \frac{z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}} = \frac{u'\sin\beta}{\sqrt{u'^2 + (R\alpha - u\cos\beta)^2}}. \tag{26}$$

Нарешті, щоб взнати вираз для кута φ, необхідно знати координати вектора $\overline{P}$. Оскільки він перпендикулярний двом векторам $\overline{N}$ і $\bar{t}$, то його координати визначаться із векторного добутку вказаних векторів:

$$\overline{P} = \begin{vmatrix} X & Y & Z \\ N_x & N_x & N_x \\ x' & y' & z' \end{vmatrix}, \quad \text{звідки} \quad \begin{aligned} P_x &= z'N_y - y'N_z; \\ P_y &= -z'N_x + x'N_z; \\ P_z &= y'N_x - x'N_y. \end{aligned} \tag{27}$$

Після підстановки в (27) відповідних виразів із (20) і (23) знайдемо проекції вектора $\overline{P}$ на осі нерухомої системи координат:

$$\begin{aligned} P_x &= -u'\cos\alpha - \cos\beta(R\alpha - u\cos\beta)\sin\alpha; \\ P_y &= -u'\sin\alpha + \cos\beta(R\alpha - u\cos\beta)\cos\alpha; \\ P_z &= \sin\beta(R\alpha - u\cos\beta). \end{aligned} \tag{28}$$

За проекціями вектора $\overline{P}$ (28) знайдемо вираз для косинуса кута φ за формулою

$$\cos\varphi = \frac{P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}} = \frac{\sin\beta(R\alpha - u\cos\beta)}{\sqrt{u'^2 + (R\alpha - u\cos\beta)^2}}. \tag{29}$$

Тепер ми маємо всі вирази, що входять до системи (5), у функції однієї змінної α. Підставляємо в (5) вираз ds із (19), вирази кривин $k_н$ із (19) і $k_г$ із (24) та вирази косинусів кутів із (25), (26) і (29):

$$\begin{cases} \dfrac{vdv}{\sqrt{u'^2+(R\alpha-u\cos\beta)^2}\,d\alpha}=\dfrac{gu'\sin\beta}{\sqrt{u'^2+(R\alpha-u\cos\beta)^2}}- \\ \qquad -f\left[g\cos\beta+\dfrac{v^2\sin\beta(R\alpha-u\cos\beta)}{u'^2+(R\alpha-u\cos\beta)^2}\right]; \\ v^2\dfrac{u''(R\alpha-u\cos\beta)-u'(R-2u'\cos\beta)+(R\alpha-u\cos\beta)^2\cos\beta}{\left[u'^2+(R\alpha-u\cos\beta)^2\right]^{3/2}}= \\ \qquad =\dfrac{g\sin\beta(R\alpha-u\cos\beta)}{\sqrt{u'^2+(R\alpha-u\cos\beta)^2}}. \end{cases} \tag{30}$$

Система (30) включає в себе дві невідомі залежності: $u= u(\alpha)$ і $v=v(\alpha)$. Спрощуємо її і приводимо до вигляду зручного для інтегрування в середовищі *MatLab* за допомогою пакета моделювання динамічних систем *Simulink:*

$$\begin{cases} v'=\dfrac{g}{v}u'\sin\beta-f\left[\dfrac{g}{v}\cos\beta\sqrt{u'^2+(R\alpha-u\cos\beta)^2}+\dfrac{v\sin\beta(R\alpha-u\cos\beta)}{\sqrt{u'^2+(R\alpha-u\cos\beta)^2}}\right]; \\ u''=\dfrac{g}{v^2}\sin\beta\left[u'^2+(R\alpha-u\cos\beta)^2\right]+u'\dfrac{R-2u'\cos\beta}{R\alpha-u\cos\beta}-(R\alpha-u\cos\beta)\cos\beta. \end{cases} \tag{31}$$

Інтегрування подібної системи показано в праці (4) за допомогою відповідної моделі. До її складу входять три інтегратори, кожному із котрих потрібно задавати постійну інтегрування. Три постійних інтегрування задають початкові умови, за яких починається рух частинки, а саме: u_o задає положення частинки на поверхні в початковий момент руху (відстань u вздовж прямолінійної твірної); v_o – початкова швидкість; u_0' - напрям руху в початковий момент, який задається в системі криволінійних координат поверхні. Однак числове значення u_0' не дає уявлення про напрям руху, тому необхідно перейти до кута γ, який утворює вектор швидкості із однією із координатних ліній поверхні, наприклад, із прямолінійною твірною. Оскільки сітка координатних ліній на поверхні ортогональна, то елемент дуги траєкторії ds можна розглядати як гіпотенузу елементарного прямокутного трикутника (рис. 2), катетами якого є елементи довжин координатних ліній. Це можна зрозуміти із виразу (16), якщо його трактувати як теорему Піфагора. Із прямокутного трикутника (рис. 2) маємо:

$$\mathrm{ctg}\gamma=\frac{du}{(R\alpha-u\cos\beta)d\alpha} \qquad \text{або} \qquad u'=\mathrm{ctg}\gamma(R\alpha-u\cos\beta). \tag{32}$$

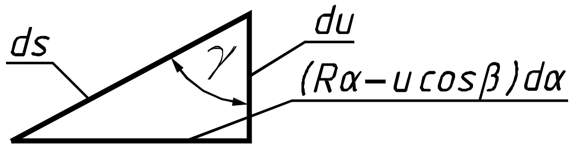


Рис. 2. До визначення кута γ між напрямом руху частинки і прямолінійною твірною поверхні.

Задавши координати точки на поверхні ($u = u_o$ і $\alpha=\alpha_o$), а також величину потрібного кута γ, із виразу (32) знаходимо $u'=u'_0$.

За результатами інтегрування системи (31) в середовищі *MatLab* побудовано траєкторії руху матеріальної частинки за різних початкових умов на поверхні розгортного гелікоїда. Поверхня гелікоїда побудована за рівняннями (6), (7) при $R=10$ *м*, $\beta=30^0$. На рис.3,а показані траєкторії руху матеріальної частинки з коефіцієнтом тертя $f=0,3$, яка починає свій рух з однієї і тієї ж точки і з однаковою початковою швидкістю ($\alpha_o=0$, $u_o=20$ *м*, $v_o=15$ *м/с*), але в різних напрямах. На рис. 3,б показано графіки зміни швидкості, що відповідають цим траєкторіям. На рис. 4 показані траєкторії і відповідні їм графіки зміни швидкостей при тому ж коефіцієнтові тертя $f=0,3$, але при різних початкових умовах. У всіх випадках частинка починає свій рух під кутом $\gamma=45^0$ до прямолінійної твірної, проте з різних точок і з різними початковими швидкостями.

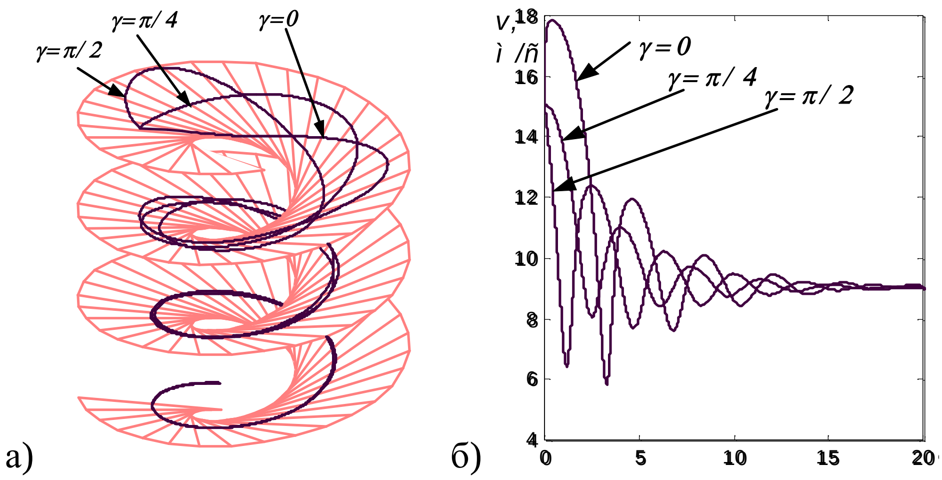


Рис. 3. Траєкторії руху матеріальної частинки і відповідні графіки швидкостей при однакових початкових умовах ($\alpha_o=0$, $u_o=20$ м, $v_o=15$ м/с, $f=0,3$) і різних напрямах на початок руху.

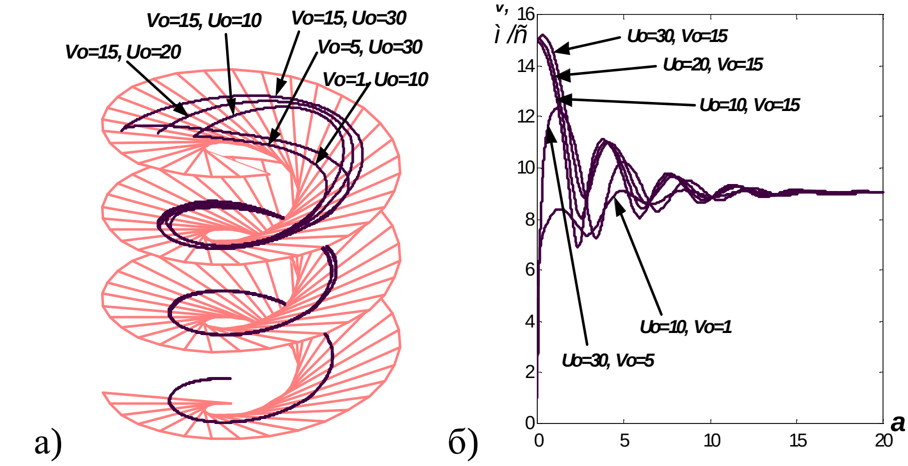


Рис. 4. Траєкторії і відповідні графіки швидкостей для матеріальної частинки, що починає свій рух із різних точок на поверхні і з різними початковими швидкостями.

Розглянемо траєкторії руху і відповідні графіки швидкостей для матеріальних частинок, які мають різні коефіцієнти тертя і вступають на поверхню із початковими швидкостями близькими до нуля. Напрям вступу на поверхню при цьому практично не має значення, оскільки частинка починає рухатися під дією власної ваги по лінії найбільшого нахилу (вздовж прямолінійної твірної поверхні). Такий рух має місце при сепарації матеріалів з різними коефіцієнтами тертя. На рис. 5, а показано траєкторії руху частинок із різними коефіцієнтами тертя, які вступають на поверхню в одній і тій же точці (при $\alpha=0$, $u_o=30$), а на рис. 5, б – графіки зміни швидкостей. На відміну від попередніх графіків, на яких швидкість показана в залежності від кута повороту α, на рис. 5, б швидкість є функцією довжини дуги траєкторії, що є більш природнім. Зокрема, з цих графіків видно, що частинки з різними коефіцієнтами тертя проходять шлях різної довжини при однаковому числі обертів навколо осі гелікоїда.

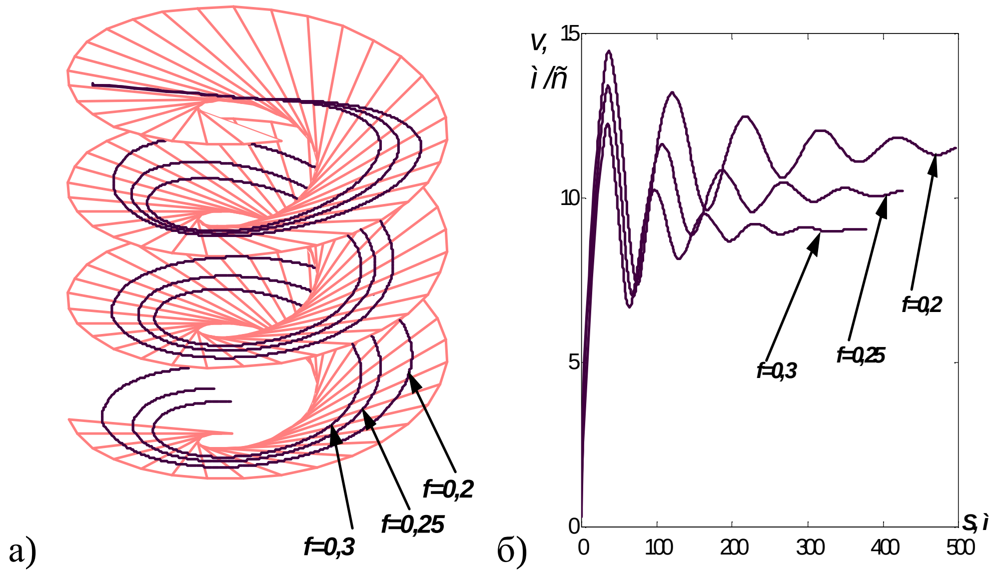


Рис. 5. Траєкторії і відповідні графіки швидкостей для частинок з різними коефіцієнтами тертя.

Із рисунків 3,а, 4,а видно, що матеріальні частинки із однаковим коефіцієнтом тертя з часом виходять на одну і ту ж траєкторію незалежно від початкових умов руху, а їхні швидкості стабілізуються і наближаються до сталої величини ($v=9$ *м/с* згідно графіків на рис. 3,б і 4,б). Отже, можна зробити висновок, що з часом частинка буде рухатися з постійною швидкістю по гвинтовій лінії поверхні, тобто на певній відстані ρ від осі гелікоїда. Відстань ρ від осі гелікоїда до точки на траєкторії можна знайти на горизонтальній проекції за теоремою Піфагора

$$\rho=\sqrt{X^2+Y^2}=\sqrt{R^2+(R\alpha-u\cos\beta)^2}, \tag{33}$$

де вирази для X і Y взято із рівнянь (12). Розв'язавши (33) відносно u, знайдемо вираз $u=u(\alpha)$ та його похідні:

$$u=\frac{R\alpha-\sqrt{\rho^2-R^2}}{\cos\beta};\qquad u'=\frac{R}{\cos\beta};\quad u''=0. \tag{34}$$

Підставивши вирази (34), а також $v'=0$ в систему (31), після спрощень одержимо:

$$\begin{cases} 0=\dfrac{g}{v}R\cdot\mathrm{tg}\beta-f\left[\dfrac{g}{v}\cos\beta\sqrt{R^2\mathrm{tg}^2\beta+\rho^2}+\dfrac{v\sin\beta\sqrt{\rho^2-R^2}}{\sqrt{R^2\mathrm{tg}^2\beta+\rho^2}}\right]; \\ 0=\dfrac{g}{v^2}\sin\beta(R^2\mathrm{tg}^2\beta+\rho^2)-\dfrac{R^2}{\sqrt{\rho^2-R^2}\cos\beta}-\sqrt{\rho^2-R^2}\cos\beta. \end{cases} \tag{35}$$

Вважаючи параметри гелікоїда R і β заданими, а коефіцієнт тертя f відомим, приходимо до висновку, що система (35) містить дві невідомі величини: ρ і v. Розв'язавши систему (35) знайдемо ці величини:

$$\rho^2=\frac{R^2\sin^2\beta\left(\cos\beta+\sqrt{4f^2+\cos^2\beta}\right)}{2f^2\cos\beta}; \tag{36}$$

$$v^2=R\frac{g}{f}\mathrm{tg}\beta\sqrt{\frac{\cos\beta(\sin^2\beta-2f^2)+\sin^2\beta\sqrt{4f^2+\cos^2\beta}}{2\cos\beta}}. \tag{37}$$

Таким чином, вирази (36), (37) дають можливість розрахувати швидкість частинки із заданим коефіцієнтом тертя та траєкторію її руху по розгортному гелікоїду із відомими конструктивними параметрами після того, як рух стабілізувався. Розрахуємо ρ і v для гелікоїда із конструктивними параметрами $R=10$ *м*, $\beta=30^0$ і відомому коефіцієнтові тертя $f=0,3$. Підстановка названих величин в (36) і (37) дає: $\rho=17,55$ *м*; $v=9,03$ *м/с*. Ми одержали підтвердження того, що інтегрування системи (31) чисельними методами здійснено правильно, оскільки із графіків швидкостей (рис. 3,б і 4,б) видно, що по мірі руху швидкість частинки стабілізується і наближається до позначки 9 *м/с*.

Задачу руху матеріальної частинки по розгортному гелікоїду в циліндричній системі розв'язав М.І. Сисоєв [3] і дав певні залежності, щоправда не в такому закінченому вигляді, як вирази (36) і (37). Однак можна показати, що одержані ним залежності підтверджують результати (36) і (37). Зокрема, на стор. 8 формула (48) дає залежність між коефіцієнтом тертя і кутами α і β, яка згідно наших позначень запишеться:

$$f=\cos\beta\cdot\mathrm{tg}\alpha\sqrt{\mathrm{tg}^2\alpha+1},\qquad \text{де}\qquad \mathrm{tg}\alpha=\frac{R\mathrm{tg}\beta}{\rho}. \tag{38}$$

Кут β відповідає аналогічному куту в наших викладках, а через α позначено кут підйому гвинтової лінії, по якій рухається частинка. Якщо значення виразу тангенса цього кута (в (38) справа) підставити у лівий вираз, одержимо

$$f = \frac{R\sin\beta}{\rho^2}\sqrt{R^2 tg^2\beta + \rho^2}. \tag{39}$$

Розв'язавши (39) відносно ρ^2, одержимо відому формулу, наведену в (36). Наведемо ще одну залежність (47) із [3, стор. 8]

$$v^2 = g\rho \cdot tg\beta\sqrt{1 - i^2}, \qquad \text{де} \qquad i = \frac{R}{\rho}. \tag{40}$$

Підставивши в (40) вираз для ρ із (36), після спрощення матимемо формулу для розрахунку швидкості, яка точно збігається із одержаною нами відповідною формулою (37).

Висновки. В статті розв'язана задача знаходження траєкторій руху матеріальних частинок по поверхні розгортного гелікоїда під дією сили власної ваги за наявності тертя. Результати розв'язку диференціальних рівнянь, одержані авторами при використанні натуральної системи координат, повністю збігаються із аналогічними результатами інших авторів, котрі використовували циліндричну систему координат. Сучасний рівень програмних продуктів дав можливість зробити візуалізацію розрахунків, тобто показати на наочних зображеннях поверхні траєкторії руху частинки за різних початкових умов. Такий підхід відкриває нові можливості в дослідженні кінематичних параметрів руху частинок і одержанні іншої додаткової інформації.

Література.

1. *Василенко П.М.* Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин/ *П.М. Василенко*. -К.: УАСХН, 1960. - 283 с.
2. *Заика П.М.* Избранные задачи земледельческой механики/ *П.М. Заика*. – К.: Изд-во УСХА, 1992. – 507 с.
3. *Сысоев Н.И.* Теоретические основы и расчет сортировки "Змейка"/ *Н.И. Сысоев* // Сельхозмашина - 1949. - № 8 - С. 5 – 8.
4. *Войтюк Д.Г.* Знаходження траєкторії руху матеріальної частинки по гравітаційних лінійчатих поверхнях із горизонтальними твірними/ *Д.Г. Войтюк , С.Ф. Пилипака* // Збірник наукових праць НАУ "Механізація сільськогосподарського виробництва". – К.: НАУ, 2002. – Т.12.– С. 58-69.
5. *Выгодский М.Я.* Дифференциальная геометрия/ М.Я. *Выгодский*. - М.: ГИТТЛ, 1949. - 512 с.
6. *Гячев Л.В.* Теория лемешно-отвальной поверхности/ Л.В. *Гячев*. – Зерноград, 1961. – 317 с.

УТОЧНЕННАЯ ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ ПО ГРАВИТАЦИОННЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Булгаков В.М., Калетник Г.Н., Кравченко И.Е., Пилипака С.Ф.

Аннотация **- выведены дифференциальные уравнения движения материальной точки по развертывающемуся геликоиду под действием силы собственного веса. По результатам решения уравнений построены траектории на поверхности геликоида для разных начальных условий. Найдены траектории для постоянной скорости движения материальной точки.**

REFINED THEORY OF MOTION MATERIAL POINT ON BY GRAVITATIONAL SURFACES AGRICULTURAL MACHINES

B. Bulgakov, G. Kaletnik, I. Kravchenko, S. Pilipaka

Summary

The differential equations of mass point motion on fold helicoids-down under operation of force of own weight are obtained. The trajectory on a surface of a helicoid for different initial conditions are constructed by the results of the solution of equations. The trajectory for constant speed of motion of a mass point are found.

УДК 693.546

СИЛОВИЙ АНАЛІЗ РОЛИКОВОЇ ФОРМУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З ЕНЕРГЕТИЧНО ВРІВНОВАЖЕНИМ ПРИВОДОМ

Ловейкін В.С., д.т.н.,
Ковбаса В.П., д.т.н.,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
Почка К.І. , к.т.н.
Київський національний університет будівництва і архітектури
Тел.: (044) 527-88-95

Анотація **- у статті запропонована конструкція роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом для трьох формувальних візків, що дозволяє зменшити енергетичні витрати та розвантажити приводний вал кривошипів.**

Ключові слова **- роликова формувальна установка, енергетично врівноважений привод, кривошип, формування залізобетонних виробів.**

Постановка проблеми. В існуючих установках поверхневого ущільнення залізобетонних виробів використовується кривошипно-повзунний або гідравлічний привод зворотно-поступального руху формувального візка з укочувальними роликами [1-3]. Під час постійних пускогальмівних режимів руху виникають значні динамічні навантаження в елементах приводного механізму та в елементах формувального візка, що може привести до передчасного виходу установки з ладу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих теоретичних та експериментальних дослідженнях машин роликового формування залізобетонних виробів обґрунтовано їхні конструктивні параметри та продуктивність [1-3]. Разом з тим недостатньо уваги приділено дослідженню діючим динамічним навантаженням [4, 5] та режимам руху, що в значній мірі впливає на роботу установки та на якість готової продукції.

Метою даної роботи є удосконалення конструкції приводного механізму роликової формувальної установки для підвищення її продуктивності роботи з одночасним зниженням енерговитрат на забезпечення технологічного процесу та розвантаження приводу установки, що в свою чергу підвищує її надійність та довговічність.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети було розроблено конструкцію роликової формувальної установки [6], що складається з нерухомого порталу та трьох формувальних візків, які виконані з можливістю приведення в зворотно-поступальний рух від спільного приводу з трьома кривошипно-повзунними механізмами, кривошипи яких жорстко закріпленні на одному приводному валу і зміщені один відносно одного на кут $\Delta\varphi=120°$. Всі формувальні пристрої розташовані паралельно між собою з одного боку приводного валу для забезпечення ущільнення бетонної суміші на одній технологічній лінії. При застосуванні спільного енергетично врівноваженого приводу на три формувальні візки підвищується продуктивність установки, зменшуються динамічні навантаження в елементах її приводного механізму, зменшуються зайві руйнівні навантаження на рамну конструкцію і, відповідно, підвищується довговічність установки в цілому.

На рис. 1 зображено загальний вигляд роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом для трьох формувальних візків (вигляд з боку), а на рис. 2 наведено її кінематичну схему. Установка складається з трьох однакових формувальних візків 1, 2 та 3, що розміщені з одного боку від приводу. Кожний з візків через шатуни 4, 5 та 6 шарнірно рухомо з’єднано з кривошипами 7, 8 та 9, які жорстко закріплені на приводному валу 10 та зміщені один відносно другого на кут $\Delta\varphi=120°$. Формувальні візки 1, 2 та 3 змонтовані на спільному порталі 11 (рис. 1). На порталі 11 є напрямні руху 12, у яких здійснюють зворотно-поступальний рух вищезгадані формувальні візки над порожниною форми 13. Формувальні візки 1, 2 та 3 мають подавальний бункер 14 та укочувальні ролики 15, які встановлені в напрямних руху 12.

Для проведення силового аналізу запропонованої формувальної установки визначено [4] функції зміни лінійних швидкостей центрів мас візків 1, 2 та 3 при постійній кутовій швидкості кривошипу ($\dot{\varphi}=\omega=\text{const}$):

$$\dot{x}_1=\dot{\varphi}\cdot\frac{\partial x_1}{\partial\varphi};\qquad \dot{x}_2=\dot{\varphi}\cdot\frac{\partial x_2}{\partial\varphi};\qquad \dot{x}_3=\dot{\varphi}\cdot\frac{\partial x_3}{\partial\varphi},\tag{1}$$

де $\frac{\partial x_1}{\partial\varphi}$, $\frac{\partial x_2}{\partial\varphi}$, $\frac{\partial x_3}{\partial\varphi}$ – перші передаточні функції центрів мас візків 1, 2 та 3.

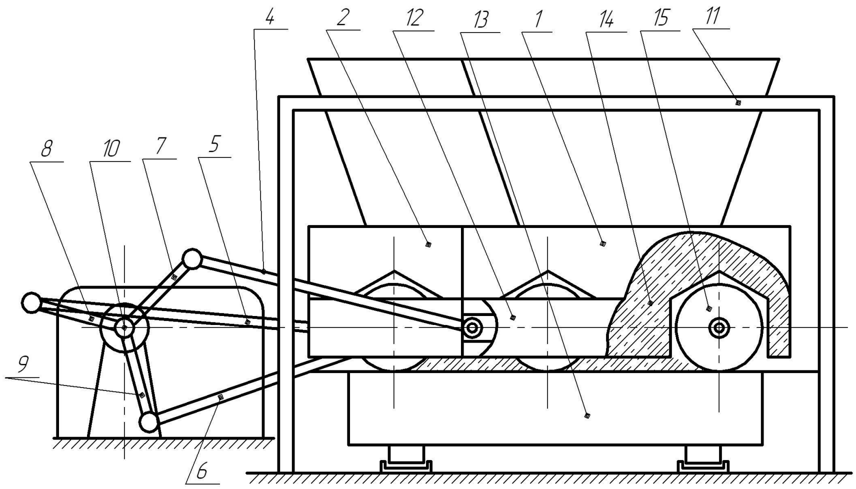


Рис. 1. Роликова формувальна установка з енергетично врівноваженим приводом для трьох формувальних візків.

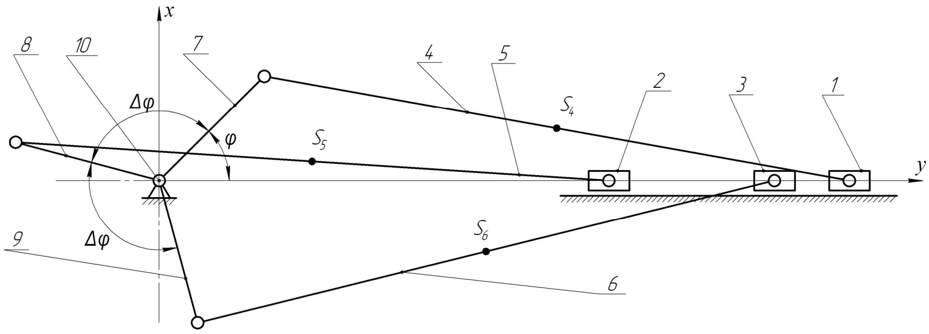


Рис. 2. Кінематична схема роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом для трьох формувальних візків.

Перші передаточні функції центрів мас формувальних візків 1, 2 та 3 визначаються наступним чином:

$$\frac{\partial x_1}{\partial \varphi} = -r \cdot \sin\varphi \cdot \left(1 + \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2\varphi}}\right);$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial \varphi} = -r \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi) \cdot \left(1 + \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos(\varphi + \Delta\varphi)}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + \Delta\varphi)}}\right);$$

$$\frac{\partial x_3}{\partial \varphi} = -r \cdot \sin(\varphi + 2\Delta\varphi) \cdot \left(1 + \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos(\varphi + 2\Delta\varphi)}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + 2\Delta\varphi)}}\right), \qquad (2)$$

де r – радіус кривошипів;
l – довжина шатунів;
φ – кутова координата положення кривошипа;
$\Delta\varphi = 120°$ – кут зміщення кривошипів 7, 8 та 9 між собою.

Функції зміни лінійних прискорень центрів мас формувальних візків 1, 2 та 3 визначаються залежностями:

$$\ddot{x}_1 = \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{\partial^2 x_1}{\partial \varphi^2}; \qquad \ddot{x}_2 = \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{\partial^2 x_2}{\partial \varphi^2}; \quad \ddot{x}_3 = \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{\partial^2 x_3}{\partial \varphi^2}, \qquad (3)$$

де $\frac{\partial^2 x_1}{\partial \varphi^2}$, $\frac{\partial^2 x_2}{\partial \varphi^2}$, $\frac{\partial^2 x_3}{\partial \varphi^2}$ – другі передаточні функції центрів мас візків 1, 2 та 3, які визначаються наступним чином [5]:

$$\frac{\partial^2 x_1}{\partial \varphi^2} = r \cdot \left(-\cos\varphi - \frac{r}{l} \cdot \sin^2\varphi \cdot \left(\frac{\frac{r^2}{l^2} \cdot \frac{\cos^2\varphi}{\left(1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2\varphi\right)} - 1}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2\varphi}} \right) - \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos^2\varphi}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2\varphi}} \right);$$

$$\frac{\partial^2 x_2}{\partial \varphi^2} = r \cdot \left(\begin{array}{l} -\cos(\varphi + \Delta\varphi) - \frac{r}{l} \cdot \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cdot \left(\frac{\frac{r^2}{l^2} \cdot \frac{\cos^2(\varphi + \Delta\varphi)}{\left(1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + \Delta\varphi)\right)} - 1}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + \Delta\varphi)}} \right) - \\ - \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos^2(\varphi + \Delta\varphi)}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + \Delta\varphi)}} \end{array} \right);$$

$$\frac{\partial^2 x_3}{\partial \varphi^2} = r \cdot \left(\begin{array}{l} -\cos(\varphi + 2\Delta\varphi) - \frac{r}{l} \cdot \sin^2(\varphi + 2\Delta\varphi) \cdot \left(\frac{\frac{r^2}{l^2} \cdot \frac{\cos^2(\varphi + 2\Delta\varphi)}{\left(1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + 2\Delta\varphi)\right)} - 1}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + 2\Delta\varphi)}} \right) - \\ - \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos^2(\varphi + 2\Delta\varphi)}{\sqrt{1 - r^2/l^2 \cdot \sin^2(\varphi + 2\Delta\varphi)}} \end{array} \right). \qquad (4)$$

Для визначення силових характеристик роликової установки для формування залізобетонних виробів шляхом інженерного розрахунку, що наведений в [3], визначено зусилля, яке необхідне на переміщення формувального візка, що дорівнює F_B=3562Н при використанні наступних вихідних даних: розміри виробу, що формується: висота плити – $h_0=0{,}22$ *м*, ширина виробу – *B=1,164 м*; тип суміші, що ущільнюється – дрібнозерниста суміш; вологість бетонної суміші – *W=10%;* потрібна щільність виробу – $k_{ущ}$=0,98; величина максимального контактного тиску, що забезпечує $k_{ущ}$=0,98 при *W=10%,* за експериментальними даними *q=625 кПа*.

З умови рівності миттєвої потужності на переміщення формувального візка та необхідної потужності на приводному валу кривошипа отримано залежність для визначення необхідного обертального моменту на приводному валу кривошипа

$$M_{кр} = \frac{F_B}{\eta} \cdot \frac{\partial x}{\partial \varphi}, \qquad (5)$$

де $\partial x/\partial\varphi$ – перша передаточна функція формувального візка;
η – ККД передаточного механізму від кривошипа до формувального візка.

Отримана залежність (5) використовується для визначення необхідного обертального моменту для установки з одним формувальним візком. Для нашої ж установки з єдиним енергетично врівноваженим приводом для трьох формувальних візків необхідний обертального момент на приводному валу буде визначатися за наступним виразом

$$M_{кр} = M_{кр1} + M_{кр2} + M_{кр3}\ , \qquad (6)$$

де $M_{кр1}$, $M_{кр2}$, $M_{кр3}$ – необхідні крутні моменти на приводному валу кривошипів 7, 8 та 9 відповідно першого, другого та третього візків, які в свою чергу визначаються так:

$$M_{кр1} = \frac{F_B}{\eta}\cdot\frac{\partial x_1}{\partial\varphi};\ M_{кр2} = \frac{F_B}{\eta}\cdot\frac{\partial x_2}{\partial\varphi};\ M_{кр3} = \frac{F_B}{\eta}\cdot\frac{\partial x_3}{\partial\varphi}. \qquad (7)$$

Для формувальної установки з параметрами: $r=0{,}2м$; $l=1{,}0м$; $\omega=10{,}5рад/с$; η=0,9; $F_B=3562Н$ визначено функції зміни та побудовано графіки зміни моментів статичного опору переміщенню першого – 1, другого – 2, третього – 3 візків та їхнього сумарного значення – 4 при значенні кутів зміщення кривошипів $\Delta\varphi=120°$ (рис. 3). Аналіз цих графіків показує, що значення моменту статичного опору переміщенню кожного з трьох візків змінюється в межах від *0* до *726,4 Н·м*, а значення сумарного моменту статичного опору – в межах від $M_{кр min}=1108{,}63Н{\cdot}м$ до $M_{кр max}=1453{,}05Н{\cdot}м$. При цьому середнє значення сумарного моменту статичного опору становить $M_{кр сер}=1360{,}55Н{\cdot}м$.

Під час руху формувальних візків на них також діють сили інерції, моменти від яких визначаються відповідними залежностями для кожного з трьох візків:

$$M_{i1} = m\cdot\ddot{x}_1\cdot\frac{\partial x_1}{\partial\varphi};\ M_{i2} = m\cdot\ddot{x}_2\cdot\frac{\partial x_2}{\partial\varphi};\ M_{i3} = m\cdot\ddot{x}_3\cdot\frac{\partial x_3}{\partial\varphi}. \qquad (8)$$

Тоді момент сил інерції всієї установки в процесі формування визначається залежністю

$$M_i = M_{i1} + M_{i2} + M_{i3}. \qquad (9)$$

Для формувальної установки з наведеними вище параметрами визначено функції та побудовано графіки зміни моментів сил інерції першого – 1, другого – 2, третього – 3 візків та їхнього сумарного значення – 4 при значенні кутів зміщення кривошипів $\Delta\varphi=120°$ (рис. 4). Аналіз цих графіків показує, що значення моменту від сил інерції кожного з трьох візків змінюється в межах від -2577,3 Н·м до 2577,3 Н·м, а значення сумарного моменту від сил інерції – $M_{ін min}=-681{,}64\ Н{\cdot}м$ до $M_{ін max}=681{,}64\ Н{\cdot}м$. При цьому середнє значення сумарного моменту від сил інерції становить $M_{ін сер}=0\ Н{\cdot}м$. Це явище дає змогу значно розвантажити приводний вал кривошипів установки і покращити роботу установки в цілому.

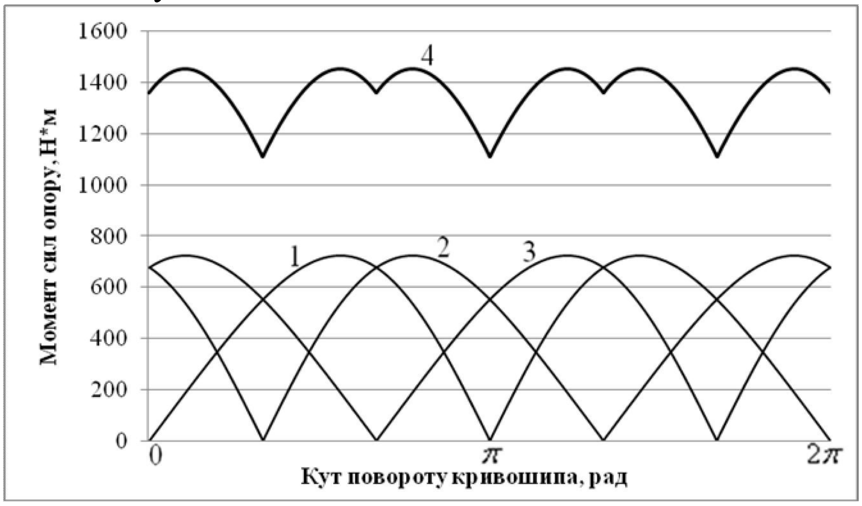


Рис. 3. Графіки зміни моментів статичного опору на приводному валу установки: 1, 2, 3 – моменти статичного опору першого, другого та третього візків відповідно; 5 – сумарний момент статичного опору.

Рис. 4. Графіки зміни моментів сил інерції установки: 1, 2, 3, 4 – моменти сил інерції першого, другого та третього візків відповідно; 5 – сумарний момент сил інерції.

Отже, під час процесу формування загальний опір переміщенню формувального візка визначається відповідною залежністю для кожного з трьох візків:

$$M_{оп1} = M_{кр1} + M_{i1};$$
$$M_{оп2} = M_{кр2} + M_{i2}; \qquad (10)$$
$$M_{оп3} = M_{кр3} + M_{i3}.$$

Тоді загальний момент опору переміщенню формувальних візків установки під час процесу формування визначатися залежністю

$$M_{оп} = M_{оп1} + M_{оп2} + M_{оп3}. \qquad (11)$$

Для формувальної установки з наведеними вище параметрами визначено функції зміни та побудовано графіки зміни загальних моментів опору переміщенню першого – 1, другого – 2, третього – 3 формувальних візків та їхнього сумарного значення – 4 при значенні кутів зміщення кривошипів $\Delta\varphi=120°$ (рис. 5). Аналіз цих графіків показує, що значення загального моменту опору переміщенню кожного з трьох візків змінюється в межах від *-1950 Н·м* до *3222,8 Н·м*, а значення сумарного загального моменту опору – M_{onmin}=*-735,2 Н·м* до M_{onmax}=*2112,4 Н·м*. При цьому середнє значення сумарного загального моменту опору становить M_{oncep}=*1360,55 Н·м*, тобто таке значення, як і моменту статичного опору.

Рис. 5. Графіки зміни загального моменту опору установки: 1, 2, 3, 4 – загальні моменти опору першого, другого та третього візків відповідно; 5 – сумарний момент загального опору.

Висновки. Таким чином, запропонована конструкція роликової формувальної установки з енергетично врівноваженим приводом для трьох формувальних візків дозволяє значно зменшити енергетичні витрати, покращити динамічний режим руху всієї установки та розвантажити приводний вал кривошипів при одночасному підвищенні продуктивності. Встановлено, що моменти від сил інерції елементів установки впливають лише на рух відповідного візка, а на роботу установки в цілому впливають лише моменти статичного опору переміщенню формувальних візків.

Література.

1. *Гарнець В.М.* Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси / *В.М. Гарнець*. – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
2. *Кузин В.Н.* Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов: Автореф. дис. канд. наук. – М. – 1981. – 20 с.

3. *Рюшин В.Т.* Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. К. – 1986г.
4. *Ловейкін В.С.* Динамічний аналіз роликової формовочної установки з рекупераційним приводом / *В.С. Ловейкін, К.І. Почка* // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: Пр. І-ї Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM - I), 4-7 жовтня 2004 р., Тернопіль (Україна) – С. 507-514.
5. *Ловейкін В.С.* Силовий аналіз роликової формовочної установки з рекупераційним приводом / *В.С. Ловейкін, К.І. Почка* // Техніка будівництва, Київ – 2003. – Вип. 14 – С. 27-37.
6. Пат. 50032 U Україна, МКВ B28B13/00 / Установка для формування виробів з бетонних сумішей / *Ловейкін В.С., Почка К.І.*; заявник та власник Київський національний університет будівництва і архітектури – № u 200911443 заявл. 10.11.2009; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.

СИЛОВОЙ АНАЛИЗ РОЛИКОВОЙ ФОРМИРОВОЧНОЙ УСТАНОВКИ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ УРАВНОВЕШЕННЫМ ПРИВОДОМ

Ловейкин В.С., Ковбаса В.П., Почка К.И.

***Аннотация* – в статье предложена конструкция роликовой формировочной установки с энергетически уравновешенным приводом для трех формировочных тележек, что позволяет снизить энергетические затраты и разгрузить приводной вал кривошипов.**

POWER ANALYSIS OF ROLLER SYSTEMS FOR FORMING REINFORCED CONCRETE PRODUCTS WITH ENERGY-BALANCED DRIVE

V. Loveikin, V. Kovbasa, K. Pochka

Summary

In this paper construction is proposed a roller installation for forming reinforced concrete blocks with energy-balanced actuator for the three carriages that can reduce energy costs and relieve the drive shaft of a crooked-spikes.

УДК 621.888.6: 624.012: 539.32.001.6

АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНО-ХВИЛЬОВИХ РЕЗОНАНСІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ ҐРУНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Ловейкін В.С., д. т. н.,
Човнюк Ю.В., к. т. н.,
Дяченко Л.А., здобувач
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Тел.: (044) 527-87-34

***Анотація* - проведений аналіз вібраційно-хвильових резонансів та експериментальне визначення резонансних частот та динамічного модуля пружності ґрунтів сільськогосподарського призначення.**

***Ключові слова* – резонансна частота, ґрунт , система з розподіленими параметрами, методи математичної фізики.**

Постановка проблеми. За своїми властивостями малозв’язні ґрунти сільськогосподарського призначення відносяться до пружно- й в’язкопластичних середовищ котрі характеризуються цілою низкою реологічних характеристик, які у процесі їх вібраційної обробки (зокрема ущільнення) безперервно змінюються. Зокрема, при ущільненні ґрунтів у вібраційних полях має місце зростаючий вплив сил пружного опору над непружним (дисипативним) внаслідок чого у основній фазі свого ущільнення ґрунт набуває помітних пружних властивостей і його можна вважати гомогенним пружним середовищем.

Виходячи з викладеного вище, у ґрунтах сільськогосподарського призначення, котрі перебувають під впливом вібраційних полів, обов’язково повинно мати місце фізико-механічне явище – резонансний стан, що характеризується виникненням в ущільненому об’ємі ґрунту зон з різним рівнем інтенсивності вібрації по висоті прошарку ґрунту. Поки у системі будуть спостерігатись переважаючі впливи дисипативних сил, їх рух носить не коливний характер, а аперіодичний. Пояснення описаних явищ випливає із законів механіки хвильових процесів [1].

Проведення експериментальних досліджень, які б підтверджували правомірність зроблених вище припущень, примушує дослідників динамічних, реологічних властивостей ґрунтів сільськогосподарського призначення вивчати характер зміни їх динамічного модуля пружності, резонансних частот коливань за наявності впливу вібраційних полів в умовах ущільнення у резонансному режимі з пришвидшеннями від 1,0 до 5,0 g (g = 9,81 м/с^2). Знання його (динамічного модуля) величини для кожного складу ґрунту із заданими консистенцією та іншими реологічними характеристиками багато у чому буде сприяти правильному вибору динамічних параметрів вібраційного поля, а також режимів роботи віброплугів.

Величину динамічного модуля пружності E_v ґрунту можна при певних припущеннях встановлювати, користуючись аналітичним описом умов, які дійсні при наявності у ґрунті вібрацій. При цьому слід виходити з апроксимації ґрунту системою з розподіленими параметрами.

Слід зазначити, що вибір моделі пружних елементів систем з розподіленими параметрами визначається спектром частот вібраційного впливу (на оброблюваний ґрунт). Чим вони вище, тим більш складною виявляється модель пружних елементів (ПЕ). Якщо частоти збудження більше власних частот ПЕ, їх необхідно розглядати у виді систем з розподіленими параметрами. У цьому випадку поздовжні пружні коливання у ПЕ (ґрунт) описуються хвильовим рівнянням відносно переміщення $y\ (x,\ t)$ площини його поперечного перерізу:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \qquad (1)$$

де δ – коефіцієнт розподілених втрат,

c – швидкість розповсюдження переміщення вздовж ПЕ,

$(x,\ t)$ – просторова (у поздовжньому напрямку) і часова координати,

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

E – модуль пружності,

ρ – щільність матеріалу ПЕ (ґрунту).

Подальший метод розв’язку рівняння (1) вимагає наявності початкових та граничних умов. При цьому, використання методу розділення змінних вимагає специфічного виду вказаних умов.

Вибір розрахункової системи з розподіленими параметрами у даному випадку обумовлений тим, що розміри найбільших у диспергованих елементів ґрунту менше, ніж величини його елементарних об’ємів, у котрих є анізотропні дисперговані елементи різноманітних орієнтацій. Це дозволяє застосувати при вивченні динамічних властивостей віброваних ґрунтів сільськогосподарського призначення (ГСП) методи феноменологічної макрореології, розроблені для квазіоднорідного та квазіізотропного суцільних середовищ [3]. У розглядуваному прикладі методикою експериментальних досліджень передбачено використання часточок ґрунту з максимальною крупністю $16{\cdot}10^{-3}$ м при розмірах зразка ґрунту, що знаходиться під впливом вібраційного поля, у 0,1 м.

Аналіз публікацій по темі дослідження. Слід зазначити, що основні методи феноменологічної макрореології, які можна використати для визначення динамічного модуля пружності та резонансних частот віброваних ґрунтів сільськогосподарського призначення, розроблені у [1, 3] для квазіоднорідного та квазіізотропного суцільних середовищ, а методологія експериментального їх визначення, зокрема, для бетонних сумішей, що за своїми властивостями подібні до малозв'язних ґрунтів, викладена у [2]. Проте автори останнього цитованого дослідження некоректно використовують метод Фур'є для визначення амплітудно-частотних характеристик та фізико-механічних параметрів зразків, які знаходяться під впливом вібраційного поля.

Мета даної роботи полягає у встановленні основних фізико-механічних параметрів та резонансних частот зразків ґрунтів сільськогосподарського призначення, які знаходяться під впливом вібраційного поля певної частоти, на основі коректних моделей середовища, як системи з розподіленими параметрами, та методів математичної фізики.

Виклад основного змісту дослідження. У якості основних припущень, які застосовуються при аналітичному описі процесу вимушених коливань стовпа ґрунту висотою l, й площею поперечного перерізу S та загальною масою m як системи з розподіленими параметрами, запропоновані наступні: центри ваги поперечного перерізу стовпа ґрунту розміщені на одній вертикалі, котра є також віссю симетрії всієї системи, вплив бічних стінок форми на коливання основної маси ґрунту не враховується; перерізи стовпа ґрунту при всіх розглядуваних у процесі вібрування деформаціях залишаються плоскими, часточки ґрунту не здійснюють поперечних рухів і переміщаються виключно у вертикальному напрямку; вага прошарків, розміщених, вище даного, при умові довільно обраного поперечного перерізу стовпа ґрунту не враховується, оскільки вона врівноважується статичною пружною силою; для кожного даного моменту часу приймаємо щільність, модуль пружності й коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту не залежними від часу; перехідна фаза ущільнення ґрунту між початком й закінченням процесу вібрування не враховується, що дозволяє вважати приведені коефіцієнти не залежними від відстані до центру тяжіння обраного поперечного перерізу ґрунту.

Із врахуванням зроблених припущень загальне рівняння поздовжніх коливань неоднорідного стрижня з лінійним опором [1, 3] узагальнюється у частинний вид рівняння коливань однорідного стрижня (тип (1)).

З даних роботи [3] випливає, що при оцінці характеру коливань ґрунту на вібростолі з відомим наближенням внутрішній опір можна не враховувати (δ→0), оскільки форми власних коливань не залежать від в'язких властивостей стрижня, що у результаті дозволяє отримати відоме хвильове рівняння

$$c^2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \tag{2}$$

де y – переміщення довільного перерізу стовпа грунту при коливаннях у напрямку вібрації;

x – відстань від поверхні стола, який коливається, до центру тяжіння обраного перерізу;

t – тривалість вібраційного впливу;

$c = \sqrt{E_\upsilon / \rho}$ – швидкість розповсюдження хвиль напружень у ґрунті при вібраціях.

При впливі на систему коливань синусоїдальної форми з амплітудою A й круговою частотою ω із врахуванням встановлених граничних умов: при $x=0$ $y(0)=A \cdot \sin \omega \cdot t$; при

$$x = l \quad \frac{dy}{dx} = 0 \tag{3}$$

(вільна поверхня, без навантажень) вихідне рівняння (2) має розв'язок:

$$y(x,t) = A \cdot \left\{ \cos\left[\frac{\omega \cdot x}{c}\right] + tg\left[\frac{\omega \cdot l}{c}\right] \cdot \sin\left[\frac{\omega \cdot x}{c}\right] \right\} \cdot \sin \omega t + \frac{2A \cdot \omega \cdot c}{l} \times$$
$$\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left[(-1)^{k-1} - 1 + (-1)^k \cdot \cos\left(\frac{\omega \cdot l}{c}\right)\right]}{\left[\omega^2 - \left(\frac{k \cdot \pi \cdot c}{l}\right)^2\right]} \cdot \sin\left[\frac{k \cdot \pi \cdot c \cdot t}{l}\right] \cdot \sin\left[\frac{k \cdot \pi \cdot x}{l}\right]. \tag{4}$$

За граничних умов (т. з. поверхневого віброущільнення ГСП):
при $x=0$ $y(0)=0$; при $x=l$ $y(l)=A \cdot \sin \omega \cdot t$ (5)
рівняння (2) має такий розв'язок

$$y(x,t) = A \cdot \left[\frac{\sin\left(\frac{\omega \cdot x}{c}\right)}{\sin\left(\frac{\omega \cdot l}{c}\right)} \right] \cdot \sin \omega t + \frac{2A \cdot \omega \cdot c}{l} \times$$
$$\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{\left[\omega^2 - \left(\frac{k \cdot \pi \cdot c}{l}\right)^2\right]} \cdot \sin\left[\frac{k \cdot \pi \cdot c \cdot t}{l}\right] \cdot \sin\left[\frac{k \cdot \pi \cdot x}{l}\right]. \tag{6}$$

Прискорення вібрації представляє собою другу похідну переміщення *y(x,t)* даного рівнянням (4) або (6), по часу *t*:

$$a)\ a=\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}=A\cdot\left\{\cos\left[\frac{\omega\cdot x}{c}\right]+tg\left[\frac{\omega\cdot l}{c}\right]\cdot\sin\left[\frac{\omega\cdot x}{c}\right]\right\}\cdot\left(-\omega^2\right)\cdot\sin\omega t+\frac{2A\cdot\omega\cdot c}{l}\times$$
$$\times\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\left[(-1)^{k-1}-1+(-1)^k\cdot\cos\left(\frac{\omega\cdot l}{c}\right)\right]}{\left[\omega^2-\left(\frac{k\cdot\pi\cdot c}{l}\right)^2\right]}\cdot(-1)\cdot\left(\frac{k\cdot\pi\cdot c}{l}\right)^2\cdot\sin\left[\frac{k\cdot\pi\cdot c\cdot t}{l}\right]\cdot\sin\left[\frac{k\cdot\pi\cdot x}{l}\right] \quad (7)$$

$$б)\quad a=\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}=A\cdot\left[\frac{\sin\left(\frac{\omega\cdot x}{c}\right)}{\sin\left(\frac{\omega\cdot l}{c}\right)}\right]\cdot\left(-\omega^2\right)\sin\omega t+\frac{2A\cdot\omega\cdot c}{l}\times$$
$$\times\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k-1}}{\left[\omega^2-\left(\frac{k\cdot\pi\cdot c}{l}\right)^2\right]}\cdot(-1)\cdot\left(\frac{k\cdot\pi\cdot c}{l}\right)^2\cdot\sin\left[\frac{k\cdot\pi\cdot c\cdot t}{l}\right]\cdot\sin\left[\frac{k\cdot\pi\cdot x}{l}\right]. \quad (8)$$

(Випадок *а)* відповідає розв’язку (4), а випадок *б)* – розв’язку (6)). Величина максимального прискорення коливань при $\sin\omega\cdot t=1$ у ґрунті дорівнює:

$$а)\quad a_{\max}=a_v\cdot\left\{\cos\left[\frac{\omega\cdot x}{c}\right]+tg\left[\frac{\omega\cdot l}{c}\right]\cdot\sin\left[\frac{\omega\cdot x}{c}\right]\right\}; \quad (9)$$

$$б)\quad a_{\max}=a_v\cdot\left\{\frac{\sin\left(\frac{\omega\cdot x}{c}\right)}{\sin\left(\frac{\omega\cdot l}{c}\right)}\right\}, \quad (10)$$

де $a_v=A\cdot\omega^2$ – максимальне значення прискорення коливань вібростолу (знак у (7) й (8) не враховується).

Слід зазначити, що другий член (сума) у (7) та (8) змінюється у часі доволі швидко з різними частотами $\Omega_k=k\cdot\pi\cdot c/l$, *k*=1, 2, 3, … , а тому вклад від цього доданку малий у a_{max} й першому наближенні (якщо $\omega\neq\Omega_k$) ним можна знехтувати.

Використовуючи рівняння (9), обчислимо величину прискорення на поверхні стовпа ґрунту при $x=l$

$$a_{\max}=\frac{a_v}{\cos\left(\frac{\omega_n\cdot l}{c}\right)}=\frac{a_v}{\cos\left\{\omega_n\cdot l\cdot\sqrt{\frac{\rho}{E_v}}\right\}}. \quad (11)$$

З рівняння (11) випливає, що при

$$\omega_n\cdot l\cdot\sqrt{\frac{\rho}{E_v}}=\frac{\pi}{2}\cdot(2n-1),\quad n=1,\quad 2,\quad 3,\ldots. \quad (12)$$

$a_{max}\to\infty$. Однак завдяки наявності у ГСП внутрішнього тертя його (прискорення) величина буде обмежена деякими межами.

Приймаючи в умові (12) $\omega_n \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E_v}} = \frac{\pi}{2}$, визначимо вираз для ω_n

$$\omega_n = \frac{\pi}{2l} \cdot \sqrt{\frac{E_v}{\rho}}, \qquad (13)$$

де $\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_r$;

f_r – вибіркова (резонансна) лінійна частота коливань грунту, Гц.

Шукана величина динамічного модуля пружності визначиться зі співвідношення (13)

$$E_\upsilon = 16 \cdot f_r^2 \cdot l^2 \cdot \rho \qquad (14)$$

Слід зазначити, що вирази (13) та (14) отримані за припущення виключно поздовжньої деформації зразка ГСП і тому задовольняють умовам, за яких висота стовпа ГСП у багато разів перевищує його площу поперечного перерізу *S*, тобто $l >> \sqrt{S}$. Для зразків ГСП кубоподібної форми, де $l \approx \sqrt{S}$, де необхідно враховувати також й поперечну деформацію.

Із врахуванням останнього зауваження вираз (13) прийме вигляд

$$\omega_n = \frac{\pi}{2l} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot 3 \cdot \frac{(\tilde{m}-1)}{(\tilde{m}+1)} \cdot c'_y}, \qquad (15)$$

де $\tilde{m}$ – постійна Пуассона ($\tilde{m} = 3{,}3$);

$c'_y = \frac{\tilde{m} \cdot E_v}{3 \cdot (\tilde{m}-2)}$ – модуль об’ємної деформації ГСП.

Після відповідних перетворень отримаємо кінцевий вид формули для визначення динамічного модуля пружності

$$E_v = 11{,}89 \cdot f_r^2 \cdot l^2 \cdot \rho. \qquad (16)$$

За наявності граничних умов, які призводять до a_{max} (10) вираз для ω_n змінюється

$$\omega_n \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E_v}} = n\pi, \quad n = 1, \quad 2,.... \qquad (17)$$

При $n=1$ ω_n (17) дорівнює

$$\omega_n = \frac{\pi}{l} \cdot \sqrt{\frac{E_v}{\rho}}, \qquad (18)$$

Тобто у 2 рази більше, ніж ω_n з (13). Тому перетворення щодо визначення f_r й E_v (14) – (16) зрозумілим чином замінюються (E_v зростає у (14) у 4 рази, ω_n зростає у (15) у 2 рази, E_v зростає у (16) у 4 рази).

Експериментальне визначення динамічного модуля пружності ГСП, його резонансних частот ω_n, f_r здійснювалось із врахуванням методики, запропонованої у [2], заснованої на використанні резонансного стану віброущільнюваного зразка ґрунту й виконувалось наступним чином.

На робочому столі вібраційного стенду PYE-LING розміщувався зразок ГСП висотою l (рис.1), на верхній площині котрого був закріплений п'єзоелектричний акселерометр фірми "Bruel and Kjaer". При відповідній (резонансній) частоті коливань джерела вібрації f_r, яка змінювалась за допомогою звукового генератора, на поверхні зразка ГСП фіксувалось деяке максимальне значення прискорення (11) a_{max} (прискорення коливань вібростенду a_v у процесі експерименту підтримувалось на постійному рівні).

Подальше обчислення ω_n та E_v (модуля пружності ГСП) здійснювалось за формулами (13) та (15) й (16).

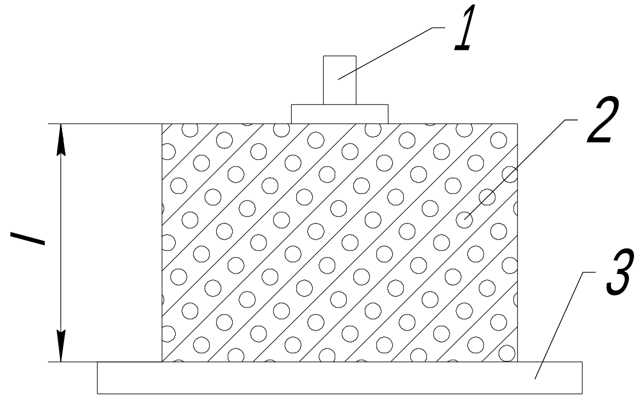


Рис. 1. Схема вимірювання динамічного модуля пружності ГСП: 1 – датчик прискорення (тип – 4332); 2 – зразок ГСП; 3 – вібростенд.

У дослідах використовувались зразки ГСП при $D_{max}=16 \cdot 10^{-3}$ *м*, які мали розміри 0,1×0,1×0,1м.

Експериментально встановленому значенню резонансної частоти f_r *=50…70 Гц* (за заданого прискорення джерела вібрації 1,0 · g) відповідає обчислена величина динамічного модуля пружності ГСП $E_v=(8 \cdot 10^5 \ldots 1{,}8 \cdot 10^6)$ *Па* , та *c=(20…28) м/с*.

Якщо величину E_v ГСП, отриману у експерименті, порівняти зі значеннями тієї ж величини, яка встановлюється ультразвуковим методом, то значення будуть відрізнятись у десятки разів $E_v=(320 \cdot 10^5 \ldots 80 \cdot 10^6)$ *Па* [2].

Подібні відмінності можна пояснити пластичними деформаціями ГСП при використанні більш високих прискорень вібрації у відповідності з резонансною методикою досліджень, що підтверджується подальшими дослідженнями залежності E_v ГСП від різних величин прискорень коливань (рис. 2).

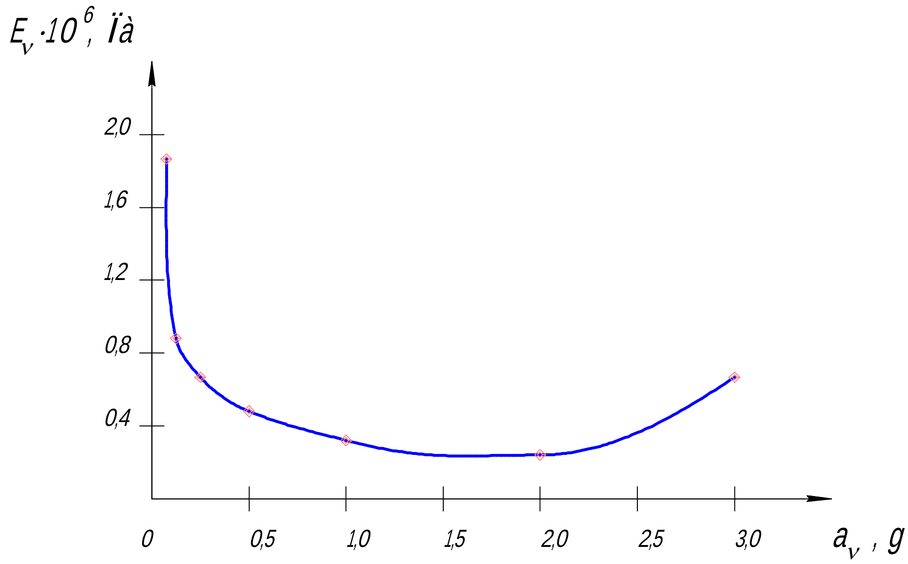


Рис. 2. Залежність E_v ГСП від a_v.

Висновки:

1. У роботі обґрунтовані залежності для визначення E_v та f_r ГСП, які дозволяють вимірювати ці величини для зразків ґрунту скінченої висоти як систем з розподіленими параметрами за різних граничних умов.

2. При використанні величини динамічного модуля пружності у вібраційних процесах у ГСП його значення, отримане ультразвуковим методом, буде суттєво відрізнятись від значення, знайденого за резонансною методикою.

3. У області вібраційного формування (впливу на ГСП) виходячи з викладеного вище, пропонується у подальшому використовувати “вібраційний” модуль пружності E_v, який визначається у процесі резонансного ущільнення ГСП з прискоренням (1….5)g, а також формули для коректного визначення власних резонансних частот грунту (f_r), як системи з розподіленими параметрами.

Література.

1. *Тимошенко С. П.* Колебания в инженерном деле. / *С. П. Тимошенко*. – М.: Наука, 1967. – 340с.

2. *Крейчи И.* Экспериментальное определение динамического модуля упругости вибрируемых бетонных смесей. / *И. Крейчи, В. Т. Кравчук* // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1982. – №12. – с.16-20

3. *Пановко Я. Г.* Основы прикладной теории упругих колебаний / *Я.Г. Пановко*. – М.: Машиностроение, 1967. – 320с.

АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ РЕЗОНАНСОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ГРУНТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ловейкин В.С., Човнюк Ю.В., Дяченко Л.А.

Аннотация **- проведен анализ вибрационно-волновых резонансов и экспериментальное определения резонансных частот и динамического модуля упругости грунтов сельскохозяйственного предназначения.**

ANALYSIS OF VIBRATION-WAVE RESONANCES AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY OF GROUND FOR AGRICULTURAL DESTINATION

V. Loveykin, Ju. Chovnyuk, L. Dyachenko

Summary

The analysis of vibratory-wave resonances and experimental definitions of resonant frequencies and a dynamic elastic modulus of agricultural soils is realized.

УДК 629.017

ОЦЕНКА УПРАВЛЯЕМОСТИ АВТОМОБИЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

Подригало М.А., д.т.н.,
Клец Д.М., к.т.н.,
Гацько В.И., аспирант*
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
Тел.: (057) -70-73-733.

***Аннотация* – в статье приведены результаты исследования управляемости автомобиля на поворотах с помощью передаточных функций с учетом боковой эластичности шин.**

***Ключевые слова* – поворачиваемость автомобиля, эластичность шин, управляемость.**

Постановка проблемы. Поворачиваемость является одним из свойств управляемости автомобиля. Боковая эластичность шин создает условия для появления дополнительного (по отношению к автомобилям с жесткими в боковом направлении колесами) движения машины в плоскости дороги. Если условия ускорения и скорости дополнительного движения совпадают по направлению с направлением поворота, то автомобиль обладает избыточной поворачиваемостью, если противоположно - то недостаточной. Если указанные величины равны нулю, то автомобиль обладает нейтральной поворачиваемостью.

Дополнительное движение автомобиля в плоскости дороги, обусловленное боковой эластичностью шин, ухудшает качество процесса управления.

Анализ последних исследований. Поворачиваемость автомобиля, обусловленная боковой эластичностью шин, является одним из свойств, обеспечивающих управляемость машины [1].

Боковая эластичность шин вызывает появление дополнительного углового движения автомобиля при повороте. Появление дополнительного углового движения ухудшает качество процесса управления поворотом автомобиля, т.е. ухудшает управляемость. В работе [2] предложено для оценки управляемости мобильных машин использовать передаточную функцию управления, представляющую собой отношение суммарного (результирующего) ускорения, возникающего в следствии действия управляющего воздействия, к величине парциаль-

* Науч. руководитель – д.т.н., проф. М.А. Подригало

ного управляющего ускорения. Отклонение передаточной функции управления от единицы характеризует нелинейность процесса управления, т.е. качество управления или управляемость машины.

В работе [3] предложен критерий для количественной оценки поворачиваемости автомобиля.

В качестве указанного критерия принята величина изменения кривизны траектории движения автомобиля, вызванная боковой эластичностью шин (уводом). Зависимость для определения указанной величины ΔK изменения кривизны траектории имеет вид [3]

$$\Delta K = \frac{1}{L}\left(\delta_2 - \delta_1 \cdot \frac{\sec^2 \bar{\alpha}}{1+\delta_1 \cdot tg\bar{\alpha}}\right), \qquad (1)$$

где L - продольная колесная база автомобиля;

δ_1, δ_2 – углы увода середин передней и задней осей;

$\bar{\alpha}$ - средний угол поворота управляемых колес.

Соответственно, угловая скорость $\Delta\omega_z$ дополнительного движения, обусловленного боковой эластичностью шин [3]

$$\Delta\omega_z = V_{x1} \cdot \Delta K = \frac{V_{x1}}{L}\left(\delta_2 - \delta_1 \cdot \frac{\sec^2 \bar{\alpha}}{1+\delta_1 \cdot tg\bar{\alpha}}\right), \qquad (2)$$

где V_{x1} - линейная скорость автомобиля в направлении его продольной оси.

Критерием управляемости автомобиля при повороте нами предложено использовать [4] угловое ускорение. Поэтому необходимо анализировать управляемость автомобиля, используя указанный критерий. Целью исследования является разработка критерия управляемости, учитывающего поворачиваемость автомобиля.

Формулировка целей статьи. В настоящей статье приведены результаты исследования управляемости автомобилей с помощью передаточных функций, представляющих собой отношение углового ускорения автомобиля с эластичными в боковом направлении шинами к угловому ускорению этого же автомобиля, но с жесткими шинами.

Основная часть. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: определить дополнительное парциальное угловое ускорение, обусловленное боковой эластичною шин; определить передаточную функцию управления.

Дополнительное (парциальное) ускорение $\Delta\varepsilon_z$ определяем дифференцированием уравнения (2)

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{d\Delta\omega_z}{dt} = \frac{V_{x1}}{L}\left\{\frac{d\delta_2}{dt} - \frac{\sec^2\bar{\alpha}}{\left(1+\delta_1 tg\bar{\alpha}\right)^2}\left[\frac{d\delta_1}{dt} + \frac{d\bar{\alpha}}{dt}\delta_1\left(2tg\bar{\alpha} - \delta_1\frac{\cos 2\bar{\alpha}}{\cos^2\bar{\alpha}}\right)\right] + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{V_{x1}}\cdot\frac{dV_{x1}}{dt}\left(\delta_2 - \delta_1\frac{\sec^2\bar{\alpha}}{1+\delta_1 tg\bar{\alpha}}\right)\right\} \quad (3)$$

У автомобиля с жесткими в боковом направлении колесами угловая скорость поворота равна [4]

$$\omega_z^{'} = \frac{V_{x1}}{L} tg\bar{\alpha}\,. \quad (4)$$

Соответственно, парциальное угловое ускорение будет равно

$$\varepsilon_z^{'} = \frac{d\omega_z^{'}}{dt} = \frac{V_{x1}}{L}\left(\sec^2\bar{\alpha}\frac{d\bar{\alpha}}{dt} + \frac{tg\bar{\alpha}}{V_{x1}}\cdot\frac{dV_{x1}}{dt}\right). \quad (5)$$

Угловое ускорение автомобиля при повороте будет равно сумме парциальных ускорений [2]

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^{'} + \Delta\varepsilon_z\,. \quad (5)$$

При положительном значении $\Delta\varepsilon_z$ ухудшается устойчивость переходного процесса, т.е. устойчивость движения. При отрицательном значении $\Delta\varepsilon_z$ ухудшается управляемость. Поскольку при переходных процессах нарушение устойчивости влечет за собой потерю управляемости, можно сделать вывод о том, что при $\Delta\varepsilon_z \neq 0$ происходит ухудшение управляемости автомобиля при повороте.

Передаточная функция управления при повороте автомобиля представляет собой отношение углового ускорения автомобиля при эластичных колесах к угловому ускорению автомобиля при жестких колесах, т.е.

$$W_{nep} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_z^{'}} = 1 + \frac{\Delta\varepsilon_z}{\varepsilon_z^{'}} = 1 +$$
$$+ \frac{\dfrac{d\delta_2}{dt} - \dfrac{\dfrac{d\delta_1}{dt} + \dfrac{d\bar{\alpha}}{dt}\delta_1\left(2tg\bar{\alpha} - \delta_1\dfrac{\cos 2\bar{\alpha}}{\cos^2\bar{\alpha}}\right)}{\left(\cos\bar{\alpha} + \delta_1\sin\bar{\alpha}\right)^2} + \dfrac{\dfrac{dV_{x1}}{dt}}{V_{x1}}\left(\delta_2 - \delta_1\dfrac{\sec^2\bar{\alpha}}{1+\delta_1 tg\bar{\alpha}}\right)}{\sec^2\bar{\alpha}\dfrac{d\bar{\alpha}}{dt} + tg\bar{\alpha}\dfrac{dV_{x1}/dt}{V_{x1}}}. \quad (7)$$

Управляемость автомобиля при движении по прямой может быть оценена после принятия $\bar{\alpha} = 0$ в выражении (7)

$$W_{пер} = 1 - \delta_1^2 + \frac{\frac{d\delta_2}{dt} - \frac{d\delta_1}{dt} + \frac{dV_{x1}}{dt} \cdot \frac{\delta_2 - \delta_1}{V_{x1}}}{d\bar{\alpha}/dt}. \qquad (8)$$

Учитывая высокий порядок малости, можно допустить $\delta_1^2 \approx 0$ в уравнении (8)

$$W_{пер} = 1 + \frac{\frac{d\delta_2}{dt} - \frac{d\delta_1}{dt} + \frac{dV_{x1}}{dt} \cdot \frac{\delta_2 - \delta_1}{V_{x1}}}{d\bar{\alpha}/dt}. \qquad (9)$$

Полученные выражения (7), (9) могут быть использованы для оценки управляемости автомобилей с учетом их поворачиваемости.

Выводы. Полученные выражения могут быть использованы для оценки устойчивости и управляемости автомобилей с учетом боковой эластичности шин.

Литература.

1. *Закин Я.Х.* Маневренность автомобиля и автопоезда / *Я.Х. Закин.* – М.: Транспорт, 1986. – 136 с.

2. Динамика автомобиля / [*Волков В.П., Бобошко А.А., Павленко В.А.* и др.] ; под. ред. *М.А. Подригало.* – Х.: Изд-во ХНАДУ, 2008. – 424 с.

ОЦІНКА КЕРОВАНОСТІ АВТОМОБІЛЮ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЕРЕДАТНИХ ФУНКЦІЙ

Подригало М.А., Клец Д.М., Гацько В.І.

Анотація **– у статті наведені результати дослідження керованості автомобілю на поворотах за допомогою передатних функцій з урахуванням бокової еластичності шин.**

ASSESSMENT DRIVABILITY OF THE CAR WITH USING OF TRANSFER FUNCTION

M. Podrigalo, D. Klec, V. Gacko

Summary

The article contains results of research drivability of the car on the turns with using of transfer functions, taking into account the lateral elasticity of the tires.

УДК 665.1 – 665.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ РУШАНКИ СЕМЯН КЛЕЩЕВИНЫ В ШЕЛЬМАШИНЕ

Ткаченко А.В., к.т.н.,
Дидур В.В., к.т.н.,
Дидур В.А., д.т.н.,
Ткаченко В.А., к.т.н.
Таврический государственный агротехнологический университет
Тел.: (0619) 44-02-74

Аннотация **– работа посвящена оптимизации технологических режимов комбинированной сепарации рушанки семян на колеблющем решете и в аспирационном канале, позволяющей эффективней использовать выбранные кинематические режимы решета и равномерней загрузить аспирационный канал по ширине и времени работы.**

Ключевые слова **– сепарация, рушанка, аспирационный канал, кинематические режимы решета, равномерная загрузка.**

Постановка проблемы. Для обрушивания семян клещевины предлагается использовать шельмашину по существующей схеме: однопарные вальцы для обрушивания семян, отделение дроблёнки на решете, разделение крупных фракций ядра и оболочки в вертикальном пневмосепарационном канале. Для повышения эффективности работы шельмашины необходимо кинематические режимы колеблющегося решета подобрать так, что бы с одной стороны максимально отделить дроблёнку (мелкие частицы оболочки и ядра), а с другой стороны равномерней загрузить пневматический канал во времени и по ширине пневмосепарационного канала. При этом в соответствии с выбранными режимами колеблющегося решета, должны быть выбраны конструктивные параметры пневмосепарационного канала и его технологические режимы.

Характер движения решета определяется наклоном его плоскости (угол наклона α), направленностью колебаний (угол ε), коэффициентом трения материала о поверхность несущей его плоскости и показателем кинематического режима этой плоскости. Работа аспирационного канала зависит от его ширины, скорости и равномерности загрузки обрабатываемого материала, а также скорости и равномерности воздушного потока.

Анализ последних исследований. Семена клещевины имеют очень хрупкую оболочку и высокомасличное ядро с очень малой механической прочностью. Эти особенности семян клещевины обусловливают специфические условия их обрушивания и сепарирования полученной рушанки в комбинированной машине, называемой шельмашиной. Совмещение двух операций в одной машине сокращает время соприкосновения оболочки с частично разрушенным высокомасличным ядром, что снижает потери масла в производстве. Обрушивание семян производится раскалыванием с помощью парных валков (с одинаковыми скоростями вращения). Разделение рушанки происходит последовательно на ситах и в воздушном канале.

Показатели работы шельмашины в разных литературных источниках противоречивы. И.В. Гавриленко констатирует, что при влажности семян 6 – 8 % ядро содержит 1,5 – 2,0 % лузги. Содержание ядра в лузге в среднем составляет 0,2 – 0,6 % [1].

В.М. Копейковский [2] утверждает, что лузжистость ядра, выходящего из шельмашины, составляет 13 – 15 %, вынос ядра в оболочку 0,3 – 0,4 %, масличность отходящей оболочки 1,5 – 2,0 %.

При расчётах решетных очисток, а в данном случае очистки ядра от лузги расчёт ведут отдельно колеблющих решётных станов и аспирационных каналов. В результате расчётные параметры режимов решетного стана не обеспечивают равномерность загрузки ширины аспирационного канала по его ширине и времени работы, что снижает качественные показатели всего устройства.

Формулировка целей статьи. Целью данной работы является оптимизация технологических режимов сепарации рушанки семян.

Основная часть. В результате обрушивания семян клещевины образуется рушанка, состоящая из крупных частиц ядра, оболочки и дроблёнки (мелкие частицы оболочки и ядра). Мелкие частицы имеют большой коэффициент парусности (малую критическую скорость), поэтому в существующих пневмосепарационных системах их можно отделить лишь на матерчатом фильтре. Однако из-за высокой масличности мелкие фракции будут забивать фильтры и могут залипать при транспортировании по технологическому тракту. Кроме того, запыленный воздух будет проникать через неплотные соединения, и вызывать аллергию работающего персонала. Поэтому в технологической схеме шельмашины предусматривается ступенчатая сепарация (рис.1): отделение дроблёнки на решете, разделение крупных фракций ядра и оболочки в вертикальном пневмосепарационном канале и последующее осаждение в центробежной осадительной камере, циклоне и матерчатом фильтре.

Для определения рациональных режимов колебания решета составим математическую модель перемещения материала по поверхности решета. На рис.2 и рис.3 показаны схемы сил действующих на частицу рушанки при движении по решету соответственно вверх и вниз.

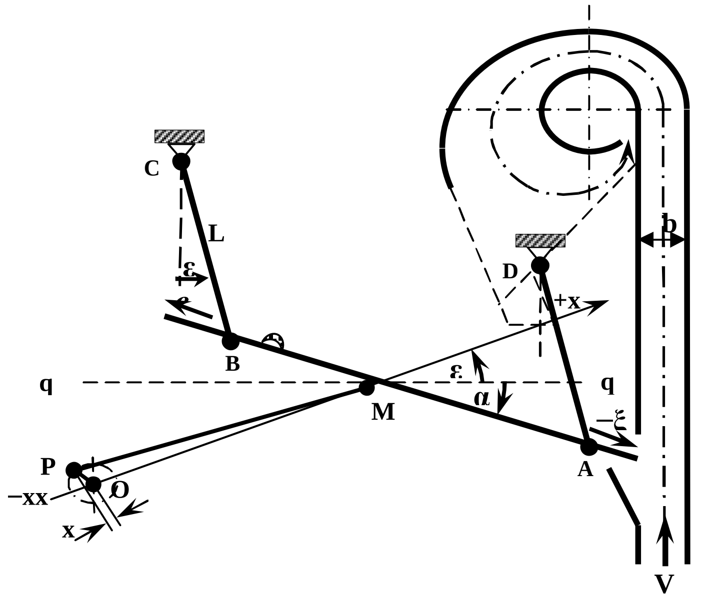


Рис. 1. Технологическая схема сепарации рушанки семян клещевины.

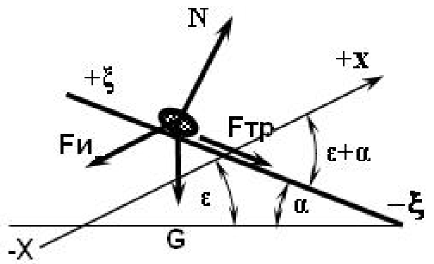


Рис. 2. Схема сил, действующих на частицы рушанки при движении вверх по решету (интервал положительных

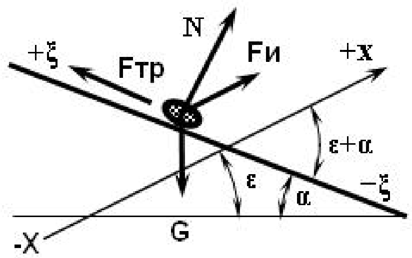


Рис. 3. Схема сил, действующих на частицы рушанки при движении вниз по решету (интервал отрицательных ускорений).

Дифференциальные уравнения относительного движения частиц по решету будет иметь следующий вид:

при движении частиц вверх

$$m\frac{d^2\xi_{вв}}{dt^2} = F_и\cos(\varepsilon+\alpha) - G\sin\alpha - F_{тр}, \qquad (1)$$

где $F_и = m\omega^2 r\cos(\omega t)$,

$$F_{тр} = m\cdot\omega^2 r\cdot\cos(\omega t)\sin(\varepsilon+\alpha)\cdot tg\varphi + m\cdot g\cdot\cos\alpha\cdot tg\varphi.$$

при движении частиц вниз

$$m\frac{d^2\xi_{вн}}{dt^2} = F_{тр} - F_и\cos(\varepsilon+\alpha) - G\sin\alpha, \tag{2}$$

где $F_и = -m\omega^2 r\cos(\omega t)$,

$F_{тр} = mg\cdot\cos\alpha\cdot tg\varphi + mgk\sin(\varepsilon+\alpha)\cos(\omega t)tg\varphi$

где $\xi_{вв}$, $\xi_{вн}$ – перемещение частицы соответственно вверх, вниз по решету;

$F_и$, $F_{тр}$, G - соответственно действующие на частицу сила инерции, сила трения, вес частицы;

m, g – масса частицы, ускорение свободного падения;

ω, r – угловая скорость и радиус кривошипа;

$k=\omega^2\cdot r/g$ – показатель кинематического режима;

t – время;

α - угол наклона решета к горизонту;

φ - угол трения:

ε - угол наклона линии качения *–X* - *+X*, проходящей через центр вращения кривошипа и ось шарнира, соединяющего шатун и решето.

Анализ уравнений (1) и (2) позволяет определить следующие показатели кинематических режимов [3];

$$k_1 = \frac{\omega_1^2 r}{g} = \frac{\sin(\alpha+\varphi)}{\cos(\varepsilon+\alpha+\varphi)},$$

$$k_2 = \frac{\omega_2^2 r}{g} = \frac{\sin(\varphi-\alpha)}{\cos(\varepsilon+\alpha-\varphi)}, \tag{3}$$

$$k_0 = -\frac{\cos\alpha}{\sin(\varepsilon+\alpha)}.$$

При которых они, определяют условия движения частицы по решету следующим образом: если $k\le|k_1|$ - движение вверх не происходит; $k\le|k_2|$ - движение вниз не происходит; $k\le|k_0|$ -отрыв массы от поверхности решета не происходит.

Характер относительного движения материала по наклонной качающейся плоскости определяется (углом наклона плоскости ***α*)**, наклоном линии качения (угол ***ε***), коэффициентом трения материала о поверхность несущей его плоскости и показателями кинематического режима этой плоскости (k_0, k_1, k_2).

Одной из основных задач оптимизации технологических режимов работы решётного стана шельмашины является определение рационального угла наклона решета. Теоретически в настоящее время этого определить нельзя. Опыт создания зерноочистительных машин показал, что для зерна угол наклона решета ***α*** в среднем составляет 4°, для подсевных решёт 11º, известны конструкции шельмашин с углом наклона решета 20º. Угол трения φ для рушанки семян клещевины составляет 27º [4]. Выбирая из практики очистительных машин три варианта угла наклона решета (4°, 14° и 20°), определяем для них с учётом технологических требований процесса просеивания на решете и загрузки аспирационного канала по его длине и времени работы оптимальные кинематические режимы. Для решения этой задачи воспользуемся теорией относительного движения тела по колеблющейся наклонной плоскости с трением [3].

На графике (рис. 4) нанесены три типа кривих уравнений (3), которые охватывают всю совокупность режимов в границе от $k=0$ до $k=3$, с направленностью линии каченя $-X$ - $+X$, меняющейся от ε=-180° до ε=+180°. Пересечение этих кривых разбивает всю совокупность режимов на следующие области:

область1 относительного покоя характеризуется точками, расположенными ниже контура кривых $k_1a_0k_1$ и $k_2b_0k_2$, так как в данном случае выдержано условие $k_1 \geq k \leq k_2$;

область 2 сдвигов только вниз характеризуется точками, расположенными на площади, очерченной контуром $k_1IIb_0Ik_1$ любая точка, расположенная на этой площади, удовлетворяет условию $k_1 \geq k > k_2$;

область 3 сдвигов только вверх характеризуется точками, расположенными на площади, очерченной контуром $k_2I\ IIk_2$; любая точка, расположенная на этой площади, удовлетворяет условию $k_1 < k < k_2$;

область 4 сдвигов вверх – вниз характеризуется точками, расположенными на площади, очерченной контуром $k_2I\ a_0k_2$ и k_1IIk_2 здесь любая точка удовлетворяет условию $k_1 < k > k_2$;

Область режимов сдвигов вверх вниз, сдвиг вниз значительней сдвига вверх 4А-ВН: $k_1 < k < k_0$; $k >> k_2$; $\varepsilon_1 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_A$.

Из этих условий определяем значение *ε*. Для обеспечения эффективности работы решёт подходит 4-я область сдвигов вверх - вниз с преобладанием сдвигов вниз, при которой перемещение материала происходит без отрыва от поверхности решета. При этом целесообразно использовать вариант с полным отсутствием покоя при чередовании периодически последовательных сдвигов вниз и вверх, что имеет место при выполнении показателя режима k_w. Величину k_w можно вычислить из следующего уравнения [3]:

$$A\frac{\sin(\alpha+\varphi)}{\cos(\varepsilon+\alpha+\varphi)} - B\frac{\sin(\varphi-\alpha)}{\cos(\varepsilon+\alpha-\varphi)} = k_w^2 \sin\left[(A+B)\frac{\cos(\varepsilon+\alpha-\varphi)}{\sin(\varphi-\alpha)}\right],$$

где

$$A = \sqrt{k_w^2 - \frac{\sin^2(\alpha-\varphi)}{\cos^2(\varepsilon+\alpha-\varphi)}} \quad \text{и} \quad B = \sqrt{k_w^2 - \frac{\sin^2(\alpha+\varphi)}{\cos^2(\varepsilon+\alpha+\varphi)}}.$$

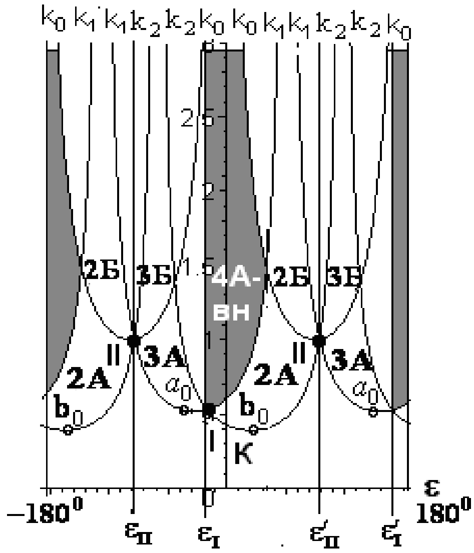


Рис. 4. График областей типичных режимов движения рушанки семян клещевины по колеблющемуся решету.

Для определения ширины вертикального пневмосепарационного канала при сепарации рушанки семян клещевины построим траектории ядра и оболочки семян при различных скоростях воздушного потока, а также скоростях и углах ввода семян в канал. На рис.5 представлена схема сил, действующих на частицы рушанки в вертикальном пневмосепарационном канале.

Дифференциальные уравнения движения частиц рушанки в координатах X0Y запишутся в виде:

$$\left.\begin{aligned} m\frac{d^2x}{dt^2} &= -R\sin\beta, \\ m\frac{d^2y}{dt^2} &= -mg + R\cos\beta; \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

где R – сила сопротивления воздушного потока;

$$R = mk_п u^2 \quad (5)$$

$k_п$ – коэффициент парусности, $м^{-1}$;

m – масса частицы, кг;

u – скорость частицы относительно воздушного потока, м/с;

V_B – скорость воздушного потока м/с;

C_0, C – начальная и скорость частицы рушанки в воздушном потоке, м/с;

x_0', x', y_0', y' – проекции начальной и скорости в воздушном потоке частиц рушанки, м;

α, β - углы вбрасывания частицы рушанки и направления скорости движения частиц относительно скорости воздушного потока, град.;

G=m·g - вес частицы, Н.

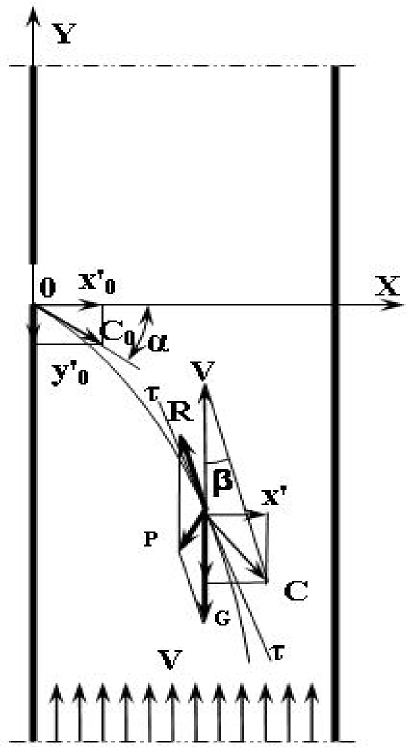


Рис. 5. Схема сил, действующих на частицу рушанки в вертикальном пневмосепарационном канале.

В табл. 1 приводятся величины k_{ac}, $k_п$, $v_{кр}$. Значения k и $v_{кр}$ взяты из работы [5], $k_п$ рассчитаны по уравнению [4]

$$k_п = \frac{k\rho_0 F}{m}, \qquad (6)$$

где k_{ac} – коэффициент аэродинамического сопротивления;

F - миделево сечение сепарируемой частицы, м^2;

$v_{кр}$ – критическая скорость, м/с;

ρ_0 – плотность воздуха, кг/м^3 .

Выражение для относительной скорости частицы в воздушном потоке в соответствии с соответствующим планом скоростей можно представить в следующем виде [6]

$$u^2 = v^2\left[\left(1+\frac{\dot{y}}{v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^2\right]. \qquad (7)$$

После преобразования системы уравнений (4) с учётом зависимостей (5) и (6) получена система дифференциальных уравнений [6]

$$\left.\begin{aligned} \ddot{x} &= -Kv\sqrt{\left(1+\frac{\dot{y}}{v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^2}\left(\frac{\dot{x}}{v}\right); \\ \ddot{y} &= -g + Kv^2\sqrt{\left(1+\frac{\dot{y}}{v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^2}\left(1+\frac{\dot{y}}{v}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

Анализ выражения $\sqrt{\left(1+\frac{\dot{y}}{v}\right)^2+\left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^2}$ в пределах практических значений режимов сепарирования и скоростей перемещения частиц примесей показывает, что его величина изменяется незначительно и для приближённого решения может быть принята постоянной

$$\psi = \sqrt{\left(1+\frac{\dot{y}}{v}\right)^2+\left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^2} = \psi_{\text{ср}} = \text{const}. \qquad (9)$$

Для наших условий при расчёте использовали значение ψ=1,06.

Таблица 1– Коэффициенты сопротивления, парусности и критической скорости семян, ядра и оболочки клещевины

Анализируемый материал	k_{ac}	k_n 1/м	$v_{кр}$ м/с	k_{ac}	k_n 1/м	$v_{кр}$ м/с	k_{ac}	k_n 1/м	$v_{кр}$ м/с
	При минимальной $v_{кр}$			При максимальной $v_{кр}$			При $v_{кр}$, присущей наибольшему количеству материала		
Семена	0,28	0,27	6,0	—	—	—	0,37	0,09	10,2
Ядро	0,25	0,27	6,0	—	—	—	0,38	0,09	10,2
Оболочка	2,14	0,76	3,6	0,65	0,23	6,5	1,70	0,61	4,0

Для решения системы уравнений (8) с учётом зависимости (9) использованы следующие начальные условия [6]

$$t = 0;\ x_0 = 0;\ y_0 = 0;\ \left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = c_{x0};\ \left(\frac{dy}{dt}\right)_0 = c_{y0}$$

Получены аналитические зависимости для составляющих скорости и перемещения частиц рушанки в пневмосепарирующем канале:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\dot{x}_0}{\exp(Kv\psi t)}; \\ \dot{y} &= \frac{1}{Kv\psi}\left\{\left(Kv^2-g\right)+\left[\left(g-Kv^2\psi\right)-Kv^2\psi\dot{y}_0\right]\exp(-Kv\psi t\right\}; \end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{\dot{x}_0}{k_п v\psi}(1-e^{-k_п v\psi t}); \\ y &= -\frac{k_п v^2\psi-g}{v\psi}t+\frac{1}{(k_п v\psi)^2}\left[\left(g-k_п v^2\psi\right)-k_п v\psi\dot{y}_0\right](1-e^{k_п v\psi t}). \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

На рис. 6 представлены траектории при угле наклона решета, т.е. угле вбрасывания в сепарирующий канал $\alpha = 4^o$ и скорости воздушного потока $V_B = 4$ м/с.

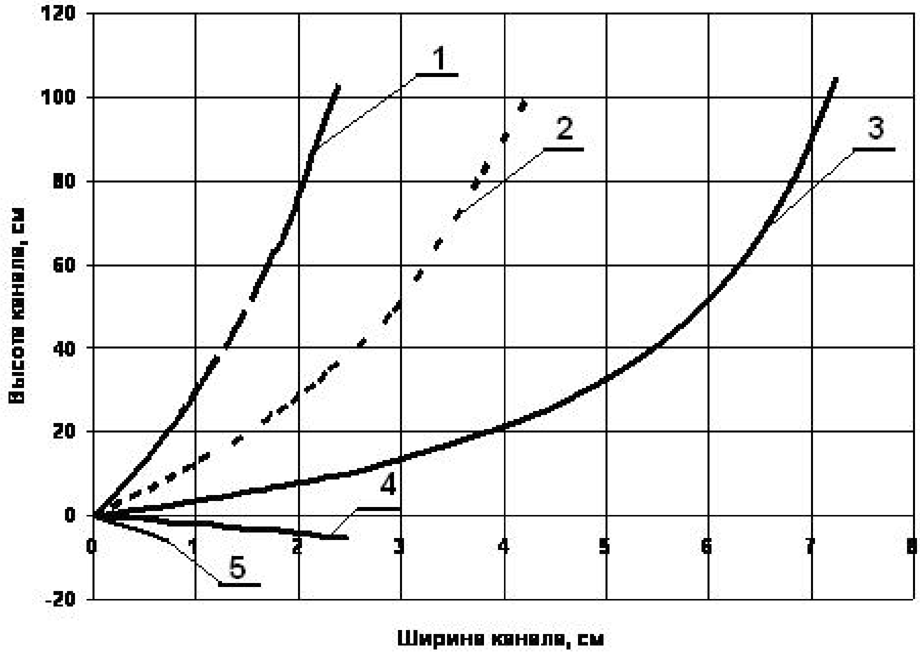


Рис. 6. Траектории частиц рушанки семян клещевины при сепарации в вертикальном пневмосепарационном канале: 1-$k_п$=0,76; 2-$k_п$=0,5; 3-$k_п$=0,4; 4-$k_п$=0,35; 5-$k_п$=0,3.

Результаты теоретических исследований движения частиц рушанки по наклонному решету представлены в табл. 2, а результаты расчёта сепарации в аспирационном канале даны в табл. 3.

Таблица 2 – Результаты теоретических исследований движения частиц рушанки по наклонному решету

Наименование параметров	Обозначение	Варианты		
		I	II	III
Угол наклона решета, град.	α	4	14	20
Угол направления линии качения, град.	ε	-19	-17.5	-30
Максимальная скорость движения вверх, м/с	$V_{max\ b}$	0.18	0.34	0.42
Максимальная скорость движения вниз, м/с	$V_{max\ n}$	-0.47	-0.5	-0.5
Выбранный коэффициент кинематического режима	k_w	1.86	2.0	2.5
Угловая скорость кривошипа, рад/с	ω	60.4	62.8	70

Таблица 3 – Результаты теоретических исследований параметров аспирационного канала шельмашины

Наименование параметров	Обозначение	Величина
Ширина аспирационного канала, мм.	B	70
Высота канала от точки вбрасывания до осадочной камеры, мм	H_1	1000
Высота канала от точки вбрасывания до нижней кромки канала, мм	H_2	250
Скорость воздушного потока, м/с	V_B	4.0
Скорость вбрасывания частиц рушанки, м/с	V_P	0,18
Угол вбрасывания частиц рушанки в аспирационный канал, град	α	4,0

Выводы.

1. Установлена взаимосвязь кинематических режимов решётного стана и параметров воздушного потока пневмосепарационной системы и их совместное влияние на качество сепарации рушанки. Так, например, сочетание максимальной скорости движения вверх и угла наклона решета с одной стороны и ширины пневмосепарационного канала и скорости воздушного потока с другой стороны позволяют равномерно загрузить аспирационный канал по его ширине. А выбор максимально технологически возможной угловой скорости способствует улучшению загрузки канала по времени работы. Учёт показателя кинематических режимов k_w улучшает просев мелких частей оболочки через отверстия в решете и загрузку канала во времени.

2. Рекомендуется с целью учёта изменения физико-механических свойств сепарируемого материала и расширения функциональных возможностей во вновь создаваемых сепарационных систем предусматривать возможность регулирования угла наклона решета, угловой скорости кривошипа, скорости воздушного потока и ширины аспирационного канала.

Литература.

1. *Гавриленко И.В.* Оборудование для производства растительных масел / *Гавриленко И.В.* Пищевая промышленность, 1972. – 286 с.

2. Технология производства растительных масел / [*Копейковский В.М., Данильчук С.И., Гарбузова Г.И. и др*] ; под ред. *В.М. Копейковского*. – М.: Легкая и пищевая промышленность. 1982. – 416 с.

3. *Летошнев М.Н.* Сельскохозяйственные машины. Теория, расчёт, проектирование и испытание / *Летошнев М.Н.* – М.: Сельхозиздат, 1955. – 764..

4. *Белобородов В.В.* Основные процессы производства растительных масел /*Белобородов В.В.* – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 478 с.

5. *Кудрявцев Н.* Взвешенные скорости маслосемян, их ядер и оболочек /*Н. Кудрявцев* //Масло-жировое дело. - 1935. - №5. - С. 206 - 208.
6. *Гортинский В.В.* Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. / *Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А.* – М. : Колос. 1980. – с. 160 – 181.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ РУШАНКИ НАСІННЯ РИЦИНИ У ШІЛЬМАШИНІ

Ткаченко О.В., Дідур В.В., Дідур В.А., Ткаченко В.О.

***Анотація* – робота присвячена оптимізація технологічних режимів комбінованої сепарації рушанки насіння на решеті, що коливає, та в аспіраційному каналі, що дозволяє ефективніше використовувати обрані кінематичні режими решета й рівномірно завантажити аспіраційний канал по ширині й часу роботи.**

MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS OF SEPARATION BROKEN OF SEEDS RICINUS

A. Tkachenko, V. Didur, V. Didur, V. Tkachenko

Summary

The work is devoted optimization of technological modes of the combined separation broken seeds on shaking sieve and in the aspiration channel, allowing to use the chosen kinematic modes sieve more effectively and more uniform to load the aspiration channel on width and an operating time.

УДК 519.254.255

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ОБЧІСУЮЧОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ З ПРУЖНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ЗБИРАННЯ РИЦИНИ

Леженкін О.М., д.т.н., (РФ)
Головін С.В., інженер
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-14-38

Анотація **– робота присвячена обґрунтуванню оптимальних параметрів та режимів роботи обчісуючого робочого органу з пружними робочими елементами для збирання рицини.**

Ключові слова **– параметри, режими, обчісуючий робочий орган, рицина, збирання.**

Постановка проблеми. Рицина – цінна технічна культура. Цінність визначається високим вмістом олії в насінні – 50…57%. Вона містить 81…96% гліцеридів рицинолевої кислоти, яку не виявлено в інших оліях. Рицина не висушує ґрунт, очищає поле від бур'янів. Корені і стебла швидко розкладаються, збагачуючи ґрунт органічними і мінеральними речовинами, тому вона є добрим попередником для зернових культур. Рицина достигає нерівномірно. Спочатку достигають нижні грона на головному стеблі, пізніше на розгалуженнях першого і наступного порядків. Збирати рицину починають, коли коробочки у центральних гронах стають коричневими і підсихають при вологості плодових оболонок насіння не більше 12%. Сорти, плоди яких не розтріскуються, збирають напряму спеціальними рициновими комбайнами ККС-4 і ККС-6. В результаті одержують близько 80% насіння та до 20% коробочок. Існуючі машини для збирання рицини здійснюються пропуск всієї наземної частини рослини крізь молотарку та сепаруючий пристрій, що викликає надлишок витрат енергії на деформацію стеблин і інших вегетативних частин рослин. Створення машини для збирання рицини з технологічним процесом, який передбачав би операцію обриву коробочок рицини з рослини на корені, наступне відокремлення плодів від дрібних домішків і подальшу їх доробку, дозволило б запобігти зазначених недоліків. В зв’язку з цим виникла задача розробити та обґрунтувати робочий орган для збирання рицини методом обчісування рослин на корені.

Аналіз публікацій. Розробкою технічних засобів збирання рицини займалися Черепухін В.Д. [1], Рой О.А. [2], Квач В.Г. [3] та інші. Але, дані дослідження присвячені, головним чином, комбайновій технології збирання рицини. Дослідження засобів для роздільного збирання рицини методом обчісування на корені приведені в роботах [4, 5]. Будова робочого органу для обчісування рицини приведена в [6].

Постановка завдання. В загальному вигляді математична модель має вигляд [11]

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \\ + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{34}x_3x_4 + \\ + b_{35}x_3x_5 + b_{45}x_4x_5 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{55}x_5^2\ , \tag{1}$$

де x_1 - частота обертання обчісуючого барабана, $хв^{-1}$;

x_2 - глибина занурення обчісуючого барабану в масу, м;

x_3 - зазор між обчісуючими пальцями, м;

x_4 - довжина обчісуючих пальців, м;

x_5 - швидкість руху обчісуючого агрегату, м/с.

В конкретному випадку модель технологічного процесу обчісування рицини із застосуванням робочого органу з пружними робочими елементами має вигляд [4] (вихідна функція – втрати насіння рицини, піддон відсутній)

$$y = 1{,}9467 + 0{,}036x_1 + 0{,}062x_2 + 0{,}017x_3 + 0{,}1x_4 - 0{,}136x_5 + \\ + 0{,}085x_1x_2 + 0{,}02x_1x_3 - 0{,}148x_1x_4 + 0{,}0375x_1x_5 - 0{,}083x_2x_3 + \\ + 0{,}09x_2x_4 + 0{,}095x_2x_5 - 0{,}078x_3x_4 + 0{,}0625x_3x_5 + 0{,}0725x_4x_5 + \\ + 0{,}146x_1^2 + 0{,}125x_2^2 + 0{,}092x_3^2 + 0{,}209x_4^2 + 0{,}1x_5^2\ , \tag{2}$$

З метою обґрунтування параметрів та режимів роботи обчісуючого модулю необхідно визначити оптимальні їх значення.

Основна частина. Для визначення оптимальних значень вхідних параметрів вихідне рівняння (2) диференціюють по кожній незалежній змінній:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial y}{\partial x_1} = 0.036 + 0.292\cdot x_1 + 0.085\cdot x_2 + 0.02\cdot x_3 - 0.148\cdot x_4 + 0.025\cdot x_5; \\ &\frac{\partial y}{\partial x_2} = 0.062 + 0.085\cdot x_1 + 0.25\cdot x_2 - 0.083\cdot x_3 + 0.09\cdot x_4 + 0.095\cdot x_5; \\ &\frac{\partial y}{\partial x_3} = 0.017 + 0.02\cdot x_1 - 0.083\cdot x_2 + 0.184\cdot x_3 - 0.078\cdot x_4 + 0.0625\cdot x_5; \\ &\frac{\partial y}{\partial x_4} = 0.1 - 0.148\cdot x_1 + 0.09\cdot x_2 - 0.078\cdot x_3 + 0.418\cdot x_4 + 0.0725\cdot x_5; \\ &\frac{\partial y}{\partial x_5} = -0.136 + 0.025\cdot x_1 + 0.095\cdot x_2 + 0.0625\cdot x_3 + 0.0725\cdot x_4 + 0.2\cdot x_5. \end{aligned} \tag{3}$$

Прирівнюємо часткові похідні системи (3) до нуля [4]:

$$\begin{cases} 0.036+0.292\cdot x_1+0.085\cdot x_2+0.02\cdot x_3-0.148\cdot x_4+0.025\cdot x_5=0; \\ 0.062+0.085\cdot x_1+0.25\cdot x_2-0.083\cdot x_3+0.09\cdot x_4+0.095\cdot x_5=0; \\ 0.017+0.02\cdot x_1-0.083\cdot x_2+0.184\cdot x_3-0.078\cdot x_4+0.0625\cdot x_5=0; \\ 0.1-0.148\cdot x_1+0.09\cdot x_2-0.078\cdot x_3+0.418\cdot x_4+0.0725\cdot x_5=0; \\ -0.136+0.025\cdot x_1+0.095\cdot x_2+0.0625\cdot x_3+0.0725\cdot x_4+0.2\cdot x_5=0. \end{cases} \tag{4}$$

Перетворюючи систему (4) одержимо:

$$\begin{cases} 0.292\cdot x_1+0.085\cdot x_2+0.02\cdot x_3-0.148\cdot x_4+0.025\cdot x_5=-0.036; \\ 0.085\cdot x_1+0.25\cdot x_2-0.083\cdot x_3+0.09\cdot x_4+0.095\cdot x_5=-0.062; \\ 0.02\cdot x_1-0.083\cdot x_2+0.184\cdot x_3-0.078\cdot x_4+0.0625\cdot x_5=-0.017; \\ 0.148\cdot x_1-0.09\cdot x_2+0.078\cdot x_3-0.418\cdot x_4-0.0725\cdot x_5=0.1; \\ 0.025\cdot x_1+0.095\cdot x_2+0.0625\cdot x_3+0.0725\cdot x_4+0.2\cdot x_5=0.136\,. \end{cases} \tag{5}$$

При апроксимації функції відгуку поліномом другого ступеня (5) і диференціюванні його за кожною незалежною перемінною отримана система п’яти лінійних рівнянь. Знаходимо визначник цієї системи

$$\Delta=\begin{vmatrix} 0.292 & 0.085 & 0.02 & -0.148 & 0.025 \\ 0.085 & 0.25 & -0.083 & 0.09 & 0.095 \\ 0.02 & -0.083 & 0.184 & -0.078 & 0.0625 \\ 0.148 & -0.09 & 0.078 & -0.418 & -0.0725 \\ 0.025 & 0.095 & 0.0625 & 0.0725 & 0.2 \end{vmatrix}=-0.0126\,.$$

Визначник системи не дорівнює нулю, отже поверхня відгуку має центр. Вирішуючи систему (4) знаходимо координати центра S_1. Їх чисельні значення рівні відповідно X_{1S} = -0.16534, X_{2S} =-1.27783, X_{3S} = -1.64695, X_{4S} =-0.689385, X_{5S} =2.07221.

Аналізуючи отримані координати центру маємо, що три значення X_{2S} =-1.27783, X_{3S} = -1.64695 та X_{5S} =2.07221 виходять за межі встановленого діапазону значень. Тому, в подальшому, користуючись рекомендаціями приймаємо максимальні значення в цих точках, а саме: X_{2S} =-1, X_{3S} =-1 та X_{5S} =1 .

Підставляємо величини X_{1S}, X_{2S}, X_{3S}, X_{4S}, X_{5S} знаходимо оптимальне значення вихідного параметру (втрати коробочок) Y_{1S} = 1,79128.

Приймаючи почергово значення кожного фактору, маємо залежності втрат насіння рицини від вхідних параметрів:

$$\begin{aligned} Y &= 1.79688 + 0.0580289\cdot x_1 + 0.146\cdot x_1^2; \\ Y &= 1.81974 + 0.15194\cdot x_2 + 0.125\cdot x_2^2; \\ Y &= 1.91095 + 0.210151\cdot x_3 + 0.092\cdot x_3^2; \\ Y &= 1.83534 + 0.205797\cdot x_4 + 0.209\cdot x_4^2; \\ Y &= 2.04393 -0.351132\cdot x_5 + 0.1\cdot x_5^2. \end{aligned} \tag{6}$$

За результатами розрахунків будуємо залежності (рис. 1).

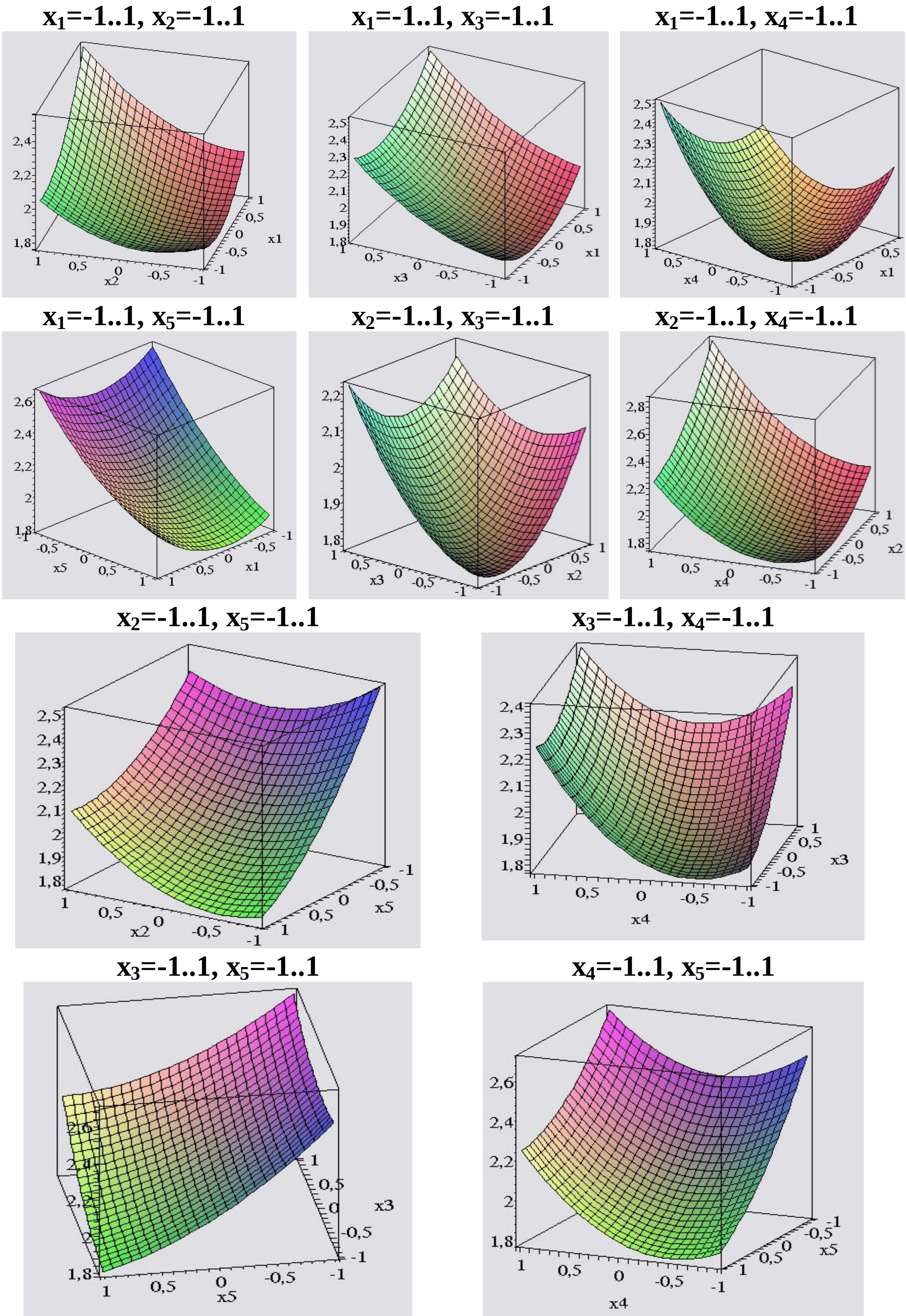


Рис. 1. Поверхні відклику залежності втрат насіння рицини.

Аналіз фракційного складу проводився по аналогічній методиці. В результаті була отримана математична модель складу обчесаного вороху (піддон відсутній) у вигляді рівняння регресії другого порядку

$$\begin{aligned} y = 74.49 - 2.155x_1 - 3.965x_2 + 0.6375x_3 - 2.9825x_4 + 0.825x_5 - \\ - 2.76x_1x_2 - 1.68x_1x_3 + 3.51x_1x_4 + 2.7x_2x_4 + 2.39x_2x_5 + 2.75x_3x_4 - \\ - 2.21x_3x_5 - 7.06x_1^2 - 5.96x_2^2 - 5.07x_3^2 - 9.67x_4^2 - 17.9967x_5^2 \; . \end{aligned} \tag{7}$$

Після диференціювання маємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x_1} &= -2.155 - 14.12 \cdot x_1 - 2.76 \cdot x_2 - 1.68 \cdot x_3 + 3.51 \cdot x_4; \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} &= -3.965 - 2.76 \cdot x_1 - 11.92 \cdot x_2 + 2.7 \cdot x_4 + 0.39 \cdot x_5; \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} &= 0.6375 - 1.68 \cdot x_1 - 10.14 \cdot x_2 + 2.75 \cdot x_4 - 2.21 \cdot x_5; \\ \frac{\partial y}{\partial x_4} &= -2.9825 + 3.51 \cdot x_1 + 2.7 \cdot x_2 + 2.75 \cdot x_3 - 19.34 \cdot x_4; \\ \frac{\partial y}{\partial x_5} &= 0.825 + 0.39 \cdot x_2 - 2.21 \cdot x_3 - 35.9934 \cdot x_4. \end{aligned} \tag{8}$$

Після перетворень знаходимо координати центра S_2. Їх чисельні значення рівні відповідно X_{1S}=-0.143, X_{2S}=-0.3507 X_{3S}=0.0258, X_{4S}=-0.22542, X_{5S}=-0.002.

Підставляємо значення X_{1S}, X_{2S}, X_{3S}, X_{4S}, X_{5S} знаходимо оптимальне значення вихідного параметру (фракційний склад) Y_{S2}=75,6824. За результатами розрахунків будуємо залежності (рис.2).

Рівняння (2) і (7) послужили основою для пошуку раціональних режимів збирання за допомогою математичного пакета програм Математика.

Встановлено, що раціональні значення мають величину:

n = 373,39…374,28 хв$^{-1}$;

H = 0,82…0,911 м;

V = 2,87…1,828 м/с,

l = 0,1155…0,139 м;

h = 0,010…0,0151 м.

При цьому втрати коробочок рицини становлять 2,5%, фракційний склад – коробочки і вільне зерно з третинками становлять 63,6%, рослинна маса – 32,7%, а домішки – 3,7%.

Висновок.

1. Встановлено, що втрати коробочок при використанні обчісуючого робочого органу з пружними елементами (без піддону) дорівнюють 2,5%.

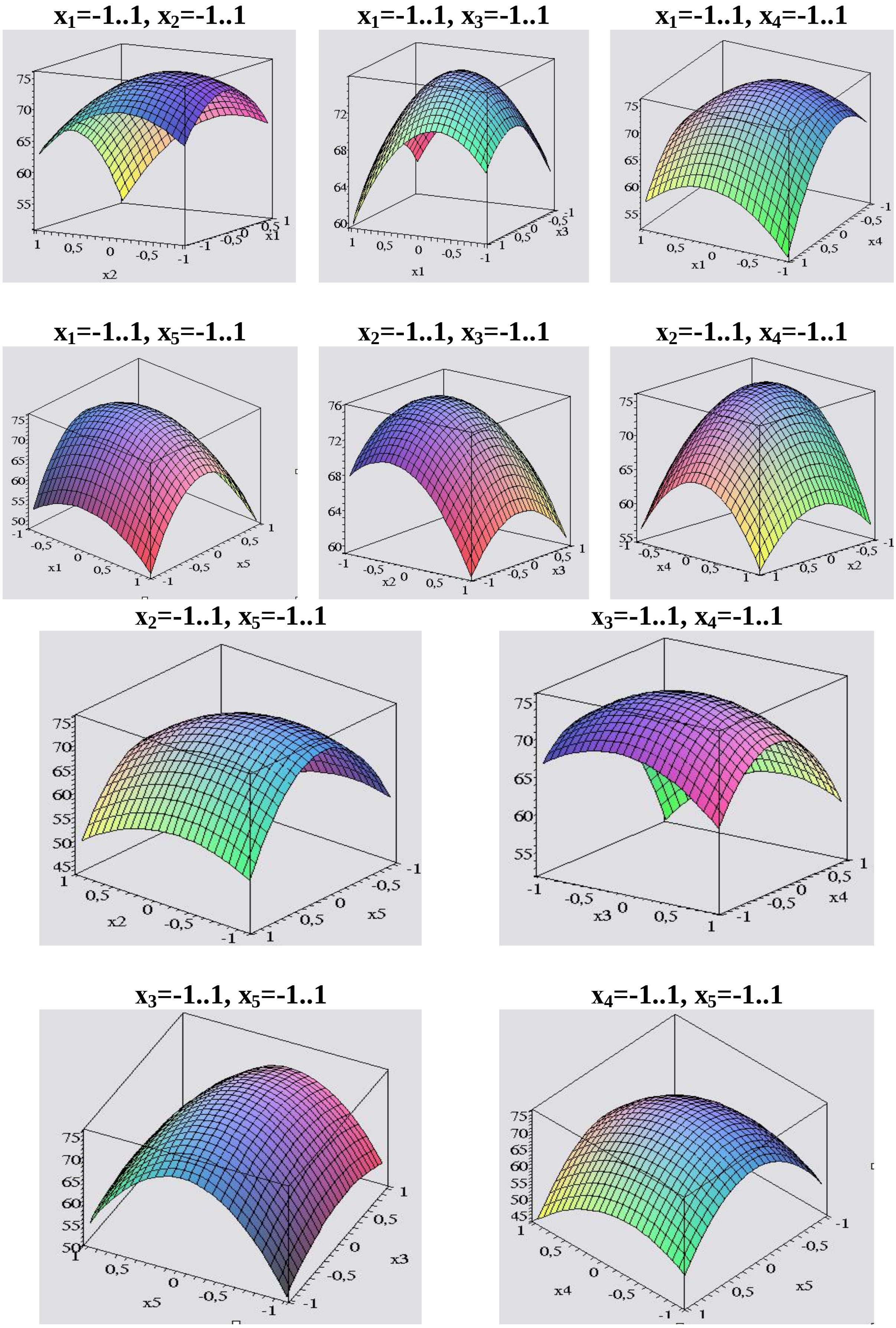


Рис. 2. Поверхні відклику фракційного складу насіння рицини.

2. Виявлено, що обчесаний ворох рицини складається з коробочок і вільного зерна – 63,6%, рослинної маси – 32,7%, домішків – 3,7%.

3. В результаті проведених досліджень отримані раціональні значення параметрів та режимів роботи обчісуючого робочого органу з пружними елементами, а саме:

$\boldsymbol{n}$ = 373,39…374,28 хв$^{-1}$;
$\boldsymbol{H}$ = 0,82…0,911 м;
$\boldsymbol{V}$ = 2,87…1,828 м/с,
$\boldsymbol{l}$ = 0,1155…0,139 м;
$\boldsymbol{h}$ = 0,010…0,0151 м.

Література.

1. *Черепухин В.Д.* Физико-механические свойства вороха клещевины в связи с механизацией его очистки / *В.Д. Черепухин* // Науч.-техн. бюл. ВНИИ масл. культур. - 1974. - №3. – С. 60-65.

2. *Рой А.А.* Исследование технологического процесса обмолота клещевины / *Рой Александр Андреевич*: автореф. дис...д.техн. наук. - Волгоград, 1969. – 57 с.

3 *Квач В.Г.* Двухфазная уборка клещевины / *В.Г. Квач, В.Д. Черепухин, В.В. Сайченко* // Техника в сельском хозяйстве. - 1979. - №10. – С.16-18.

4. *Головін С.В.* Моделі регресії очосуючого модулю для збирання рицини з використанням пружних елементів / *С.В. Головін*. - Праці ТДАТУ / Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Моделювання технологічних процесів в АПК». - Мелітополь, 2010. - Вип.10., Т. 8. – С. 289-297.

5. *Дідур В.А.* Результати польових досліджень машини для збирання рицини методом очісування на корені / *В.А. Дідур, О.М. Леженкін, С.В. Головін*. - Праці ТДАТУ. - Мелітополь, 2010. - Вип.10., Т. 5. – С. 63-73.

6. Пат.50849 Україна МКИ^7 A01D41/08 A01D45/30 Пристрій для збирання рицини / *С.В. Головін, О.М. Леженкін, В.А. Дідур,* ТДАТУ // Промислова власність. – 2010. – Бюл.№12.

7. *Маркова Е.В.* Планирование эксперимента в условиях неоднородностей / *Е.В.Маркова, А.Н.Лисенков*. – М.: Наука, 1973. – 220 с.

8. Thre Level for the Study ob Quantitative Variables. / *G.E.P. Box, D.W. BehnKen* // Home New. – Technometrics, 1960, V.2, №4.

9. *Налимов В.В.* Статистические методы планирования экспериментальных экспериментов / *В.В. Налимов, Н.А. Чернова*. – М.: Наука, 1965. – 340 с.

10. *Адлер Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / *Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский*. – 2-е изд.,

пере раб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
11. *Мельников С.В.* Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / *С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин*. – Л.: Колос, 1980. – 165 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОЧОСУЮЧЕГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ УБОРКИ КЛЕЩЕВИНЫ

Леженкин А.Н., Головин С.В.

Аннотация **- работа посвящена обоснованию оптимальных параметров и режимов работы очосуючего рабочего органа с упругими рабочими элементами для уборки клещевины.**

OPTIMIZATION OF PARAMETERS AND OPERATING MODES BREAKAGE WORKING BODY WITH ELASTIC ELEMENTS FOR CASTOR-BEAN TREE CLEANING

A. Lezhenkin, S. Golovin

Summary

Work is devoted a substantiation of optimum parameters and operating modes breakage working body with elastic working elements for castor-bean tree cleaning.

УДК 631.171: 634

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ САДІННЯ ПІДЩЕП ПЛОДОВИХ КУЛЬТУР АПАРАТОМ ДИСКОВОГО ТИПУ

Караєв О.Г., к.т.н.,
Чижиков І.О., інженер*
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-24-36

***Анотація* – в статті запропоновано математичну модель оптимізації параметрів робочих органів садильного апарату дискового типу, що входить до складу секції машини для садіння підщеп плодових культур.**

***Ключові слова* - підщепа, дисковий садильний апарат, процес садіння, фази руху підщепи.**

Постановка проблеми. Інтенсифікація садівництва обумовлює подальше вдосконалення технології виробництва садивного матеріалу плодових культур. Якість саджанців плодових культур залежить не тільки від сортів, але й у значній мірі від того, наскільки якісно були висаджені підщепи у розсаднику. Садіння підщеп є однією з найбільш трудомістких операцій у технологічному процесі вирощування саджанців. Це пояснюється необхідністю розміщення на 1 гектарі від 45 до 100 тис. підщеп, які висаджуються за заданою схемою з подальшим ущільненням ґрунту біля кожної підщепи. При цьому відхилення штамба висадженої підщепи від вертикальної осі є одним із основних параметрів, який визначає отримання високоякісних саджанців [1].

В Інституті зрошуваного садівництва ім. М.Ф. Сидоренка НААН розроблено ДСТУ «Культури кісточкові. Щепи. Вимоги та методи контролю**», який встановлює основні біометричні параметри стану щеп на певних фазах їх розвитку під час вирощування щеплених саджанців. Зокрема для щеп першого року вирощування встановлене обмеження у відхиленні від вертикальної осі до 5^{o}. Машини, які сьогодні використовуються для садіння підщеп, не забезпечують виконання такої вимоги. Тому існує потреба в розробці та вдосконаленні засобів механізації садіння підщеп [2, додаток 21], які здатні забезпечити дотримання нормативних вимог до якості процесу садіння.

---

* Науковий керівник – к.т.н., доцент О.Г. Караєв
** Знаходиться на виданні

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженням процесів роботи ротаційних садильних апаратів займалися такі вчені, як Чубарин М.І., Черняк А.А., Антонов І.А., Мун В.Ф., Ткаченко А.І., Саньков С.М. та інші. Слід зазначити, що більшість авторів, розглядали процес садіння не підщеп, як матеріалу для виробництва плодових культур, а розсади сільськогосподарських культур (томатів, перцю, капусти та ін.). Дані культури не є спорідненими і їхні параметри не взаємозамінні, тому як об'єкт дослідження ці культури треба розглядати окремо. Аналіз існуючого математичного апарату [4,7,9] показав, що аналітичні залежності не враховують динаміку переміщення підщепи у борозні під дією ґрунту після її вивільнення із захоплювача. Такі моделі не забезпечують у повній мірі процес оптимізації робочих органів секцій садильної машини, а саме їх сумісний вплив на рослину. Тому розробка математичної моделі процесу садіння підщеп, що описує спільну взаємодію робочих органів секції садильної машини з урахуванням законів як кінематики, так і динаміки є актуальною задачею.

Мета статті. Формалізація руху підщепи при її садінні дисковим апаратом шляхом розробки математичної моделі.

Основна частина. При розробці математичної моделі передбачалося урахування кінематичних і динамічних характеристик руху підщепи після її вивільнення із захоплювача, під час контакту підщепи з ґрунтом на дні борозни, а також дії на підщепу валка ґрунту, що переміщується загортачами і прикочуючими котками. В результаті моделювання отримано такі параметри робочих органів секції садильної машини, при роботі яких відхилення підщепи від вертикальної осі не перевищує 5^o.

Модель розроблено відповідно до розрахункової схеми процесу садіння, яка представлена на рис. 1. При розробці моделі вжито такі умовні позначення:

h_C – відстань від коренів підщепи до центра тяжіння підщепи, м;

a – довжина кореневої частини підщепи, м;

d – відстань від коренів підщепи до місця затискання її захоплювачем, м;

h – довжина підщепи, м;

h_0 – відстань між дном борозни і нижньою точкою на диску, м;

α – кут між вертикальною віссю і радіусом на диску, який визначає точку вивільнення підщепи із захоплювача, рад;

β – кут відхилення підщепи у захоплювачі по відношенню до радіуса диска в момент її вивільнення, рад;

δ – найменший кут відхилення підщепи від вертикалі, рад;

$\gamma=\gamma(l)$ – лінійна щільність мас за довжиною, кг/м;

v_M – швидкість поступального руху машини, м/с;

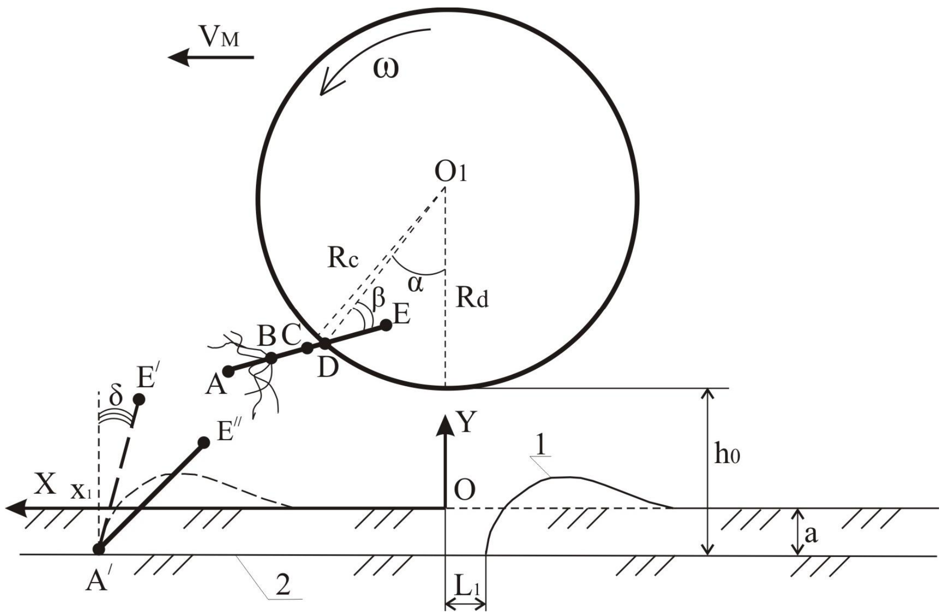


Рис. 1. Схема до виводу рівнянь математичної моделі: 1 – фронт хвилі ґрунту, який утворюється внаслідок спільної дії загортачів; 2 – дно борозни; 3 – підщепа (умовні позначення: АВ=*а*; АС=h_C; АD=*d*; АЕ=*h*).

ω – кутова частота обертання диска, $с^{-1}$;

Mtr – момент сил тертя при обертанні підщепи навколо нерухомого центра при спиранні підщепи на кореневу частину, Н·м;

R_c – радіус центру тяжіння підщепи, м;

R_d – радіус диску, м;

L_1 – відстань між переднім фронтом хвилі ґрунту, яку утворюють загортачі, і вертикаллю, що проходить через вісь обертання диска, м;

t_0 – тривалість першої фази, с;

t_1 – тривалість третьої фази, с.

Процес руху підщепи безпосередньо після вивільнення її із захоплювача умовно можна розподілити на 4 фази:

перша фаза - вільне переміщення підщепи до зіткнення з ґрунтом;

друга фаза - зіткнення з ґрунтом з частковою втратою кінетичної енергії;

третя фаза - часткове вирівнювання підщепи за рахунок остаточної кінетичної енергії;

четверта фаза - остаточне вирівнювання підщепи при загортанні і прикочуванні котками.

Для спрощення вигляду рівнянь математичної моделі введено такі позначення:

$$I_0 = \int_0^h \gamma(x)dx, \quad I_1 = \int_0^h \gamma(x)xdx, \quad I_2 = \int_0^h \gamma(x)x^2dx, \qquad (1)$$

де x – відстань від кінця кореневої системи до певної точки на підщепі;

I_0 – маса підщепи;

I_1 – статичний момент підщепи відносно кореневої системи;

I_2 – момент інерції підщепи відносно кореневої системи.

Перша фаза. У цій фазі підщепа має поступальний та обертальний рух. Поступальний рух описується залежностями координат центра тяжіння від часу:

$$x_C = R_d \sin\alpha - (h_C - d)\sin(\alpha+\beta) + (v_M - \omega R_C \cos\alpha)t\,,$$

$$y_C = h_0 + R_d(1-\cos\alpha) + (h_C - d)\cos(\alpha+\beta) - \omega R_C t \sin\alpha - \frac{gt^2}{2}\,,$$

де радіус центра тяжіння R_c визначиться рівнянням

$$R_C = \sqrt{R_d^2 + (h_C - d)^2 - 2R_d(h_C - d)\cos\beta}\,. \qquad (2)$$

Тоді, згідно з [8], відстань h_C від коренів підщепи до центра тяжіння

$$h_C = \frac{I_1}{I_0}\,. \qquad (3)$$

Підщепа також обертається навколо центру тяжіння з кутовою частотою ω. Враховуючи те, що в кінці першої фази ($t=t_0$) коренева система торкнеться дна борозни, апліката центра тяжіння y_{C0} буде дорівнювати

$$y_{C0} = -a + h_C\cos(\alpha+\beta-\omega t_0)\,.$$

Тоді тривалість першої фази t_0 можна визначити шляхом вирішення трансцендентного рівняння

$$\begin{aligned} &h_0 + R_d(1-\cos\alpha) + (h_C - d)\cos(\alpha+\beta) - \\ &-\omega t_0 R_C\sin\alpha - \frac{gt_0^{\,2}}{2} = -a + h_C\cos(\alpha+\beta-\omega t_0). \end{aligned} \qquad (4)$$

Друга фаза. В якості допущення прийнято умову, що в момент контакту підщепи з ґрунтом зіткнення кореневої частини непружне, тому основна складова зіткнення спрямована впродовж осі підщепи, що компенсує набуту підщепою швидкість поступального руху. Але оскільки рух підщепи не компенсує моменту імпульсу обертання, тому, згідно із законом збереження моменту імпульсу відносно кутової частоти обертання ω_1 навколо нерухомої точки [5], маємо рівняння:

$$\omega_1\int_0^h \gamma(x)x^2dx = \omega\int_0^h \gamma(x)(x-h_C)^2dx\,,$$

звідки

$$\omega_1 = \frac{\omega(I_2 - 2I_1h_C + I_0h_C^{\,2})}{I_2}\,. \qquad (5)$$

Третя фаза. Для знаходження кута *δ*, що характеризує відхилення підщепи від вертикальної осі в кінці третьої фази, можна скористатися законом збереження енергії, що є трансцендентним рівнянням відносно δ

$$\frac{\omega_1^2}{2} I_2 = I_0 g h_C (\cos\delta - \cos(\alpha + \beta - \omega t_0)) + M_{tp}(\delta - \alpha - \beta + \omega t_0). \quad (6)$$

Для встановлення тривалості третьої фази складемо рівняння відносно кута *φ*, який визначає відхилення підщепи від вертикалі

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} I_2 = mgh_C \sin\varphi + M_{tr}. \quad (7)$$

Рівняння (7) не інтегрується у квадратурах, тому для знаходження часу переміщення підщепи скористаємося схемою Рунге-Кутта [3] до диференційної задачі, що є еквівалентною рівнянню (7) з початковими умовами $\varphi(0) = \alpha + \beta - \omega t_0$, $\varphi^{/}(0) = -\omega_1$ [6]:

$$\begin{cases} \dfrac{d\varphi}{dt} = \psi \\ \dfrac{d\psi}{dt} = \dfrac{mgh_C \sin\varphi + M_{tr}}{I_2} \\ \varphi(0) = \alpha + \beta - \omega t_0 \\ \psi(0) = -\omega_1. \end{cases} \quad (8)$$

При цьому для знаходження часу t_1 розрахунок за схемою потрібно вести до досягнення функцією *φ*(*t*) значення δ

$$\varphi(t_1) = \delta. \quad (9)$$

Четверта фаза. Для узгодження дій диска і загортачів підпір підщепи ґрунтом повинен розпочинатися у момент закінчення третьої фази. Для цього необхідно виконання такої умови

$$(t_0 + t_1)v_M - L_1 - x_1 = 0, \quad (10)$$

де

$$x_1 = h_C \sin(\alpha + \beta - \omega t_0) + R_d \sin\alpha -$$
$$-(h_C - d)\sin(\alpha + \beta) + (v_M - \omega R_C \cos\alpha)t_0$$

Алгоритм реалізації моделі. Алгоритм обчислення кута δ і лівої частини рівняння (10) за відомими кутами α і β:

1. Обчислити інтеграли (1), визначити радіус обертання R_C та висоту центра тяжіння h_C за формулами (2) і (3).
2. Вирішити трансцендентне рівняння (4) методом дихотомії на відрізку.
3. Визначити кутову частоту обертання підщепи у другій фазі за формулою (5).
4. Визначити фактичне значення кута *δ*, що характеризує відхилення підщепи від вертикальної осі в кінці третьої фази шляхом вирі-

шення трансцендентного рівняння (6) методом дихотомії на інтервалі $[0;\pi/2]$.

5. Рішенням системи диференціальних рівнянь (8) з урахуванням граничної умови (9) визначити тривалість третьої фази t_1.

6. Визначити значення лівої частини умови підпору (10).

Алгоритм визначення параметрів, що можуть варіювати – кутів α і β з урахуванням умови (10)

$$\delta = \delta_0 . \tag{11}$$

1. Задати межі варіювання параметрів $[\alpha_{min}; \alpha_{max}]$, $[\beta_{min}; \beta_{max}]$.

2. Методом подвійної дихотомії на відрізку обчислити значення параметрів, що варіюють, таким чином, щоб виконувалися рівняння (10) і (11), використовуючи для визначення кута δ і лівої частини рівняння (10) вищенаведений алгоритм.

Програмна реалізація моделі. Обчислення значень кутів α і β виконано за наведеним алгоритмом, що реалізований у вигляді прикладної програми, розробленої за допомогою програмної оболонки Delphi. Інтерфейс програми з даними тестового прикладу представлено на рисунку 2.

Тестовий приклад. Вихідні дані: h = 0,4м, a = 0,1м, γ = 0,025кг/м, d = 0,1 м, h_0 = 0,15 м, V_M = 0,14 м/с, ω = 0,556 рад/с, M_{tr} = 0,01Н·м, R_d = 0,5м, L_1 = 0,02м, δ_0 = 0,15 рад.

За параметри, що варіюють, обрано кути α, β з інтервалами варіювання $\alpha \in [-0,1;0,75]$, $\beta \in [0;0,75]$.

Інтерфейс програми з даними тестового прикладу наведений на рисунку 2.

Висновки

1. Перевірка виконання умов (10) і (11) у тестовому прикладі показала, що знайдені значення кутів α і β, що характеризують положення підщепи при затисканні і у момент її вивільнення із захоплювача, забезпечують своєчасний підпір підщепи ґрунтом та рівність значення найменшого кута відхилення від вертикалі в третій фазі значенню компенсуючого кута δ_0, при цьому модель забезпечила вирішення задачі на задовільнення умов.

2. Дана модель може забезпечити отримання значення будь-яких двох параметрів з множини кінематичних і геометричних параметрів садильного апарату таким чином, щоб виконувалися умови (10) і (11) (при прийнятому куті δ_0, який компенсується заключними операціями – загортанням і прикочуванням).

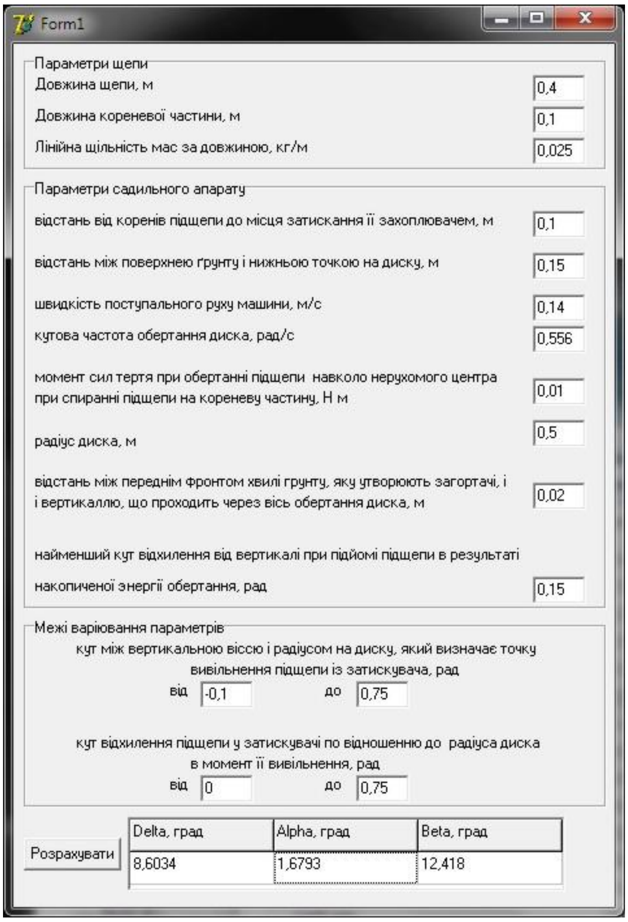


Рис. 2. Інтерфейс програми з даними тестового прикладу (результати обчислень: δ = 8,6 град, α = 1,7 град, β = 12,4 град).

3. Модель можна використовувати з метою багатокритеріальної оптимізації кінематичних і геометричних параметрів, де за критерії можуть бути прийняті:

– мінімізація швидкості переміщення підщепи з метою зниження її травмування;
– мінімізація відстані між вертикальною віссю диска і загортачами;
– мінімізація радіуса диска.

4. Для застосування моделі з метою сумісної оптимізації параметрів необхідно визначити значення моменту сил тертя M_{tr} при обертанні підщепи у третій фазі, координати фронту хвилі від поєднаної дії загортачів L_1 та значення компенсуючого кута δ_0.

Література.

1. Выращивание плодовых саженцев в южной степи Украины: кол. монограф. /[*Сенин В.И., Рульев В.А., Расторгуев А.Б. и др.*]; под ред. Сенина В.И.. – Мелитополь.: Изд-во «Мелитополь» – 2005.– 70 с.
2. Галузева програма розвитку садівництва України на період до 2025року./ Наказ м-ва аграр. політики України від 28.08.08. – К., 2008.-76 с.

3. *Калиткин Н. Н.* Численные методы / *Н. Н. Калиткин*. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
4. *Саньков С.М.* Обоснование параметров рабочих органов секции машины для посадки зимних прививок плодовых культур: дис. канд. техн. наук: 05.20.01./ *Саньков Сергей Михайлович*. – Мелітополь, 1995. – 185 с.
5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики / *Д.В. Сивухин* . – М.: Наука, 1979. – Т. I: Механика. – 520 с.
6. *Степанов В. В.* Курс дифференциальных уравнений / *В. В.Степанов*. – М.:Физматгиз,1959. – 468с.
7. *Ткаченко А.И.* К аналитическому обоснованию технологического процесса посадки растений рассадопосадочным агрегатом / *А.И. Ткаченко, И.А. Ткаченко* // Улучшение использования машинно-тракторного парка и фермерского оборудования: Труды Кубанского СХИ / Кубанский СХИ. – Краснодар, 1980. – Вып. 185. – С.47-54.
8. *Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т.2 / *Г.М.Фихтенгольц.*_ – М.: Наука, 1966. – 800с.
9. *Чубарин М.И.* Рассадопосадочные машины / *М.И. Чубарин*. – М.: Машиностроение, 1972. – 209с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ ПОДВОЕВ ПЛОДОВЫХ КУЛЬТУР АППАРАТОМ ДИСКОВОГО ТИПА

Караев А.И., Чижиков И.А.

Аннотация **- предложена математическая модель оптимизации параметров рабочих органов посадочного аппарата дискового типа, который входит в состав секции машины для посадки подвоев плодовых культур.**

MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS OF PLANTING OF ROOTSTOCKS OF FRUIT CROPS BY THE DISK- TYPE DEVICE

A. Karaev, I. Chizikov

Summary

For optimization of working tools of section of planting machine, the mathematical model has been proposed. In addition, algorithm of definition of parameters of the disk-type planting device has been devised.

УДК 621.86(075.8)

АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ СХЕМ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Крилов В. В., к.т.н.,
Дереза О.О., к.т.н.
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-24-36

***Анотація* – робота присвячена теоретичному визначенню рівнянь руху одномасових, двомасових, тримасових систем.**

***Ключові слова* – пружна ланка, рушійна сила, максимальне навантаження, зовнішній опір.**

Постановка проблеми. Досить важливою умовою розвитку сільського господарства є комплексна механізація виробничих процесів. Оволодіння науковими методами проектування технічного оснащення технологій виробництва продукції, які включають розробку прогресивних технологічних процесів, обґрунтування раціональних комплектів машин та обладнання є запорукою підвищення конкурентноздатності машин в ринкових умовах господарювання.

Аналіз останніх досліджень. У розрахунках при проектуванні машин і механізмів, з метою підвищення роботоздатності та продуктивності, недостатньо враховуються динамічні навантаження, що виникають у процесі роботи, особливо це стосується підйомно-транспортних машин і механізмів [1].

Постановка завдання. З урахуванням вищенаведеного, було поставлено завдання вивчити рівняння руху одномасових, двохмасових, тримасових систем машин і механізмів. Під час аналізу цих систем обов‘язковим є розгляд впливу приведених мас.

Основна частина. Виконаємо порівняльний аналіз різних динамічних схем, що розглядаються під час розрахунку машин.

Розглянемо рівняння руху одномасових систем. Система, що складається з маси m і пружної ланки, що володіє жорсткістю з, приводиться в рух деякою рушійною силою ***K***. З другого боку, маса m випробовує зовнішній опір ***Q***. При цьому можуть бути два різновиди навантаження системи:

- перший - рушійна сила прикладається до пружної ланки, а зовнішній опір безпосередньо до маси ***m*** (рис. 1)

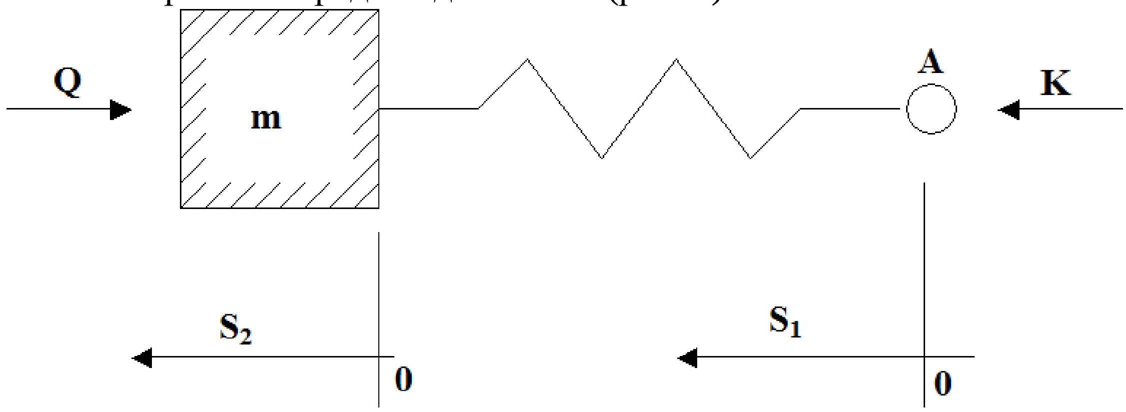


Рис. 1.

- другий - рушійна сила прикладається до маси m, а зовнішній опір до пружної ланки (рис. 2)

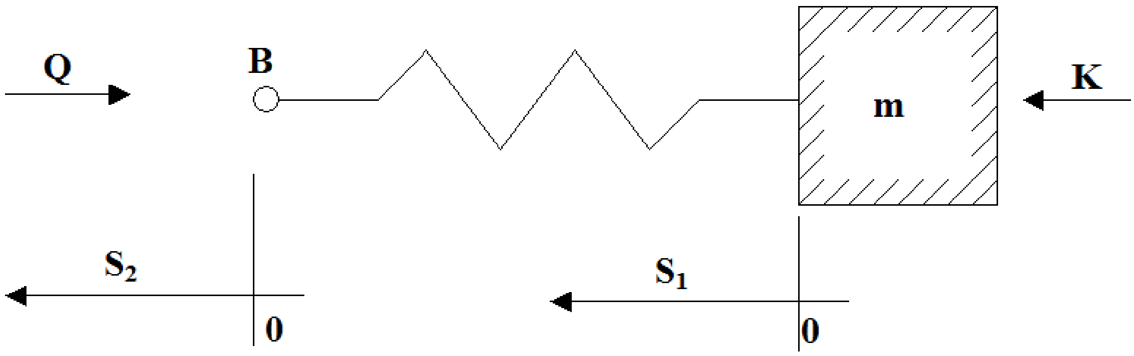


Рис. 2.

Для того, щоб вивести систему із стану спокою, очевидно, необхідно, щоб рушійна сила ***K*** була більше ***Q***. Позначивши прискорюючу (надлишкову) силу через ***P*** і рахуючи її постійною, можемо отримати вираз для прискорюючої сили у вигляді ***K = Q + P***. Перший етап при необмеженій дії прискорюючої сили, очевидно, буде відсутнім і почнеться відразу другий.

При постійній прискорюючій силі навантаження пружної ланки для даного випадку навантаження системи є постійним і рівним рушійній силі.

Нехай тепер рушійна сила змінна. При цьому зміна цієї сили буде здійснюватися так, що точка ***A*** буде весь час рухатися з постійною швидкістю.

Початку руху маси ***m*** повинна відповідати рівність - швидкість деформації пружної ланки у момент початку руху маси **m**, очевидно, буде рівна швидкості руху точки ***A*** тобто ***v***.

$$S_1 = vt,$$

де **v** - швидкість руху точки **A**, м/с.

Максимальне навантаження пружної ланки залежить від швидкості руху провідного кінця пружної ланки і жорсткості останнього

$$F_{max}=v\sqrt{mc}+Q.$$

Розглянемо тепер випадок навантаження системи (рис. 2).

Нехай рушійна сила постійна і рівна

$$K = Q + P,$$

де ***P*** - прискорююча надлишкова сила, Н.

Швидкість руху маси m в кінці першого етапу

$$V_\tau = \sqrt{\frac{Q(2P+Q)}{mc}},$$

де **τ** - час першого етапу, с.

На другому етапі деформація і навантаження пружної ланки рівні

$$S_1 - S_2 = \frac{Q}{c},$$

$$F = (S_1 - S_2)c = Q.$$

Ці величини постійні протягом всього другого етапу і відповідають величині зовнішнього опору. Розглянуті випадки навантаження найпростіших одномасових пружних систем характерні для роботи деяких механізмів машин.

На підставі отриманих висновків надалі при розгляді динаміки конкретних механізмів будуть прийматися способи рішення динамічних задач для складніших одномасових пружних систем.

Розглянемо рівняння руху двомасових систем. Нехай маси $\boldsymbol{m_1}$ і $\boldsymbol{m_2}$ з'єднані пружною ланкою, що має жорсткість с; на масу $\boldsymbol{m_1}$ діє деяка рушійна сила ***K***, а на масу $\boldsymbol{m_2}$ - сила ***Q***, що складає статичний (зовнішній) опір пересуванню маси $\boldsymbol{m_2}$ (рис.3).

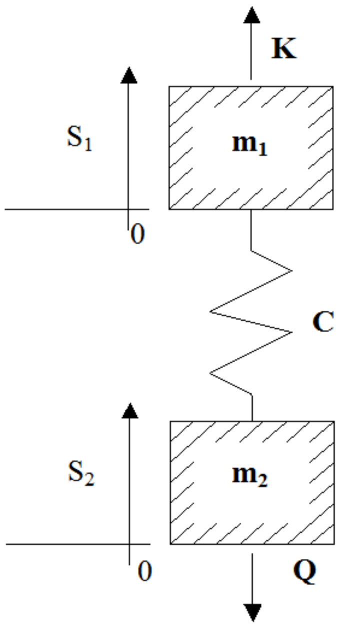


Рис. 3.

Система може бути приведена в рух лише у випадку, якщо рушійна сила $K > Q$. Розгін, а також гальмування механізму (якщо Q - сила ваги), здійснюється за рахунок різниці

$$K - Q.$$

Приймемо, що зміна надлишкової сили здійснюється у функції часу (для окремого випадку надлишкова сила буде прийнята постійною). Оскільки $K > Q$, можна записати

$$K = Q + f(t),$$

де ***f(t)*** - надлишкова сила, залежна від часу і діюча тільки під час несталого руху.

Для отримання виразу, що характеризує зміну деформації пружної ланки в часі, необхідно знати положення системи, при якому починається процес її динамічного навантаження (початкові умови) і характер зміни зовнішніх сил.

У момент додатку надмірної сили ***f(t)*** елементи механізму навантажені статичною силою, а швидкість навантаження рівна нулю.

Максимальне зусилля, сприйняте пружною ланкою, майже не залежить від характеру зміни зовнішньої сили, а визначається, головним чином, початковим значенням цієї сили.

Розглянемо навантаження двомасової системи за початкових умов, відмінних від вибраних раніше. Нехай в початковий момент, тобто у момент додатку рушійної сили, пружна ланка не навантажена. Тоді, очевидно, спочатку почне рухатися тільки маса m_1.

Маса m_2 почне рухатися тільки після навантаження пружної ланки до величини статичного навантаження Q. При цьому маса m_1 буде мати деяку швидкість. Таким чином, процес навантаження буде складатися з двох етапів: перший етап - від початку руху маси m_1 до початку руху маси m_2; другий етап - від початку руху маси m_2 до закінчення процесу несталого руху.

Швидкість v_τ в кінці першого етапу запишеться у вигляді

$$v_\tau = \sqrt{\frac{Q(2P + Q)}{m_1 \cdot c}}.$$

Для низькочастотних систем малого протягу рішення задач динаміки так само можна проводити, уявляючи дійсну схему механізму у вигляді дво- масових систем, з'єднаних пружною ланкою. Однак при цьому не можна вважати надлишкову силу постійною. Так само розглядається рух двомасової системи з врахуванням пускових характеристик двигуна.

Пусковий момент реостатного пуску двигуна змінюється від деякого значення M_{max} до моменту, відповідного перемиканню реостата на наступний ступінь, а швидкість при цьому безперервно зростає; після виключення останнього ступеня реостата момент на валу двигуна убуває до значення $\boldsymbol{M_c}$ і при цьому швидкість валу двигуна стає близькою до швидкості холостого ходу.

Величина рушійної сили двигуна на початку розгону (на першому пусковому ступені) можна записати в наступному вигляді

$$P_{\partial} = (Q + P)\left(1 - \frac{1}{V_0} \cdot \frac{ds_1}{dt}\right),$$

де $\mathbf{V_0}$ - приведена швидкість холостого ходу двигуна, м/с.

Отриманий вираз є зовнішнім навантаженням системи, діючим на зовнішню масу. Другим зовнішнім навантаженням, діючим на ведену масу, буде долане корисне навантаження $\boldsymbol{Q}$.

Стосовно механізмів підйомно-транспортних машин, можуть бути два види умов початку руху системи:

1. пуск двигуна здійснюється за наявності передпускового ступеня реостата;
2. пуск двигуна здійснюється без передпускового ступеня реостата.

В цьому випадку процес пуску розділяється на два етапи. В першому етапі відбувається деформація пружної ланки і рухається тільки маса $\boldsymbol{m_1}$; коли деформація пружної ланки досягає значення, відповідного $\boldsymbol{Q}$, наступить другий етап, при якому вже рухається вся система.

Максимальне навантаження $\boldsymbol{F_{max}}$ при різних виразах $\boldsymbol{f(t)}$ виявилося однаковим

$$F_{max} = \frac{2Pm_2}{m_1 + m_2} + Q\,.$$

Розглянемо рівняння руху тримасових систем. Нехай система складається з мас $\boldsymbol{m_1}$, $\boldsymbol{m_2}$ і $\boldsymbol{m_3}$, сполучених пружними ланками, що мають жорсткість $\boldsymbol{c_1}$ і $\boldsymbol{c_2}$. Нехай ведучою масою є середня маса $\boldsymbol{m_1}$, а веденими крайні маси $\boldsymbol{m_2}$, $\boldsymbol{m_3}$ (рис.4).

Зовнішніми навантаженнями ведених мас $\boldsymbol{m_2}$ і $\boldsymbol{m_3}$ є постійні сили $\boldsymbol{Q}$ і G. Нехай ці сили спрямовані в різні боки. Тоді для їх подолання потрібно буде прикласти до маси $\boldsymbol{m_1}$ різницю сил $\boldsymbol{Q}$ - $\boldsymbol{G}$. Для розгону системи необхідно прикласти до маси $\mathbf{m_1}$ прискорюючу силу $\boldsymbol{P}$.

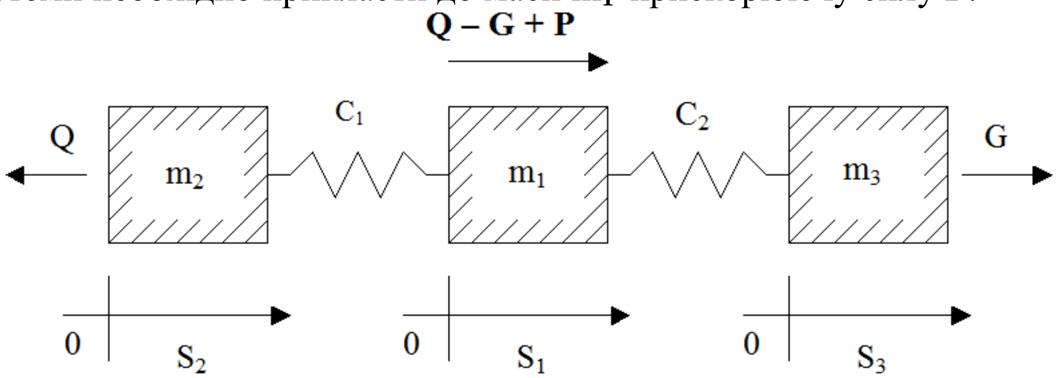


Рис. 4.

Якщо задача розв’язується для складних систем, то можна, згідно попереднього дослідження, вважати прискорюючу силу P постійною.

Для отримання виразів, що характеризують рух машин, надалі будемо застосовувати рівняння Лагранжа другого роду.

Шляхом ряду підстановок одержуємо одне з можливих максимальних значень навантаження пружної ланки, $\boldsymbol{F_1}$ рівне

$$F_{1\max} = \frac{2Pm_2}{m_1 + m_2 + m_3} + Q.$$

А навантаження пружної ланки $\boldsymbol{F_2}$ буде рівне

$$F_{2\max} = G.$$

Висновок. Деякі з отриманих результатів можуть безпосередньо бути використані для практичних розрахунків при проектуванні підйомно-транспортних машин і механізмів.

Література.

1. *Иванченко Ф.К.* Конструкция и расчет подъемно-транспортных машин: Учебник / *Ф.К. Иванченко*. – К.: Вища школа, 1983. – 351 с.
2. *Іванченко Ф.К.* Підйомно-транспортні машини: Підручник / *Ф.К. Іванченко*. – К., 1993. – 413 с.
3. *Вайнсон А.А.* Подъемно-транспортные машины: Учеб. / *А.А. Вайнсон* – М, 1989. – 431 с.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СХЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Крылов В.В., Дереза О.О.

***Аннотация* – работа посвящена теоретическому определению уравнений движения одно- , двух-, трехмассовых систем.**

AN ANALYSIS OF DYNAMIC CHARTS AT PLANNING LIFTING-TRANSPORT MACHINES AND MECHANISMS IN AGRICULTURAL PRODUCTION

V. Crilov, O. Dereza

Summary

Work is devoted to theoretical determination of evening of motion of one-, two- and three mass point systems.

УДК 631.363

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ РУХУ КУЛЬКИ У ПІДРЕШІТНОМУ ПРОСТОРІ ПРИ КАЛІБРУВАННІ КІСТОЧОК ПЛОДОВИХ КУЛЬТУР

Бондаренко Л.Ю., к.т.н.,
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел. (06192) 42-24-36
Кузьмінов В. В., м.н.с.
Інститут зрошуваного садівництва ім. М.Ф. Сидоренка НААН
Тел.: (06192) 42-24-36

***Анотація* - наведено результати перетворення пари швидкостей у при повному циклі руху кульки. Одержано залежності зміни швидкості руху кульки у просторі між решетом і відбивною поверхнею при калібруванні кісточок плодових культур.**

***Ключові слова* – кулькові очисники решіт, швидкість руху кульки, калібрування, матеріальна точка, кінетична енергія.**

Постановка проблеми. Протікання процесу сортування на решетах неможливе без очищення їх отворів від застряглих частинок. Найбільш розповсюдженими засобами очищення решіт є використання очисників із випадковим рухом робочих органів, який відрізняється тим, що вони розміщені вільно в системі решітного стану – гумові кульки. Основною перевагою їх застосування є простота конструкції і експлуатації та дешевизна виготовлення, оскільки робота установки для калібрування насіння плодових кісточкових культур, не вимагає великих питомих навантажень.

На рух кульок у підрешітному просторі впливає багато випадкових чинників: нестабільність режиму коливань решітного стану, похибки виготовлення елементів конструкції очисника, нерівномірність зносу. Тому положення цих робочих органів при роботі машини є непередбаченими. Але при калібруванні кісточок плодових культур потрібно шукати нові підходи до обґрунтування параметрів роботи кулькових очисників.

Аналіз останніх досліджень. Дослідженнями процесів забивання отворів та очищення їх від застряглого насіння за рахунок використання кулькових очисників займалися багато вчених, серед них треба відмітити роботи Файбушевича, Заїки, Рідного, Завгороднього [1-8]. У роботах наведених авторів вивчався вплив сил зчеплення насінини з крайками отворів на інтенсивність виштовхування її з отвору та процес очищення решіт шляхом удару гумової кульки безпосередньо по насінню, що заклинило. Треба зазначити також, що швидкість кульки розглядається тільки в момент удару об решето. При цьому всі існуючи етапи швидкості кульки не враховуються.

Формулювання цілей статті. Визначити залежності зміни швидкості руху кульки у просторі між решетом і відбивною поверхнею при обґрунтуванні параметрів кулькових очисників ударної дії.

Основна частина. Припустимо, що рух кульки між відбивною поверхнею та поверхнею решета еквівалентний руху матеріальної точки у підрешітному просторі. Також припустимо, що модуль швидкості кульки $\boldsymbol{v}$ безпосередньо перед ударом об решето є випадковою величиною з функцією розподілу $f(v)$, яка не залежить від часу, а усі можливі значення зміщення горизонтальної проекції кульки від центру прутка та фази коливання прутка в момент зіткнення з кулькою є рівноймовірними.

Один повний цикл руху кульки у просторі між решетом і відбивною поверхнею складається з 4-х етапів: удар об решето; вільне падіння в полі сил тяжіння; удар об поверхню прутка; підйом до решета. Після усталеного процесу руху кульок кожна з них при підльоті до решета має горизонтальну і вертикальну складові швидкості.

Розглянемо, як перетвориться пара швидкостей (горизонтальна і вертикальна складові) у результаті одного повного циклу.

Позначимо вектори швидкостей:

(v_{0x}, v_{0y}) – вектор швидкості безпосередньо перед ударом об решето на початку руху (у нерухомій системі відліку);

(u_{1x}, u_{1y}) – вектор швидкості в момент удару об решето;

(u_{2x}, u_{2y}) – вектор швидкості наприкінці падіння (у системі відліку решета);

(u_{3x}, u_{3y}) – вектор швидкості відразу після удару об пруток;

(v_{1x}, v_{1y}) – вектор швидкості при підльоті до решета (у нерухомій системі відліку).

Очевидно, що швидкість кульки на початку руху має такі складові

$$(v_{0x}, v_{0y}) = (v_0 \sin\alpha, v_0 \cos\alpha). \qquad (1)$$

При ударі об решето горизонтальна складова швидкості у середньому зберігається, вертикальна перетворюється як при частково пружному ударі

$$(u_{1x}, u_{1y}) = (v_{0x}, -k \cdot v_{0y}). \qquad (2)$$

При падінні зростає кінетична енергія вертикального руху. Нехай відхилення положення кульки по горизонталі від вертикальної лінії, що проходить крізь центр прутка у площині падіння дорівнює δ.

Тоді висота падіння дорівнюватиме (рис. 1)

$$h = CA = CB - AB = H - \frac{D}{2} - \sqrt{AO^2 - OB^2} = H - \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_0 + D}{2}\right)^2 - \delta^2} =$$
$$= H - \frac{D}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(d_0 + D)^2 - 4\delta^2}$$

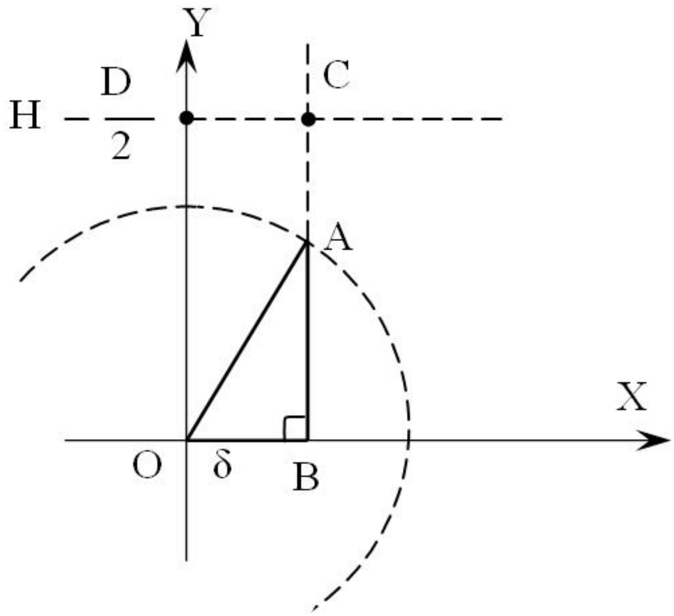


Рис. 1. Схема до визначення висоти падіння кульки.

Вертикальна складова швидкості зростатиме згідно рівняння

$$u_{2y}{}^2 = u_{1y}{}^2 + 2gh = u_{1y}{}^2 + g(2H - D - \sqrt{(d_0 + D)^2 - 4\delta^2}).$$

Для обчислення швидкостей після удару об пруток зручно перейти в систему відліку решета. В ній вертикальний складник залишається незмінним [9]. Зважаючи на те, що фаза коливання в момент удару кульки об пруток дорівнює τ в системі відліку решета, швидкість має такі складники

$$(u_{2x}, u_{2y}) = \Big(v_0 \sin\alpha - A\omega\cos\omega\tau,$$
$$-\sqrt{k^2 v_0^2 \cos^2\alpha + g\cdot\left(2H - D - \sqrt{(d_0 + D)^2 - 4\delta^2}\right)} \qquad (3)$$

Відразу після удару об пруток складова швидкості, що співпадає за напрямком з дотичною до перерізу прутка залишається незмінною, а складова, що співпадає за напрямком з нормаллю, перетворюється, як при частково пружному ударі.

Нехай до удару об поверхню швидкість дорівнювала w_0, після удару w_1, а кут падіння до удару φ, після удару ψ (рис. 2).

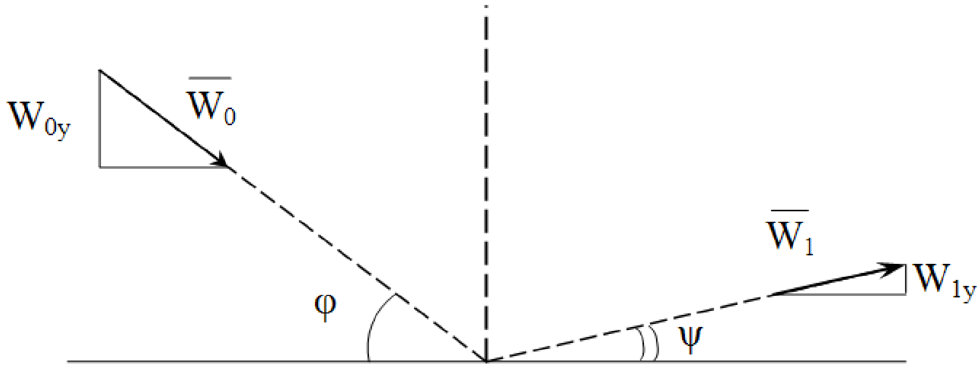


Рис. 2. Схема до визначення перетворення модуля та кута швидкості при пружному ударі.

Тоді:

$$\frac{-w_{1y}}{w_{0y}} = k \Rightarrow tg\psi = k \cdot tg\varphi\,,$$

$$w_1 = \sqrt{w_0^2 \cdot \cos^2\varphi + w_0^2 \cdot k^2 \cdot \sin^2\varphi} = w_0\sqrt{(1-k^2+k^2)\cdot\cos^2\varphi + k^2\cdot\sin^2\varphi} = \\ = w_0\sqrt{k^2+(1-k^2)\cdot\cos^2\varphi} \qquad (4)$$

Розглянемо схему складових швидкості кульки на третьому етапі циклу (рис. 3).

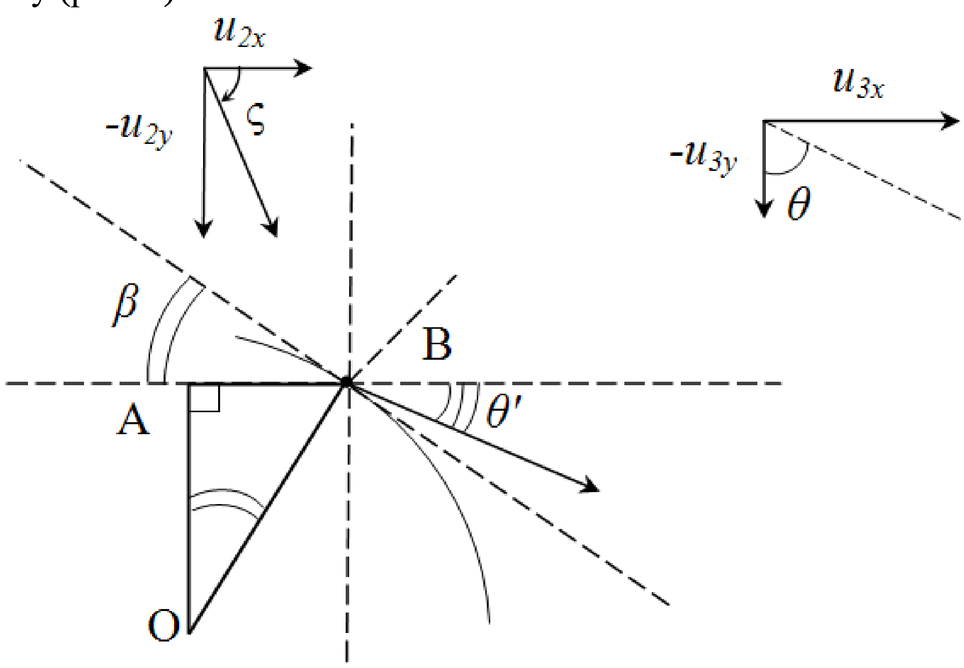


Рис. 3. Розрахункова схема складових швидкості кульки на третьому етапі циклу.

Звідки визначимо, що після удару об пруток швидкість дорівнюватиме

$$(u_{3x}, u_{3y}) = (|u_3| \cdot sin\theta, |u_3| \cdot cos\theta),$$

де β – кут між горизонталлю та дотичною до одного з кіл вертикального перерізу нижньої поверхні, що обмежує рух центру мас кульки;

ς – кут між напрямком швидкості кульки до удару об пруток та горизонталлю;

θ – кут між напрямком швидкості після удару об пруток та вертикаллю.

$$\beta = arcsin\frac{AB}{OA} = arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D}.$$

$$\varsigma = arctg\frac{u_{2y}}{u_{2x}}.$$

$$\theta = -\frac{\pi}{2} - \theta^{/}.$$

Якщо

$$\theta^{/} = -arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D} + arctg\left(k \cdot tg\left(-arctg\frac{u_{2y}}{u_{2x}} - arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D}\right)\right) =$$

$$= -arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D} - arctg\left(k \cdot tg\left(arctg\frac{u_{2y}}{u_{2x}} + arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D}\right)\right),$$

тоді

$$\theta = -\frac{\pi}{2} - \theta^{/} = -\frac{\pi}{2} + arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D} + arctg\left(k \cdot tg\left(arctg\frac{u_{2y}}{u_{2x}} + arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D}\right)\right) =$$

$$= arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D} - \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} - arctg\left(\frac{1}{k} tg\left(\frac{\pi}{2} - arctg\frac{u_{2y}}{u_{2x}} - arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D}\right)\right) =$$

$$= arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D} + arctg\left(\frac{1}{k} tg\left(arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D} - arctg\frac{u_{2x}}{u_{2y}}\right)\right). \quad (5)$$

Згідно з формулами (4) та (5), кут θ та модуль швидкості $|u_3|$ визначаються таким чином:

$$\theta = arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D} + arctg\left(\frac{1}{k} \cdot tg\left(arcsin\left(\frac{2\delta}{d_0 + D}\right) - arctg\left(\frac{u_{2x}}{u_{2y}}\right)\right)\right),$$

$$|u_3| = \sqrt{u_{2x}^{\,2} + u_{2y}^{\,2}} \cdot \sqrt{k^2 + (1 - k^2) \cdot sin^2\left(arcsin\frac{2\delta}{d_0 + D} - arctg\frac{u_{2x}}{u_{2y}}\right)}.$$

Швидкість при підйомі до решета (в нерухомій системі відліку) визначиться наступним чином:

$$(v_{1x}, v_{1y}) = \left(u_{3x} + A\omega\cos\omega\tau, \begin{cases} \sqrt{u_{3y}^2 - g(2H - D - \sqrt{(d_0 + D)^2 - 4\delta^2})}, \\ u_{3y} > \sqrt{g(2H - D - \sqrt{(d_0 + D)^2 - 4\delta^2})}; \\ 0, \quad u_{3y} \le \sqrt{g(2H - D - \sqrt{(d_0 + D)^2 - 4\delta^2})} \end{cases} \right).$$

Звідки маємо, що швидкість кульки після повного циклу задається стаціонарною функцією від параметрів (v_0, α, δ, τ)

$$v_1 = \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2} = F(v_0, \alpha, \delta, \tau). \qquad (6)$$

Висновки. Розподіл модуля швидкості кульки в момент зіткнення з решетом є стаціонарним. Розподіл кута швидкості кульки в момент зіткнення з решетом є нормальним Отримано залежності зміни швидкості кульки у підрешітному просторі, які відповідають кожному етапу руху кульки. Ці залежності дають змогу отримати рівняння щільності розподілу швидкості кульки при ударі об решето.

Література.

1. *Файбушевич Г.З.* Исследование забиваемости решет зерноочистительных машин / *Г.З. Файбушевич* //Механиз. и электриф. соц. с/х. – 1965. – №2. – С. 39.

2. *Файбушевич Г.З.* Очистка вибрационных решет / *Г.З. Файбушевич* // Техника в сельском хозяйстве. – 1964. – № 8. – С. 75-78.

3. Шариковая очистка решет, совершающих горизонтальные колебания / *П.М. Заика, В.Ф. Ридний, А.В. Миняйло, Н.В. Слоновский* // Динамические процессы и надежность машин; МИИСП. – М.; 1977. – Т.XIV.– Вып. 12. – С. 68-75.

4. К вопросу о забиваемости вибрационных зерноочистительных решет / *П.М. Заика, Н.В. Слоновский., В.Ф. Ридний, А.В. Миняйло* // Вісник сільськогосподарської науки. – 1969. – № 8. – С. 92-100.

5. *Заика П.М.* Периодический режим движения рабочего органа шарикового очистителя вибрационного решета / *П.М. Заика, В.Ф. Ридний, А.В. Миняйло* // Применение новейших математических методов и вычислительной техники в решении инженерных задач; МИИСП. – М., 1977. – Т.14, вып. 10. – С. 46-52 .

6. *Ридный В.Ф.* Определение параметров шариковых очистителей плоских решет, качающихся в горизонтальной плоскости / *В.Ф. Ридный* // Повышение эффективности и качества работы вибрационных семяочистительных машин; МИИСП. – М.; 1981. – С. 55-57.

7. *Ридный В.Ф.* Определение параметров шариковых очистителей плоских вибрационных решет / *В.Ф. Ридний, А.В. Миняйло* // Совершенствование рабочих органов сельскохозяйственных машин; МИИСП. – М., 1979. – С. 22-25.

8. *Завгородній О.І.* Наукові основи процесів очищення отворів решіт зерноочисних машин: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.05.11 / *О.І. Загородний*; Харків.держ. техн. ун-т сільського господарства. – Харків, 2001. – 37 с.
9. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики / *Д.В. Сивухин*. – 4-е изд. – М.: Физматлит, 2002. – Т. I. – 792 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ШАРИКА В ПОДРЕШЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ КАЛИБРОВАНИИ КОСТОЧЕК ПЛОДОВЫХ КУЛЬТУР

Бондаренко Л.Ю., Кузьминов В.В.

Аннотация **- приведены результаты преобразования пары скоростей в полном цикле движения шарика. Получены зависимости изменения скорости движения шарика в пространстве между решетом и отражательной поверхностью при калибровании косточек плодовых культур.**

THE DETERMINATION OF DEPENDENCES OF CHANGE RATES OF MOTION OF BALL WHEN CALIBRATE FRUIT-STONE CULTURE SEEDS

L. Bondarenko, V. Kuzminov

Summary

The results of transformation of pair of speeds in the complete loop of motion of ball are reducing. Dependences of change the rate of motion of ball in space between a bolters and reflecting surface at calibration of fruit-stone culture seeds are got.

УДК 631.354

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЧАСТИЦЫ ВОРОХА ПОСЛЕ СОУДАРЕНИЯ С ГРЕБЕНКОЙ

Шабанов Н.П., к.т.н.,
Овчаренко Ф.А., аспирант*
ЮФ НУБиП Украины «Крымский агротехнологический университет»
Тел. (06192) 5-47-88

***Аннотация* – установлена взаимосвязь между основными параметрами устройства для обмолота зернового сорго на корню и скоростью частицы вороха после соударения с гребенкой.**

***Ключевые слова* – обмолот на корню, очесывающий барабан, гребенка, скорость частицы вороха.**

Постановка проблемы. В технологическом процессе возделывания зернового сорго важную операцию уборки урожая перспективно выполнять его обмолотом на корню. Вследствие несогласованности конструктивных и кинематических параметров очесывающего устройства, обмолот зернового сорго на корню дает результат не соответствующий агротребованиям. С целью усовершенствования очесывающего устройства и повышения эффективности процесса обмолота зернового сорго на корню нужно обосновать его параметры.

Анализ последних исследований. Анализ литературных источников [1, 2, 3] показал, что в дальнейшем времени уборку зерновых культур будет выгодно выполнять способом обмолота растений на корню, который обеспечивает высокое качество сбора зерна и увеличение производительности уборочного агрегата на 30…50 %, со значительной экономией топлива и затрат труда. Однако в этих работах недостаточно полно раскрыты вопросы теоретического обоснования параметров устройства для обмолота зернового сорго на корню.

Формулировка целей статьи. Целью работы является установление взаимосвязи между основными параметрами устройства для обмолота зернового сорго на корню и скоростью частицы вороха после соударения с гребенкой.

Основная часть. Рассмотрим взаимодействие гребенки очесывающего барабана с частицами вороха (рис. 1).

---

* Научный руководитель – к.т.н., доц. Шабанов Н.П.

В результате удара поверхностью гребенки частицы вороха приобретают начальную скорость u, величину и направление которой требуется определить.

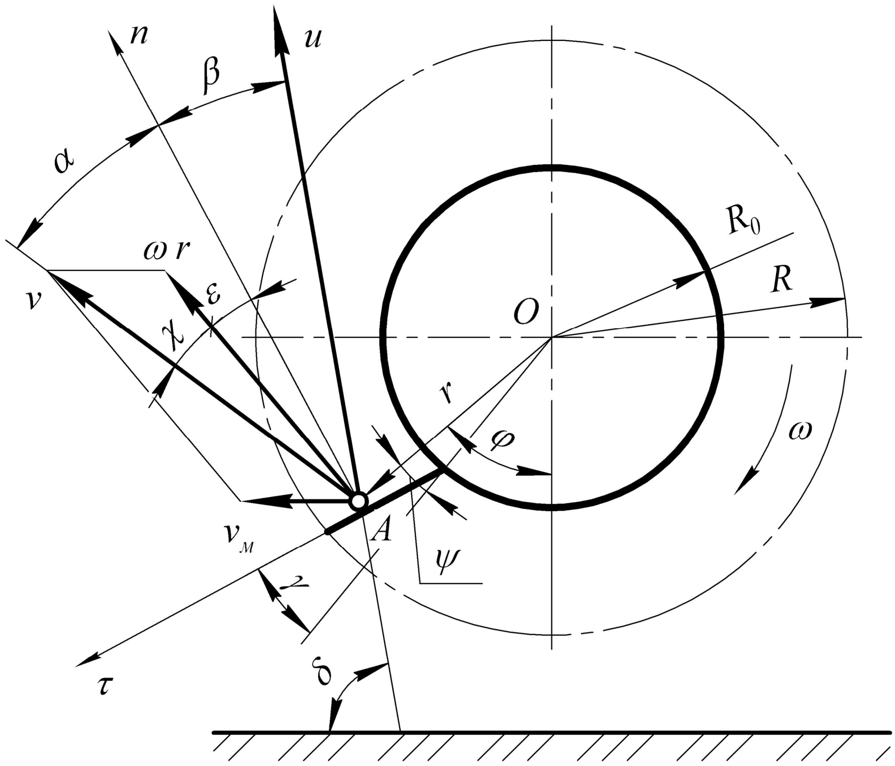


Рис. 1. Взаимодействие частицы с гребенкой.

Введем следующие допущения:
1. Представляем частицу вороха материальной точкой;
2. Начальная скорость частицы равна нулю;
3. Движение частицы происходит в плоскости вращения гребенки;
4. Воздушная среда не влияет на движение частицы.

Гребенка, движущаяся со скоростью v, ударяет о неподвижную частицу А. Используя теорему косинусов, можно записать

$$v = \sqrt{v_м^2 + \omega^2 r^2 - 2 v_м \omega r \cos(\pi - \varphi)}\,, \tag{1}$$

где $v_м$ – скорость машины, м/с;

ω – угловая скорость гребенки, рад/с;

r – расстояние от оси барабана до частицы, $r = AO$, м;

φ – угол отклонения от вертикали отрезка AO, рад.

Во время соударения гребенки с частицей возникают мгновенные силы, вызывающие внезапное изменение количества движения частицы [4, 5].

Скорость гребенки v в начале удара отклонена на некоторый угол α от нормали An к поверхности гребенки. Как видно из рис. 1

$$\alpha = \chi + \varepsilon\,, \tag{2}$$

где χ – угол между полной скоростью гребенки v и ее окружной скоростью ωr, рад;

ε – угол между нормалью An к поверхности гребенки и окружной скоростью гребенки ωr, рад.

Используя тригонометрические зависимости [6, 7] и систему компьютерной математики Mathematica 7 [8] для преобразований, запишем, что

$$\chi = \arccos\left(\frac{v_м \cos\varphi + \omega r}{\sqrt{v_м^2 + \omega^2 r^2 + 2 v_м \omega r \cos\varphi}}\right). \tag{3}$$

Определим угол между нормалью к поверхности гребенки и окружной скоростью гребенки

$$\varepsilon = \gamma - \psi , \tag{4}$$

где γ – угол наклона гребенки, рад;

ψ – угол между прямыми, пересекающимися в оси барабана (точка О), одна из которых проходит через основание гребенки, а другая через точку удара гребенки о частицу, рад.

Угол ψ найдем с помощью уравнения поверхности гребенки в полярных координатах [9]

$$r = \frac{R_0 \sin\gamma}{\sin(\gamma - \psi)}, \tag{5}$$

где R_0 – внутренний радиус барабана, м.

Откуда

$$\psi = \gamma - \arcsin\left(\frac{R_0 \sin\gamma}{r}\right). \tag{6}$$

Тогда с учетом (6) уравнение (4) примет вид

$$\varepsilon = \arcsin\left(\frac{R_0 \sin\gamma}{r}\right). \tag{7}$$

Подставив (3) и (7) в (2), получим

$$\alpha = \arccos\left(\frac{v_м \cos\varphi + \omega r}{\sqrt{v_м^2 + \omega^2 r^2 + 2 v_м \omega r \cos\varphi}}\right) + \arcsin\left(\frac{R_0 \sin\gamma}{r}\right). \tag{8}$$

Таким образом, выражениями (1) и (8) определены параметры системы частица-гребенка вначале удара.

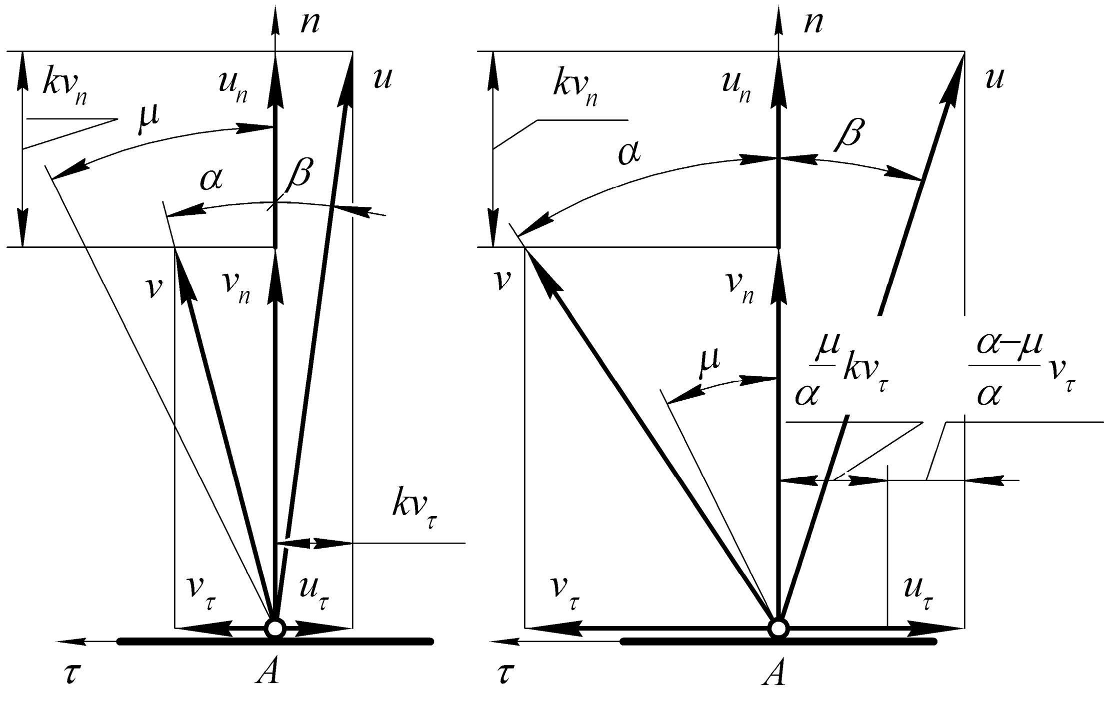
Вектор скорости гребенки v в момент начала удара образует угол α с нормалью An к поверхности гребенки, вектор скорости частицы u в момент конца удара образует с этой же нормалью угол β (рис. 1).

Обозначим проекции скоростей u и v на нормаль An и касательную $A\tau$ к поверхности гребенки соответственно через u_n, u_τ и v_n, v_τ.

Разделим процесс удара на два этапа [10]. В течение первого этапа совершается деформация частицы и гребенки. В течение второго этапа – частичное восстановление недеформированного состояния. В момент окончания первого этапа и начала второго частица и гребенка обладают одинаковыми скоростями, которые они имели бы в конце соответствующего неупругого удара. В конце второго этапа частица и гребенка имеют уже различные скорости u и v соответственно.

Вследствие действия сил мгновенного трения поверхность гребенки ограничивает возможные перемещения частицы, находящиеся в касательной к ней плоскости. Тогда мгновенная реакция поверхности будет смещена от нормали на угол мгновенного трения μ.

Рассмотрим два возможных варианта взаимодействия частицы с поверхностью гребенки: угол между вектором скорости v и нормалью α меньше или равен углу мгновенного трения μ и $\alpha > \mu$ (рис. 2).



$\alpha \le \mu$ $\alpha > \mu$

Рис. 2. Варианты взаимодействия частицы с поверхностью гребенки.

Проекция скорости на нормаль An

$$u_n = (1+k)v_n, \tag{9}$$

где k – коэффициент восстановления скорости частицы при ударе о поверхность гребенки.

При $\alpha \le \mu$ сил мгновенного трения достаточно для создания деформации поверхности гребенки и ограничения возможного перемещения частицы в касательной плоскости $A\tau$. При $\alpha > \mu$ силы мгновенного трения ограничивают возможные перемещения частицы лишь частично.

Тогда проекция скорости на касательную $A\tau$

$$u_\tau = \begin{cases} kv_\tau, \alpha \le \mu; \\ \dfrac{\mu}{\alpha} kv_\tau + \dfrac{\alpha - \mu}{\alpha} v_\tau, \alpha > \mu. \end{cases} \tag{10}$$

С учетом (9) и (10) скорость u запишется как

$$u = \begin{cases} \sqrt{(1+k)^2 v_n^2 + k^2 v_\tau^2}, \alpha \le \mu; \\ \sqrt{(1+k)^2 v_n^2 + \dfrac{(\alpha - (1-k)\mu)^2}{\alpha^2} v_\tau^2}, \alpha > \mu. \end{cases} \tag{11}$$

Угол между вектором u и нормалью An

$$\beta = \begin{cases} arctg\left(\dfrac{kv_\tau}{(1+k)v_n}\right), \alpha \le \mu; \\ arctg\left(\dfrac{(\alpha - (1-k)\mu)v_\tau}{\alpha(1+k)v_n}\right), \alpha > \mu. \end{cases} \tag{12}$$

Определим угол наклона к горизонту скорости u. Как видно из рисунка 1 $\delta = \varphi + \varepsilon + \beta$ или с учетом (7) и (12)

$$\delta = \beta = \begin{cases} \varphi + \arcsin\left(\dfrac{R_0 \sin\gamma}{r}\right) + arctg\left(\dfrac{kv_\tau}{(1+k)v_n}\right), \alpha \le \mu; \\ \varphi + \arcsin\left(\dfrac{R_0 \sin\gamma}{r}\right) + arctg\left(\dfrac{(\alpha - (1-k)\mu)v_\tau}{\alpha(1+k)v_n}\right), \alpha > \mu. \end{cases} \tag{13}$$

Выводы. Выражениями (11) и (13) определены величина скорости частицы и ее направление в конце удара. Полученные аналитические зависимости будут использованы в дальнейших теоретических исследованиях усовершенствованного очесывающего устройства для обмолота зернового сорго на корню.

Литература.

1. *Шабанов П.А.* Механико-технологические основы обмолота зерновых культур на корню: дис. д-ра тех. наук: 05.20.01 / *П. А. Шабанов* – Мелитополь: [б. в.], 1988г. – 291 с.

2. Отчет о научно-исследовательской работе лаборатории рисоуборочных машин / МИМСХ. – Мелитополь: МИМСХ, 1976 г. – 45с.

Исследования обмолота зернового сорго методом очеса его на корню. 1976 – 45 с.

3. *Шепель Н. А.* Сорго: практика / *Н. А. Шепель* – Волгоград, 1994г. – 448 с.

4. *Кильчевский Н.А.* Курс теоретической механики. – Т. 2 / *Н.А. Кильчевский*. – Т. 2. – М.: Наука, 1977. – 544 с.

5. *Воронков И.М.* Курс теоретической механики / *И.М. Воронков*. – М.: Наука, 1964. – 596 с.

6. *Выгодский М.Я.* Справочник по элементарной математике / *М.Я. Выгодский*. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 509 с.
7. *Воднев В.Т.* Основные математические формулы / *В.Т. Воднев, А.Ф. Наумович, Н.Ф. Наумович*. – Мн.: Выш. шк., 1988. – 269 с.
8. *Дьяконов В.* Mathematica 4: учебный курс / *В. Дьяконов*. – СПб: Питер, 2001. – 656 с.
9. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике / *М.Я. Выгодский*. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.
10. *Бать М.И.* Теоретическая механика в примерах и задачах. – Т. 2 / *М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон*. – Т. 2. – М.: Наука, 1966. – 664 с.

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЧАСТКИ ОБЕРЕМКА ПІСЛЯ ЗІТКНЕННЯ З ГРЕБІНКОЮ

Шабанов М.П., Овчаренко Ф.О.

Анотація **– встановлено взаємозв'язок між основними параметрами пристрою для обмолоту зернового сорго на корені і швидкістю частки оберемка після зіткнення з гребінкою.**

DEFINITION OF SPEED OF THE PARTICLE OF LOTS AFTER IMPACT WITH THE COMB

N. Shabanov, F. Ovcharenko

Summary

The interrelation between key parameters of the device for threshing grain sorghum on a root and speed of a particle of lots after impact with a comb is established.

УДК 621.316.1

РОЗРАХУНОК ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ВІД ЗАСТОСУВАННЯ КОНДЕНСАТОРНИХ УСТАНОВОК 0,4 КВ

Козирський В.В., д.т.н.,
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Тел.: (044) 527-87-29
Жоров С.В., інженер,
Жоров В.І. к.т.н.
Національний науковий центр ”Інститут механізації та електрифікації сільського господарства”
Тел.: (04571)-3-11-00

Анотація - розроблена методика розрахунку та визначені втрати енергії в електричній мережі в залежності від кількості ступенів регулювання потужності конденсаторних установок, що дозволяє більш обґрунтовано здійснювати вибір таких установок в кожному конкретному випадку.

Ключові слова **– втрати енергії, конденсаторна установка, обгрунтування уставок, звітні втрати електроенергії.**

Постановка проблеми. Найчастіше розрахунок втрат енергії в електричних мережах проводиться з застосуванням досить складних методик, більшість яких реалізується на електронних обчислювальних машинах (ЕОМ). Розрахунок же зниження втрат включає два цикли обчислень, в процесі яких спочатку віднаходяться втрати в некомпенсованій електричній мережі, потім – за умови застосування конденсаторних установок, після чого визначається різність отриманих значень, яку в кінці розрахунку подають в процентах від початкових втрат. Тобто, при розрахунку розміру зниження втрат трудомісткість обчислень подвоюється. Розрахунок можна значно полегшити, якщо зниження втрат спочатку визначити в процентах, а потім віднайти в кіловат-годинах шляхом використання початкових розрахункових або звітних втрат електроенергії. Але методика такого розрахунку ще недостатньо розроблена.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існують методики розрахунку втрат енергії в сільських електричних мережах [1,2], які на основі даних про активні опори елементів мережі, потоки активної та реактивної потужності на її ділянках, потужність конденсаторних установок дозволяють розрахувати на ЕОМ зниження втрат енергії від впровадження пристроїв для компенсації реактивної потужності споживачів. Але для ручних обчислень ці методики занадто складні.

Мета статті. Розробити спрощену методику розрахунку та визначити зниження втрат енергії в сільських електричних мережах в залежності від кількості ступенів регулювання потужності конденсаторних установок напругою 0,4 кВ.

Основні матеріали дослідження. Стосовно ділянки лінії електропередачі (ЛЕП) закон Джоуля-Ленца щодо втрат енергії на активних опорах має наступний вигляд

$$\Delta W_{зм.} = 3 \cdot r_0 \cdot l \cdot \int_{t_1}^{t_2} I^2(t) \cdot dt, \qquad (1)$$

де $\Delta W_{зм}$ – втрати енергії на нагрівання проводів ЛЕП, Вт·с;

r_0 – питомий активний опір проводів ЛЕП, Ом/км;

l – довжина ділянки ЛЕП, км;

t_1 та t_2 – початок та кінець відрізка поточного часу, за який визначаються втрати енергії, с;

$I(t)$ – залежність струму від поточного часу, А.

Для симетричних режимів струм подається через потужності відомим чином

$$I(t) = \frac{S(t)}{\sqrt{3} \cdot U_н} = \frac{\sqrt{P^2(t) + Q^2(t)}}{\sqrt{3} \cdot U_н}. \qquad (2)$$

З врахуванням (2) вираз (1) можна записати так

$$\Delta W_{зм.} = r_0 \cdot l \cdot \frac{1}{U_н^2} \cdot \left[\int_{t_1}^{t_2} P^2(t) \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} Q^2(t) \cdot dt \right]. \qquad (3)$$

Замінивши в (3) інтегральні суми арифметичними, отримаємо втрати енергії за добу у наступному вигляді

$$\Delta W_{зм.доб.} \cong \frac{r}{U_н^2} \left(\sum_{i=1}^{24} P_i^2 + \sum_{i=1}^{24} Q_i^2 \right), \qquad (4)$$

де $\Delta W_{зм\ доб}$ – втрати енергії на нагрівання проводів ЛЕП за добу, Вт·год;

r – активний опір однієї фази ділянки ЛЕП, Ом;

$U_н$ – номінальна лінійна напруга, кВ;

i – порядковий номер години доби;

P_i – середня активна потужність за *i*–ту годину доби; визначається з добового графіку активного навантаження, який будується за погодинно знятими показниками лічильника активної енергії, кВт;

Q_i – середня реактивна потужність за ту ж годину доби; визначається з добового графіку реактивного навантаження, який будується за показниками лічильника реактивної енергії, кВАр.

Причому, середня потужність визначається за формулою

$$P_i = \frac{W_{i+1} - W_i}{\Delta t} \cdot k_{m.c.} \;, \tag{5}$$

де W_{i+1} – показники лічильника на початку ($i+1$)- ї години доби, кВт·год;

W_i – те ж, на початку i–тої години доби, кВт·год;

Δt – крок дискретизації поточного часу, Δt = 1 год.;

$k_{m.c.}$ – коефіцієнт трансформації трансформаторів струму.

Користуючись погодинними коефіцієнтами навантажень [3], подамо вираз (4) у такому вигляді

$$\Delta W_{зм.доб.макс} \cong \frac{r \cdot P^2_{макс}}{U^2_н}\left(\sum_{i=1}^{24} k^2_{Pi} + \sum_{i=1}^{24} k^2_{Qi}\right), \tag{6}$$

або

$$\Delta W_{зм.доб.макс} \cong \frac{r \cdot P^2_{макс}}{U^2_н} \cdot \sum_{i=1}^{24} k^2_{Si} \;, \tag{7}$$

де $\Delta W_{зм\ доб\ макс}$ – добові втрати енергії за відсутності засобів для компенсації реактивних потужностей споживачів, Вт·год;

$P_{макс}$ – річний максимум активного навантаження, кВт;

k_{Pi}, k_{Qi}, k_{Si} – погодинні коефіцієнти активного, реактивного та повного навантаження, відповідно.

Для мережі з конденсаторною установкою вираз (6) має наступний вигляд

$$\Delta W_{зм.доб.} \cong \frac{r \cdot P^2_{макс}}{U^2_н} \cdot \left[\sum_{i=1}^{24} k^2_{Pi} + \sum_{i=1}^{24}\left(k_{Qi} - k_q \cdot n_i\right)^2\right], \tag{8}$$

де k_q – коефіцієнт потужності однієї секції конденсаторної установки,

$$k_q = \frac{Q_{мін.КУ}}{P^*_{макс}}, \tag{9}$$

$Q_{мін.КУ}$ – потужність однієї секції конденсаторної установки, %;

$P^*_{макс}$ – річний максимум активного навантаження, $P^*_{макс}$=100%;

n_i – кількість секцій конденсаторної установки, ввімкнених об i-тій годині доби, шт.

Потенційно можливий мінімум втрат електроенергії має місце при практично однакових реактивних потужностях ЛЕП та конденсаторів, тобто за умови (10)

$$k_{Qi} \cong k_q \cdot n_i \,. \tag{10}$$

З врахуванням (10), мінімум втрат віднаходиться з (8) у такому вигляді

$$\Delta W_{зм.доб.мін} \cong \frac{r \cdot P_{макс}^2}{U_н^2} \cdot \sum_{i=1}^{24} k_{Pi}^2 . \qquad (11)$$

Потенційно можливий максимум зниження втрат електроенергії від застосування конденсаторної установки визначається як різність правих частин виразів (6) та (11)

$$E_{макс} \cong \frac{r \cdot P_{макс}^2}{U_н^2} \cdot \sum_{i=1}^{24} k_{Qi}^2 , \qquad (12)$$

а реально досягнуте – як різність правих частин виразів (6) та (8)

$$E \cong \frac{r \cdot P_{макс}^2}{U_н^2} \cdot \left[\sum_{i=1}^{24} k_{Qi}^2 - \sum_{i=1}^{24} \left(k_{Qi} - k_q \cdot n_i \right)^2 \right], \qquad (13)$$

що по відношенню до втрат за відсутності компенсації (7) дорівнює:

$$E_{макс}^*,\% = \frac{\sum_{i=1}^{24} k_{Qi}^2}{\sum_{i=1}^{24} k_{Si}^2} \cdot 100 \qquad (14)$$

та

$$E^*,\% = \frac{\sum_{i=1}^{24} k_{Qi}^2 - \sum_{i=1}^{24} \left(k_{Qi} - k_q \cdot n_i \right)^2}{\sum_{i=1}^{24} k_{Si}^2} \cdot 100 . \qquad (15)$$

Ступінь використання потенційно можливого максимуму зниження втрат становить

$$\varepsilon,\% = \frac{E^*,\%}{E_{макс}^*,\%} \cdot 100 . \qquad (16)$$

Для ефективного використання конденсаторної установки і одночасно унеможливлення резонансних явищ в мережі, повинні виконуватись наступні умови:

$$k_{Qi} - k_q \cdot n_i = \min \qquad (17)$$

та

$$k_{Qi} \succ k_q \cdot n_i . \qquad (18)$$

Умови (17) та (18) враховуються під час вибору кількості ввімкнених секцій конденсаторної установки в ту чи іншу годину доби у відповідності із реактивною потужністю споживачів, а також в процесі розрахунків за виразом (13).

На основі представленої методики розраховане зниження змінних втрат електроенергії у трансформаторах 10/0,4 кВ та відгалуженнях від ЛЕП-10 кВ до цих трансформаторів, яке досягається від приєднання конденсаторних установок до шин 0,4 кВ сільських споживчих трансформаторних підстанцій (табл. 1). Розрахунки виконані для типових добових графіків змішаного та виробничого навантажень споживачів для варіантів застосування нерегульованої (УК–0,4) та регульованих ступеневим способом (УКМ58–0,4) конденсаторних установок [4].

Таблиця 1 – Розрахункові показники зниження змінних втрат енергії від застосування конденсаторних установок напругою 0,4 кВ в сільських електричних мережах

Тип установки	Потужність ступенів регулювання, % від $\boldsymbol{P_{макс}}$	Зниження втрат електроенергії $\boldsymbol{E}^*$, %, при навантаженні:				Ступінь зниження втрат ε, %
		змішаному		виробничому		
		зима	літо	зима	літо	
УК–1–0,4–20 УЗ	10	15,0	22,5	12,6	17,8	0,34–0,58
УКМ58–0,4–100–50 УЗ	25; 50	31,6	33,0	31,6	31,9	0,83–0,88
УКМ58–0,4–100–33 УЗ	17; 34; 51	34,3	34,5	34,5	34,9	0,90–0,96
УКМ58–0,4–100–25 УЗ	12,5; 25; 37,5; 50	34,1	37,0	34,5	36,7	0,94–0,96
УКМ58–0,4–100–20 УЗ	10; 20; 30; 40; 50	34,6	37,8	34,6	37,3	0,95–0,98

Як видно з табл. 1, застосування конденсаторних установок з двома ступенями регулювання потужності дозволяє майже в 2 рази знизити втрати енергії у порівнянні з нерегульованою установкою. Установки з трьома ступенями регулювання забезпечують зниження втрат енергії більш ніж на 34%, що становить не нижче 90% від потенційно можливого максимального зниження втрат.

Висновки. Розроблена методика розрахунку та визначений розмір зниження втрат енергії в обмотках трансформаторів 10/0,4 кВ та в проводах ЛЕП–10 кВ на підводах до цих трансформаторів, яке досягається в результаті встановлення на стороні 0,4 кВ трансформаторних підстанцій нерегульованих або регульованих конденсаторних установок. Віднайдено, що застосування нерегульованих конденсаторних установок дозволяє знизити втрати енергії на 12…15% в зимовий день та на 17…22% у літній, а регульованих двоступеневим способом – не менше ніж на 31% незалежно від пори року. Установки з трьома ступенями регулювання забезпечують зниження втрат енергії на 34 % на протязі року, а з чотирма та п'яттю ступенями – на 34% в зимовий день та на 37% у літній, що становить не нижче ніж 90% від потенційно можливого максимуму зниження втрат. Результати отримані за номінальної потужності нерегульованих установок 10% та 13% від річного максимуму активного навантаження та 50% цього максимуму для регульованих установок при однаковій потужності секційних модулів.

Література.
1. *Анисимов Л.П.* Расчет потерь энергии в сельских сетях 0,38 кВ / *Л.П. Анисимов, В.Г. Пекелис* // МЭСХ.- 1978.- № 2. – С. 22–23.
2. *Бебко В.Г.* Зниження втрат електроенергії у сільському господарстві / *В. Г. Бебко, С.Я. Меженний , В.Г Стафійчук, В.Ф. Юрчук .* Вид. 2-е, перероб. і доп. – К.: Урожай, 1987. – 128 с.
3. *Жоров В.І.* Вплив нерівномірності добових графіків навантаження на втрати енергії в електричних мережах / *В.І. Жоров* // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Вип. 9. Т. 2. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. –С. 154-160.
4. *Василега П.О.* Електропостачання: Навчальний посібник / *П.О. Василега.* – Суми: ВТД ”Університетська книга”, 2008. – 415 с.

РАСЧЕТ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК 0,4 КВ

Козырский В.В., Жоров С.В., Жоров В.И.

Аннотация **- разработана методика расчета и определены потери энергии в электрической сети в зависимости от количества ступеней регулирования мощности конденсаторных установок, что позволяет более обоснованно производить выбор таких установок в каждом конкретном случае.**

CALCULATION OF ENERGY LOSS ENHANCEMENT ON APPLICATION OF CAPACITOR INSTALLATIONS OF 0,4 KV

V. Kozyrskyi, S. Zhorov, V. Zhorov

Summary

Developed is a procedure for calculating energy loss in electrical networks subject to the quantity of stages of regulation of capacity of capacitor installations that allows more justified choosing of such installations in a specific case. Energy losses in electrical networks were calculated with the use of this procedure.

УДК 632.935.4

ПЕРЕДУМОВИ ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ ЛАЗЕРНОЇ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ СОНЯШНИКУ

Никифорова Л.Є., д.т.н.,
Сергєєв В.Ю., інженер,
Богатирьов Ю.О., інженер.
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-23-41

***Анотація* – в роботі приведені передумови вивчення технологічного режиму лазерної передпосівної обробки насіння методом планування повного факторного експерименту.**

***Ключові слова* - лазерний пристрій, соняшник, насіння, імпульсне опромінення, фактори, точки оптимуму.**

Постановка проблеми. Визначення технологічного режиму лазерної передпосівної обробки насіння соняшнику методом математичного планування експерименту другого порядку є достатньо перспективним напрямком. Від вибору факторів та рівнів їх варіювання залежить надалі значимість факторів. Може виявитися так, що важливий за значущості фактор за розрахунками може не робити ніякого впливу на процес, якщо рівні варіювання були визначені невірно. Це може привести до того, що побудована модель процесу буде неточно описувати технологічний режим.

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній день розроблені різноманітні плани повного-факторного експерименту. Великий вклад в розробку методики планування експерименту в дослідженнях сільськогосподарських процесів зробили С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин, Ф.Г. Гусейнов, О.С. Мамедяров [1, 2].

Мета дослідження. Обґрунтування передумови вивчення технологічного режиму лазерної передпосівної обробки насіння соняшнику методом планування експерименту.

Основна частина. Для проведення експерименту технологічного режиму лазерної передпосівної обробки насіння соняшнику, були обрані фактори та рівні їх варіювання (табл. 1).

З метою скорочення загального обсягу дослідів ставиться експеримент з відсіювання.

Таблиця 1 – Фактори та рівні їх варіювання

Фактор	Одиниця виміру	Рівні варіювання факторів				Позна-чення
		-1	0	+1	Δ_i	
Кількість днів від опромінення до початку визначення посівних якостей насіння	днів	3	9	15	6	X_1
Кількість імпульсів	тис. шт.	2	5	8	3	X_2
Щільність енергії	мВт/см^2	0,5	3,25	6	2,75	X_3

Матриця планування експерименту з відсіювання другого порядку базується на трьох факторах. Це дозволяє отримати лінійні рівняння регресії у загальному вигляді. Матриця планування експерименту має вигляд:

$$X := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 & 0 & 0 \\ 1 & -1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 & 0 \\ 1 & 0 & -1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 \\ 1 & 0 & 0 & -1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 95 & 95 \\ 85 & 87 \\ 84 & 86 \\ 80 & 79 \\ 91 & 93 \\ 84 & 86 \\ 89 & 89 \\ 82 & 79 \\ 81 & 80 \\ 92 & 94.2 \\ 82 & 81 \\ 80 & 79 \\ 81 & 80 \\ 82 & 83 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Модель другого порядку визначається за виразом

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{j,i=1}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n} b_{ii} x_i^2 \quad . \qquad (1)$$

Коефіцієнти регресії кожного фактору за проведеними дослідами розраховуються за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^{N} y_u}{N} \quad \text{або} \quad B = (X^T X)^{-1} X^T Y; \tag{2}$$

Помилка експерименту розраховується за формулою

$$s_{b_i}^2 = \frac{s_0^2}{\sum x_{iu}^2}; \tag{3}$$

де $S^2{}_0$ – помилка досліду.

$$s_0^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{k=1}^{N_0} (y_{0k} - \overline{y}_0)^2. \tag{4}$$

N_0 – кількість дослідів у центрі плану.

Для математичної моделі виду

$$y_i = B_0 + B_1 z_1 + B_2 z_2 + B_3 z_3 + B_{12} z_1 z_2 + B_{13} z_1 z_3 + \\ + B_{23} z_2 z_3 + B_{11} z_1{}^2 + B_{22} z_2{}^2 + B_{33} z_3{}^2 . \tag{5}$$

Визначаються дисперсії відтворюваності по критерію Кохрена:

$G_p = 0{,}251 < 0{,}499$ ($G_m(\alpha=0{,}05;1{,}25)$) на підставі яких можна сказати, що відтворюваність дослідів хороша.

По критерію Стьюдента визначаються коефіцієнти поліноміальної регресії.

По критерію Стьюдента $t_p = 1{,}746$. Таким чином, коефіцієнти B_3, B_{12}, B_{13} незначущі і в моделі не присутні.

Рівняння поверхні другого порядку має вигляд

$$y_i = 31{,}462 + 4{,}137 z_1 + 1{,}969_2 + 1{,}125_2 z_3 \\ + 23{,}505 z_1^2 + 19{,}237 z_2^2 + 19{,}914 z_3^2 . \tag{6}$$

Для визначення адекватності моделі, порівняємо критичне і розрахункове значення критерію Фішера

1,987 < 2,397.

Таким чином, отримана нелінійна модель, адекватна експериментальним даним, тобто її можна використовувати при побудові області оптимуму і визначення координат оптимуму.

Розкодована нелінійна модель має вигляд

$$y_i = 125{,}63 - 11{,}063 x_1 - 0{,}02 x_2 - 17{,}54 x_3 + \\ + 0{,}00021 x_2 x_3 + 0{,}653 x_1^2 + 0{,}000005 x_2^2 + 2{,}63 x_3^2 .$$

Розглянемо можливі двомірні значення, які мають найбільше практичне значення.

$$y_i = 125{,}63 - 11{,}063 x_1 - 0{,}02 x_2 - 17{,}54 x_3 + \\ + 0{,}00021 x_2 x_3 + 0{,}653 x_1^2 + 0{,}000005 x_2^2 + 2{,}63 x_3^2 .$$

Двомірний переріз поверхні відгуку, яка характеризує:

при x_1=0;

$$y_i = 125{,}63 - 0{,}02x_2 - 17{,}54x_3 + 0{,}00021x_2x_3 + 2{,}63x_3^2 + 0{,}000005x_2^2;$$

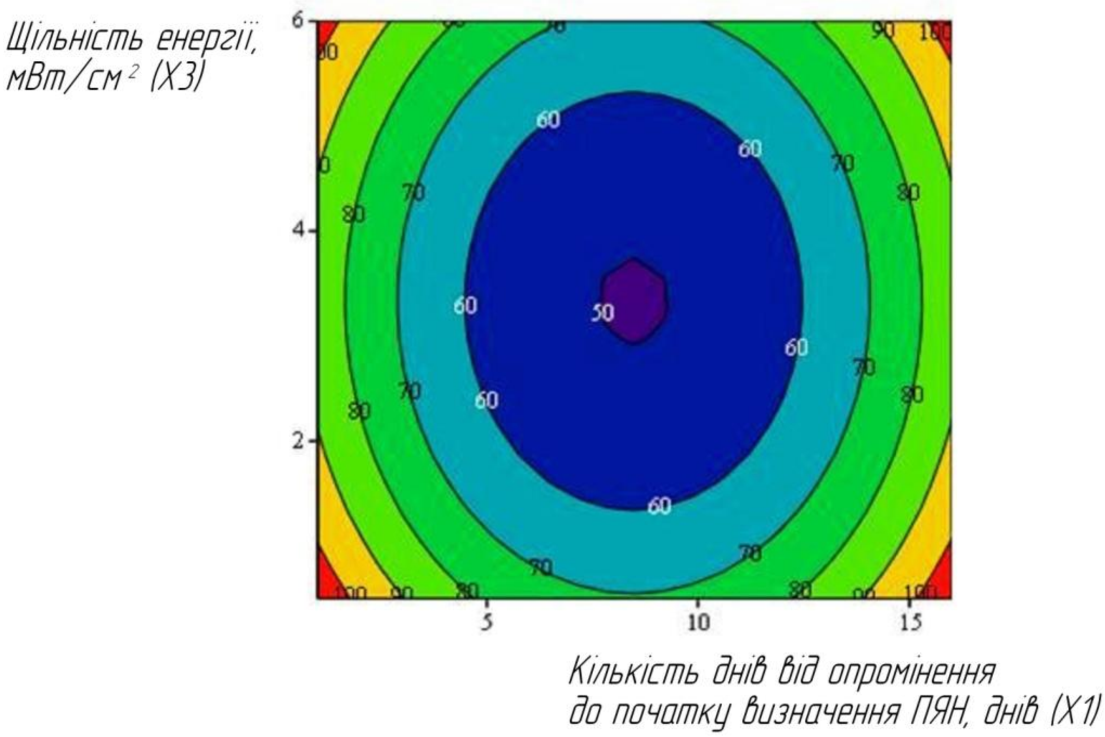


Рис. 1. Поверхня та лінії рівнів функції відгуку (x_1=0).

Двомірний переріз поверхні відгуку, яка характеризує відгук при x_2=0;

$$y_i = 125{,}63 - 11{,}063x_1 - 17{,}54x_3 + 2{,}63x_3^2 + 0{,}653x_1^2;$$

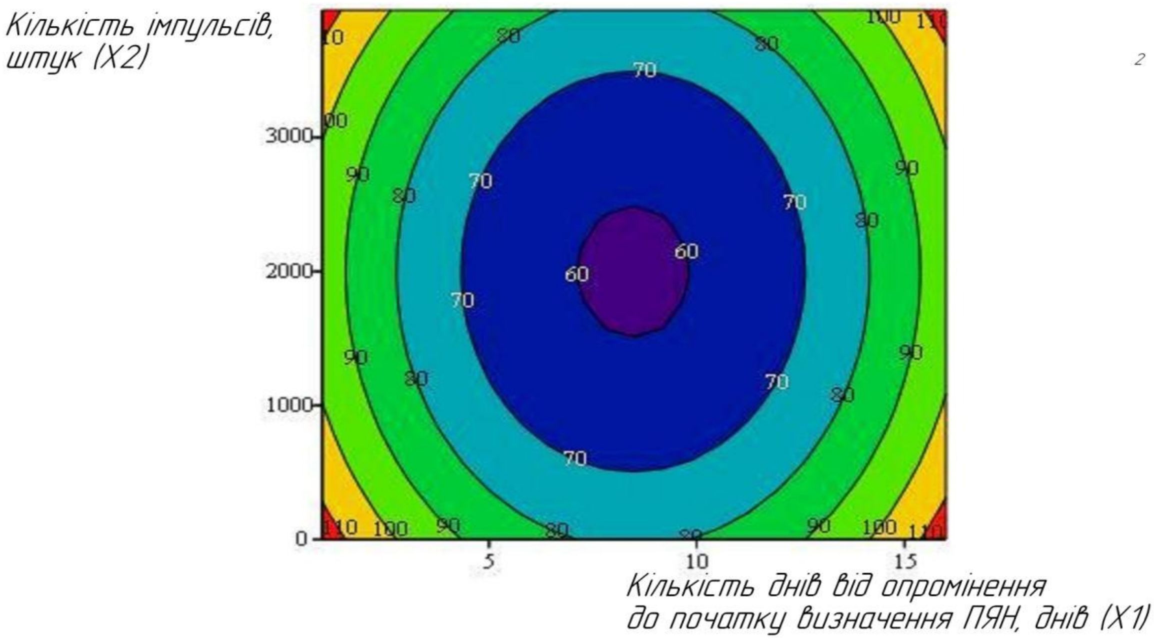


Рис. 2. Поверхня та лінії рівнів функції відгуку (х2=0).

Двомірний переріз поверхні відгуку, яка характеризує x_3=0;

$$y_i = 125{,}63 - 0{,}02x_2 - 11{,}063x_1 + 0{,}653x_1^2 + 0{,}000005x_2^2;$$

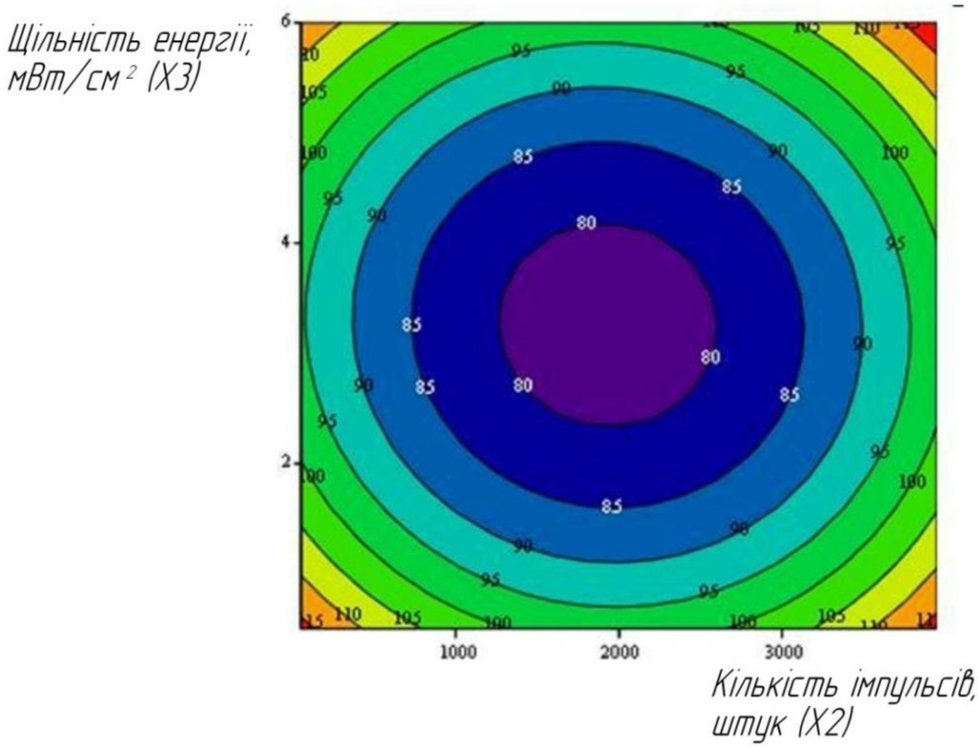


Рис. 3. Поверхня та лінії рівнів функції відгуку (х3=0).

Висновки:

1. З метою реалізації плану повного факторного експерименту визначені фактори та рівні їх варіювання та запропонована матриця планування експерименту із відсіювання.

2. Приведені рівняння моделі, що описують вплив факторів на критерій оптимізації у загальному вигляді, а це дозволить продовжити вивчення технологічного режиму лазерної передпосівної обробки насіння соняшнику.

В результаті проведення повного факторного експерименту, знайдені оптимальні значення: кількість днів від опромінення до початку визначення посівних якостей насіння (ПЯН) – 8,47 днів; кількість імпульсів – 1931 штук; щільність енергії – 3,25 мВт/см^2. Побудовано графіки, які дають змогу визначити залежність зміни ПЯН, від щільності енергії, кількості імпульсів та днів від опромінення до початку визначення ПЯН.

Література

1. *Мельников С.В.* Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процес сов / *С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин* // 2-е узд. Перераб. и доп. – Л. : Колос, 1980. - 168 с

2. Гусейнов Ф.Г. Планирование эксперимента в задачах элетроэнергетике / Ф.Г. Гусейнов, О.С. Мамедяров. – М. : Энергоиздат, 1988. - 151 с.

ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ПЕРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА

Никифорова Л.Е., Сергеев В.Ю., Богатирьов Ю.О.

Аннотация – в **работе приведены предпосылки изучения технологического режима лазерной передпосевной обработки семян подсолнечника методом планирования полного факторного эксперимента.**

BACKGROUND STUDY OF THE TECHNOLOGICAL MODE TREATMENT OF SUNFLOWER SEEDS BEFORE SOWING LASER

L. Nikiforova, V. Sergeev, Y. Bogatirov

Summary

The paper presents the background study of the technological mode laser processing of sunflower seeds before sowing by the method of planning a full factorial experiment.

УДК.621.317

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ЗМІН РІДИН ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЕНЕРГІЇ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ

Федюшко Ю. М., д.т.н.
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-11-52

Анотація **– теоретично досліджений тепловий режим ультразвукової генерації звуку в рідині, що встановлюється при тривалому впливі випромінювання. Виконано розрахунки й оцінки встановлення теплового режиму в умовах поверхневого збурювання.**

Ключові слова **– ультразвукова генерація звуку, рідина, ультразвукова хвиля, термооптичні джерела.**

Постановка проблеми. Створення звуку акустичним випромінюванням [1, 3], у тому числі й в умовах поверхневого збурювання, було досліджено в різних середовищах. Серед різних аспектів обговорюваного явища практично не вивченим залишається питання встановлення теплового режиму термооптичного джерела звуку.

Аналіз останніх досліджень. При значних енерговиділеннях в середовищі стає істотним зміна параметрів рідини (зокрема, коефіцієнта теплового об'ємного розширення) через її нагрівання за час дії ультразвукового імпульсу. При цьому не враховувалися процеси переносу тепла в рідині і вважалося, що нагрівання повністю визначається тепловиділенням [1, 3].

Такий підхід справедливий тільки при порівняно за короткий час впливу випромінювання, тому вивчення випадків тривалого впливу ультразвукового випромінювання [4], коли встановлюється тепловий режим, що визначається процесами теплопровідності й конвекції з врахуванням поверхневого збурювання є істотним.

Формування цілей статті (постановка завдання). Термооптична генерація звуку в рідині в умовах двовимірного випадкового збурювання поверхні в залежності середнього звукового тиску, середній інтенсивності й дисперсії флуктуації, генеруючих у рідині акустичних полів залежить від таких характеристик як середньоквадратична висота нерівностей, функція розподілу і радіус кореляції нерівностей на поверхні рідини. Теплофізичні параметри, які характеризують рідину, у процесі генерації звуку вважалися незмінними.

Досить очевидно, що в умовах, коли у встановленні теплового режиму стають істотними процеси теплопереносу, збурювання рідини буде одним з основних факторів у визначенні ефективності термооптичної генерації звуку. Оцінки доводять, що ці ефекти будуть помітні навіть при помірних потужностях ультразвукового випромінювання.

Основна частина. Для більшості рідин, коли час впливу великий, нагрів області поглинання збільшує ефективність генерації звуку. Для води, яка досліджувалася в експериментах, при температурах $\boldsymbol{T > 4\ ^{\circ}C}$, ріст ефективності генерації пов'язаний зі зростанням, внаслідок нагрівання, коефіцієнту теплового об'ємного розширення, який серед інших параметрів значно залежить від температури.

При температурі води 20 °C відносна зміна теплоємності рідини з ростом температури становить величину $8 \cdot 10^{5}$ град$^{-1}$, зміна швидкості звуку становить 10^{-3} град$^{-1}$, а зміна коефіцієнту об'ємного теплового розширення становить $4{,}9 \cdot 10^{-2}$ град$^{-1}$ [1].

Якщо поверхня рідини збурена, то в результаті викликаних збурюванням коливань області тепловиділення, а також кругових переміщень часток рідини об'єм області нагрівання збільшується. Це приводить до спаду температури рідини в місці дії ультразвукового випромінювання, а відповідно, зменшенню ефективності генерації звуку.

Розрахунки й оцінки встановлення теплового режиму генерації звуку виконані з урахуванням теплопровідності й конвекції, у тому числі в умовах поверхневого збурювання, причому сам процес встановлення температури вважався повільним, так що впливом теплової нелінійності за час порядку періоду звукової хвилі можна зневажити.

Розглядається наступна постановка завдання: ультразвуковий пучок з характерним радіусом $\boldsymbol{a}$, падає нормально до незбуреної поверхні рідини й поглинається в ній на характерній довжині $\boldsymbol{\mu^{-1}}$, де $\boldsymbol{\mu}$ – коефіцієнт поглинання ультразвукового випромінювання в рідині. Передбачається, що випромінювач працює в імпульсно-періодичному режимі, причому імпульси проходять із періодом $\boldsymbol{\tau_0}$, і кожний описується залежністю $\boldsymbol{f(t)}$ з характерною тривалістю $\boldsymbol{\tau_{імп} < \tau_0}$. Генерація звуку з урахуванням тимчасових змін параметрів рідини описується наступним рівнянням [2] для амплітуди тиску $\boldsymbol{p}$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{c^2}\frac{\partial p}{\partial t}\right) - \Delta p = \left(\alpha\rho\frac{\partial T}{\partial t}\right), \qquad (1)$$

де $\boldsymbol{c}$ - швидкість звуку,

$\boldsymbol{\alpha}$ - коефіцієнт теплового об'ємного розширення,

$\boldsymbol{\rho}$ - густина,

$\boldsymbol{T}$ - температура рідини.

Тут і далі передбачається, що зміни ентропії пов'язані тільки зі зміною температури. В даному випадку це справедливо при виконанні умови $\alpha^2 c^2 T (C_p)^{-1} << 1$, де C_p - питома теплоємність рідини.

Проведемо аналіз встановлення теплового режиму вважаючи, що збурювання відсутнє й тепловою конвекцією можна зневажити. Рівняння теплопровідності має вигляд

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \chi \Delta T = Q(x, y) e^{-\mu z} F(t), \qquad (2)$$

де розподіл тепловиділення в площині $\{x, y\}$ (χ - коефіцієнт теплопровідності), обумовлений розподілом інтенсивності ультразвукового випромінювання $T\{x, y\}$, заданим у вигляді

$$Q(x, y) = \mu I(x, y) = \mu I_0 \exp\left(-\left(x^2 + y^2\right)/a\right), \qquad (3)$$

де $F(t)$ - тимчасова залежність інтенсивності ультразвукового випромінювання, яку задаємо у формі

$$F(t) = \theta(t)\left(t \sum_{n=0}^{\infty} \left[f(t - n\tau_0) \right] \right), \qquad (4)$$

де $\theta(t)$ ступінчата функція Хевисайда.

Припустимо, що потоками тепла, пов'язаними з випарюванням рідини й теплопровідністю газу, що перебуває над її поверхнею, можна зневажити. Випарювання може бути досить істотним при $\mu\alpha >> 1$, таким чином, рішення рівняння при зроблених припущеннях має вигляд

$$T = \frac{I_0}{\mu x} \int_0^{(\chi t)^{1/2}} d\xi \, \frac{\xi \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\beta(\xi) a^2} + \xi^2 \right]_z}{\beta(\xi)} \cdot$$

$$\left\{ e^{-\mu z} \cdot erfc\left(\xi - \frac{\mu z}{2\xi} \right) + e^{\mu z} erfc\left(\xi + \frac{\mu z}{2\xi} \right) \right\} F\left(t - \frac{\xi}{\chi \mu^2} \right), \qquad (5)$$

$$\text{де } \beta(\xi) = \left[1 + (2\xi / \mu a)^2 \right], \chi = \chi / \rho C_p .$$

У центрі зони опромінення на поверхні рідини для стаціонарного, усередненого по періоду τ_0, збільшення температури ($t \to \infty$) знаходимо

$$T_0 = \frac{2 I_0}{\mu \chi} \int_0^{\infty} d\xi \xi e^{\xi^2} erfc \xi / \beta(\xi) . \qquad (6)$$

При $\mu\alpha << 1$ слідує

$$T_0 \approx \frac{2 \mu a^2}{4 \chi} \left[\gamma_1 + \gamma_2 \ln \frac{1}{\mu a} \right], \qquad (7)$$

де γ_1, γ_2 - чисельні коефіцієнти порядку 1.

Якщо $(\mu\alpha/2)^2 >> 1$, то з (6) неважко знайти

$$T_0 = \sqrt{\pi a I_0 / 2\chi} = \frac{P}{2\sqrt{\pi a \chi}}\,, \tag{8}$$

де $P_0 = \left[\pi a^2 I_0 \int_0^\infty f(dt)\right] / \tau_0$ - середня потужність ультразвукового випромінювання.

Оцінимо нагрівання рідини з урахуванням теплової конвекції при наявності збурювання. Припустимо, що в області, по якій поширюється тепло з урахуванням кругового руху часток рідини за рахунок поверхневої хвилі, у результаті теплообміну встановлюється деякий усереднений розподіл температури. Причому градієнти температури визначаються відношенням нагрівання до розмірів цієї області. Вважаємо також, що тепло, яке виноситься тепловою конвекцією, зовсім не потрапляє назад у розглянуту область. Збільшення температури в ній визначається балансом поглинаючої потужності ультразвукового випромінювання й вихідного з нього потоку тепла. На підставі цього маємо такі рівняння

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = P - \chi\left(\mu + \frac{1}{a}\right)(S_0 + S_1 + S_2)\overline{T} - \rho C_p \overline{T} \vartheta S_3\,, \tag{9}$$

де $V = \pi a^2 \mu^{-1} + (S_1 + S_2)a$ - об'єм області.

Площа поверхні розглянутої області складається із трьох складових, кожна з яких у певних випадках може превалювати:

- $S_0 = \pi a(2\mu^{-1} + a)$ - відповідає відсутності збурювання;
- $S_1 = 2\pi\delta a/\mu$ - відповідає змінам нахилу в області зони опромінення ($\delta = 2(n - 1)h / n\Lambda\mu a$, ***n*** - показник переломлення світла в рідині; ***h*** й ***Λ***- відповідно висота й довжина поверхневих хвиль);
- $S_2 = (h\Lambda/\pi)/(1+\mu\Lambda/2\pi)$ - обумовлена круговим рухом рідини в поверхневій хвилі;
- $S_3 = a[\pi a + 2h + 2\pi a\delta]$ - площа горизонтального перерізу розглянутої області, ***υ*** - характерне значення швидкості теплової конвекції.

Якщо характерний час встановлення конвективного руху

$$\tau_v = \rho V\left[\eta(\mu + a)^{-1}(S_0 + S_1 + S_2)\right] \tag{10}$$

малий у порівнянні із часом встановлення теплового режиму, то можна скористатися стаціонарним рівнянням балансу піднімальної сили й сили в'язкості, що має вигляд

$$\alpha \rho g V \overline{T} - \eta\left(\mu + \frac{1}{a}\right)\vartheta(S_0 + S_1 + S_2) = 0\,, \tag{11}$$

де η - динамічна в'язкість рідини;

g - прискорення вільного падіння.

З (9) і (11) знаходимо тимчасову залежність зміни температури

$$\overline{T} = \frac{P \cdot th\left(\frac{t}{\tau}\right)}{\rho C_p V \tau^{-1} + \tau_1^{-1} th\left(\frac{t}{\tau}\right)}, \tag{12}$$

де характерний час встановлення температури **τ,** визначається співвідношеннями:

- $\tau = (\tau_1^{-2} + \tau_2^{-2})^{-1/2}$;
- $\tau_1 = 2V/[\chi(\mu + \alpha^{-1)}\ ((S_0, + S_1 + S_2)]$;
- $\tau_2 = [2V\eta(\mu + \alpha^{-1)}\ (S_0, + S_1 + S_2)/P\alpha g_3]$,

де **τ_1, τ_2** - час встановлення нагрівів, зумовлених відповідно теплопровідністю й тепловою конвекцією.

Генерацію звуку із частотою ***Ω***, що описується рівнянням (1), при ***τ_1, τ_2, τ_3 >>($2\pi/\Omega$)*** можна вважати, що температуропровідність і конвекція не позначаться за період звукової хвилі, тоді на підставі (2) можемо записати

$$\alpha\rho g \partial T/\partial t \approx \alpha(\overline{T})\ [Q / C_p(\overline{T})]\ e^{-\mu z}\ F(t). \tag{13}$$

При збудженні акустичних полів періодичною послідовністю ультразвукових імпульсів, в рідині виникають звукові коливання, що володіють дискретним спектром зі складовими на частотах, кратними частоті повторення імпульсів [3].

Просторовий розподіл амплітуди збуджених акустичних полів у воді на частотах окремих гармонік акустичного спектра (40, 60, 80 й 100 кГц), був обумовлений частотним діапазоном приймальної апаратури. При поверхневому хвилюванні реєструється падіння амплітуди збудженого звуку для різних гармонік в 1,5-2 рази у порівнянні з випадком гладкої поверхні. Для високочастотного компонента на частоті 100 кГц розрахунок проводився по формулі (6), а для акустичного поля із частотою 40 кГц в області реєстрації достатньо чітко виконувалася умова віддаленої хвильової зони, а розрахунок проводився по відповідному виразу.

Видно, що у випадку схвильованої поверхні акустичний тиск зменшується, для 40 кГц в 1,5 рази, а для 100 кГц - в 2,1 рази, що задовольняє розроблену теоретичну модель.

Спад тиску припиняється, коли температура стабілізується. Виміряний характерний час, за який відбувається спад тиску, становить 4с за рівнем 1/е. Час, що характеризує цей процес становить біля 2 хв., обумовлено це насамперед, повільним загасанням поверхневих хвиль

Висновки. Результати проведених теоретичних досліджень свідчать про значний вплив нагрівання рідини й змін теплового режиму, викликаних збурюванням поверхні, на генеруючі термооптичним методом акустичні поля. Запропонована модель дозволяє оцінити цей вплив у рамках використання розвинених теоретичних розробок.

Література.
1. *Bozhkov A. I.* Thermo-optical Methods of Sound Excitation in a Liquid / *A. I. Bozhkov, F. V. Bunkin, Al. A. Kolomenskii, V. G. Mikhalevich* // Soviet Scientific Reviews, A. Physics Reviews, 1979, - P. 459-553.
2. *Божков А. И.* Генерация звука в жидкости при поглощении в ней лазерного излучения с модулированной интенсивностью / *А. И. Божков, Ф. В. Бункин* // Квантовая электроника, 1976. - Т. 3, № 7. - С. 144-150.
3. *Касоев С. Г.* Генерация звука лазерным излучением в жидком полупространстве с двумя типами неровностей границы / *С. Г. Касоев, М. Г. Лисовская, Л. М. Лямшев, Л. В. Седов* // Акуст. журн., 1979, Т. 25, № 3. - С. 401-407.
4. *Кикоин И. К.* Таблицы физических величин / Под ред. *И. К. Кикоина* / Справочник. - М.: Атомиздат, 1976. - 269 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭНЕРГИИ УПРУГИХ ВОЛН

Федюшко Ю.М.

Аннотация **– теоретически исследован тепловой режим ультразвуковой генерации звука в жидкости, который устанавливается при длительном влиянии излучения. Выполнены расчеты и оценки установления теплового режима в условиях поверхностного возмущения.**

RESEARCH OF SUPERFICIAL CHANGES OF LIQUIDS AT USE OF ENERGY OF RESILIENT WAVES

Y. Fediushko

Summary

In theory the thermal mode of ultrasonic generation of sound is probed in a liquid which is set at the protracted influencing of radiation. Calculations and estimations of establishment of the thermal mode are executed in the conditions of superficial indignation.

УДК631.371:612.317

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СТАН БІООБ`ЄКТІВ

Мунтян В.О., д.т.н.,
Лисенко О.В., к.т.н.,
Коваль Д.М., інженер
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-11-74, 42-23-41

***Анотація* – розглянуто взаємодію низькоенергетичного електромагнітного опромінювання з біологічними об’єктами та на основі теоретичних досліджень отримані залежності вірогідності утворення вільних радикальних пар в насінні гороху від часу дії зовнішнього електромагнітного випромінювання.**

***Ключові слова* – діелектрична проникність, низькоенергетичне електромагнітне випромінювання, біологічні тканини, іонізація, вільні радикальні пари.**

Постановка проблеми. Економічна стабільність України залежить від кількості і якості продукції в промисловому і сільському господарстві. Кризовий стан в сільськогосподарському виробництві вимагає невідкладних заходів, пов’язаних із створенням нових електротехнологій на основі обробки біооб’єктів і інформаційними електромагнітними полями (ЕМП), з метою стимулювання їх продуктивності. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування спеціальних автоматизованих систем радіохвильового контролю для оцінки стану біооб’єктів, що знаходяться під впливом ЕМП. Полегшення оцінки механізмів біологічної дії інформаційних ЕМП можливе на основі методу діелектричної радіоспектроскопії. Оскільки в даний момент відсутні теоретичні основи для розробки методів і засобів радіохвильового неруйнівного контролю біооб’єктів при їх взаємодії з низькоенергетичними ЕМП, необхідно провести теоретичний аналіз впливу низькоенергетичного ЕМП на біооб’єкти на основі квантової теорії і визначити діапазон зміни діелектричної проникності (ДП) [1].

Аналіз останніх досліджень. Найбільшого поширення набули надвисокочастотні (НВЧ) методи з діапазоном довжини хвиль від 1 до 100 мм [1, 2]. Використання радіохвиль дає можливість застосування особливостей низькоенергетичних (інформаційних) радіохвиль. Першим і основним завданням у області радіохвильового контролю складу і властивостей речовин є вимірювання діелектричної проникності. Більшість досліджень пов’язана з вимірюванням абсолютних значень діелектричної проникності матеріалів та полярних рідин і майже не розглянуті методи і системи вимірювань ДП біооб’єктів сільського господарства. Вимірювання змін ДП біооб’єктів під час їх взаємодії із різними фізичними факторами пов’язані із певними труднощами.

Мета публікації. Метою є проведення теоретичних досліджень взаємодії низькоенергетичного ЕМП з біологічними об’єктами сільського господарства з отриманням графічних залежностей.

Основна частина. В процесі низькоенергетичного електромагнітного опромінювання біологічних тканин відбувається іонізація молекул речовини і утворення радикальних пар. Таким чином, зовнішні низькоенергетичні електромагнітні поля роблять вплив на молекулярну структуру біологічних речовин, а, отже, і на електрофізичні їх характеристики - такі, як дійсна і уявна частина діелектричної проникності. Природно, що дані зміни спричинятимуть зміни характеристик досліджуваного об'єкту. У разі додавання зовнішнього електромагнітного поля відбувається дипольно-релаксаційна поляризація.

У ізотропних діелектриків будь-якого типу дійсна частина відносної діелектричної проникності середовища ε' має вигляд

$$\varepsilon' = 1 + \chi = 1 + N\beta, \tag{1}$$

де N – число молекул в одиниці об'єму;
β – поляризуємість молекули,

а уявна частина

$$\varepsilon'' = \frac{Ne^2 l}{2mv\omega\varepsilon_0}, \tag{2}$$

де ω – кругова частота падаючого на середовище електромагнітного поля;
e – електричний заряд іонізованих молекул;
l – довжина вільного пробігу іонів до зіткнення;
m – маса іона;
v – швидкість теплового руху іона.

Під впливом зовнішнього електромагнітного поля число молекул в одиниці об'єму не збільшиться, але деякі з них іонізуються, тобто їх поляризуємість зросте, отже, зросте поляризуємість і дипольний момент одиниці об'єму речовини, що буде еквівалентне збільшенню відносної діелектричної проникності. Те ж саме слід сказати і про уявну частину діелектричної проникності. Отже, знаючи рівень іонізації біологічного середовища, можна визначити тенденції в зміні її діелектричної проникності, звідки слідують зміни в її біофізичних характеристиках. У зв'язку з цим необхідно розглянути імовірнісну модель процесів, що відбуваються в біологічних середовищах під впливом зовнішніх ЕМП, що дасть можливість визначити кількісні зміни електрофізичних характеристик біологічних тканин в результаті таких дій [1].

Середовище розглядається як система мікрочасток, що мають два енергетичних рівня W_1 і W_2, які дорівнюють енергіям незбудженої молекули і молекули, що утворила радикальну пару, відповідно. Кожному енергетичному рівню відповідає своя населеність N_1 і N_2, яка визначається величиною початкової концентрації C_1. Біологічний об'єкт знаходиться під впливом зовнішнього електромагнітного поля $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{j\omega t}$ з амплітудою $\vec{E}_0$ і круговою частотою ω [1].

За наявності зовнішнього електромагнітного поля рівняння Шредінгера, що описує стан молекули, яка знаходиться на кожному з своїх енергетичних рівнів, стає нестаціонарним і набуває вигляду

$$j\hbar\dot{\Psi} = \mathbf{H}\Psi, \tag{3}$$

де $\mathbf{H}$ – гамільтоніан молекули;

$\hbar$ – постійна Планка;

Ψ – хвилева функція даної дворівневої системи.

Рішенням рівняння (3) буде вираз

$$\Psi = C_1(t)\psi_1(\vec{r})\exp\left(-j\frac{W_1}{\hbar}t\right) + C_2(t)\psi_2(\vec{r})\exp\left(-j\frac{W_2}{\hbar}t\right), \tag{4}$$

де вірогідність знайти систему в одному із стаціонарних станів визначається квадратом модуля коефіцієнта $C_k(t)$.

Використовуючи ортогональність функцій $\psi_k(\vec{r})$, одержуємо систему диференційних рівнянь для визначення коефіцієнтів $C_1(t)$ і $C_2(t)$:

$$\begin{cases} j\hbar\dot{C}_1(t) = C_2(t)H_{21}\exp\left(-j\omega_{21}t\right); \\ j\hbar\dot{C}_2(t) = C_1(t)H_{21}\exp\left(j\omega_{21}t\right), \end{cases} \tag{5}$$

де $H_{21} = H_{12} = -d_{21}E_0\cos\omega t = -d_{12}E_0\cos\omega t$;

d_{12} – дипольний момент, що створюється даними енергетичними рівнями молекул.

Розв'язком системи (5) будуть наступні вирази:

$$\left|C_1(t)\right| = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB\cos\alpha t}\,, \tag{6}$$

$$\left|C_2(t)\right| = \left(\hbar / d_{21}E_0\right)\sqrt{A^2(\Delta\omega+\alpha)^2 + 2AB\left(\Delta\omega^2-\alpha^2\right)\cos\alpha t + B^2(\Delta\omega-\alpha)^2}\,, \tag{7}$$

$$\begin{gathered}A = -\left[2\sqrt{d_{21}^2E_0^2\hbar^6 p_1 p_2\alpha^4(\alpha+\Delta\omega)^2} + \right.\\ \left. + \hbar^2\alpha(\alpha+\Delta\omega)\left[d_{21}^2E_0^2p_2 + \hbar^2p_1\left(\alpha^2-\Delta\omega^2\right)\right]\right]\times\\ \times\frac{\sqrt{\dfrac{-2\sqrt{d_{21}^2E_0^2\hbar^6p_1p_2\alpha^4(\alpha+\Delta\omega)^2} + \hbar^2\alpha^2\left(d_{21}^2E_0^2p_2 + \hbar^2p_1(\alpha+\Delta\omega)^2\right)^2}{\hbar^4\alpha^4}}}{2\hbar^2\alpha(\alpha+\Delta\omega)\left(-d_{21}^2E_0^2p_2 + \hbar^2p_1(\alpha+\Delta\omega)^2\right)},\end{gathered} \tag{8}$$

$$\begin{gathered}B = -\frac{1}{2}\times\\ \times\sqrt{\frac{-2\sqrt{d_{21}^2E_0^2\hbar^6p_1p_2\alpha^4(\alpha+\Delta\omega)^2} + \hbar^2\alpha^2\left(d_{21}^2E_0^2p_2 + \hbar^2p_1(\alpha+\Delta\omega)^2\right)}{\hbar^4\alpha^4}};\end{gathered} \tag{9}$$

$$\alpha = \sqrt{(\Delta\omega)^2 + \left(\frac{d_{21}E_0}{\hbar}\right)^2}\;; \tag{10}$$

де $\Delta\omega$ – зсув від резонансної частоти переходу в збуджений стан; p_1 і p_2 – вірогідність незбудженого і збудженого стану молекули, відповідно.

Одержані вирази для $C_1(t)$ і $C_2(t)$ дозволяють знаходити вірогідність переходу молекули з незбудженого стану в іонізований p_{12} і навпаки p_{21} залежно від зсуву частоти зовнішнього електромагнітного випромінювання по відношенню до власної частоти випромінювання молекули. Тобто, (6) описує вірогідність переходу молекули з неіонізованого стану в іонізований або вірогідність зміни діелектричної проникності біоречовини від зсуву частоти зовнішнього електромагнітного випромінювання по відношенню до частоти власного випромінювання молекул [2]. Проведені чисельні розрахунки із створення вільних радикальних пар в результаті дії зовнішнього низькоенергетичного електромагнітного поля на насіння гороху (рис. 1, 2).

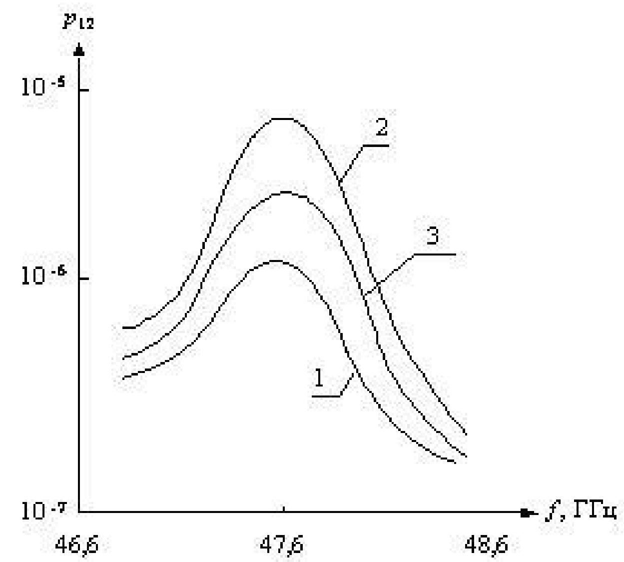


Рис. 1. Залежність вірогідності утворення вільних радикальних пар p_{12} для насіння гороху від частоти зовнішнього ЕМВ при t=10 хв.: 1 –P=5 мкВт/см^2; 2 – P=12 мкВт/см^2; 3 – P=20 мкВт/см^2.

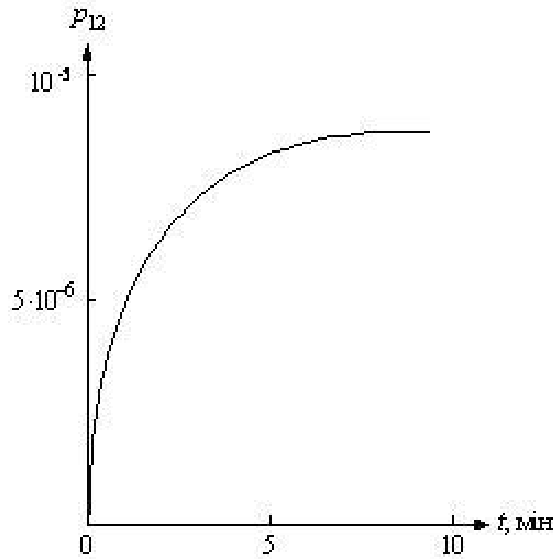


Рис. 2. Залежність вірогідності утворення вільних радикальних пар p_{12} в насінні гороху від часу дії зовнішньої ЕМВ при P=10 мкВт/см^2, f=47,6 ГГц.

Висновки. Найбільш інтенсивне утворення вільних радикальних пар в насінні гороху наступає на цілком конкретних частотах низькоенергетичного електромагнітного опромінювання, що визначається їх біофізичними характеристиками. Даний процес спричиняє зміну загального дипольного моменту речовини, і для насіння гороху добавка складає $2 \cdot 10^{-6}$ частину від загального дипольного моменту. Для визначення одержаної зміни у ε' чутливість відповідного пристрою повинна бути порядку 10^{-6}. Добавка до уявної частини відносної діелектричної постійної речовини насіння гороху дорівнює $\Delta\varepsilon''=0,0009$. Оскільки на розглянутих вище частотах опромінювання насіння гороху $\varepsilon''=1,1$, для визначення даної зміни потрібна чутливість приладу не гірше 10^{-4}.

Література.

1. *Хиппель А.Р.* Диэлектрики и волны / *А.Р.Хиппель*. – Пер. с английского. Под ред. проф. Н.Г.Дроздова. – Изд-во иностранной литературы. - Москва, 1966. – 439 с.
2. *Мунтян В.А.* Влияние электромагнитных излучений на образование свободных радикалов в биообъектах/ *В.А. Мунтян* // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. - Харьков: "СВЭКО". - 2006. - № 10. – С. 17 – 23.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ БИООБЪЕКТОВ

Мунтян В.А., Лисенко О.В., Коваль Д.М.

***Аннотация* – рассмотрено воздействие низкоэнергетического электромагнитного облучения с биологическими объектами и путем теоретических исследований получены зависимости вероятности свободных радикальных пар в семенах гороха от времени действия внешнего электромагнитного излучения**

THEORETICAL ANALYSIS OF LOW-ENERGY ELECTROMAGNETIC RADIATION INTERACTION WITH BIOLOGICAL OBJECTS

V. Muntian, O. Lysenko, D. Koval

Summary

Low-energy electromagnetic radiation interaction with biological objects is considered in given article and graphical dependences of the pea seeds free radical pairs formation probability are obtained on the basis of theoretical studies.

УДК 636.085:002.61

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЛУКТУАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ВАРАКТОРНИХ ПОМНОЖУВАЧАХ ЧАСТОТИ

Мунтян В.О., д.т.н.,
Лобода О.І., інженер
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-11-74, e-mail: muntjan@yandex.ru
Тел.: (0619) 42-57-97, e-mail: aleks_loboda@mail.ru

***Анотація* – представлено визначення флуктуаційних процесів у варакторних і транзисторних помножувачах частоти, які працюють в міліметровому діапазоні електромагнітного поля.**

***Ключові слова* – діелектрична проникливість, варактор, електромагнітне поле НВЧ, помножувач, флуктуація.**

Постановка проблеми. У зв'язку зі створенням високочутливих пристроїв по виміру змін діелектричної проникленості біоматеріалів, що перебувають під впливом низькоенергетичного електромагнітного поля, виникає необхідність проведення досліджень по відшуканню спектрів флуктуацій, амплітуди та частоти (фази) на виході реальної помножувально - підсилювального кола, які використовуються у системах перетворення частоти.

Аналіз останніх досліджень. З аналізу методів формування високостабільних коливань НВЧ діапазону, флуктуаційні процеси в помножувачів частоти варто розглядати у варакторах і транзисторах, що використають для помноження частоти нелінійні ємності й провідності. Зазначені флуктуаційні процеси можуть бути обумовлені як шумами так і флуктуаціями параметрів самого помножувача, та флуктуаціями вхідного коливання. Рішенню зазначеного завдання присвячено досить багато робіт [1-11]. Проте, у цих роботах не проведений цілий ряд, на наш погляд, важливих досліджень:

- не досліджені флуктуаційні процеси у помножувачах, що працюють із відмиканням *p-n* переходу варактору;
- не проведено аналіз технічних флуктуацій у варакторних помножувачах частоти;
- не досліджено проходження широкополосних (у порівнянні зі смугами пропущення контурів помножувача) флуктуацій амплітуди й фази вхідного коливання через помножувач частоти;

- практично не досліджені особливості флуктуаційних процесів у транзисторних помножувачах частоти.

Формулювання цілей статті. Дослідження флуктуаційних процесів у варакторних помножувачах частоти з метою визначення таких параметрів, як стабільність та коефіцієнт помноження частоти підсилювачів та помножувачів які працюють в міліметровому діапазоні електромагнітного поля.

Основна частина. Для аналізу флуктуаційних процесів розглянемо схему одноконтурного помножувача частоти на варакторі, яка представлена на рис. 1 [2].

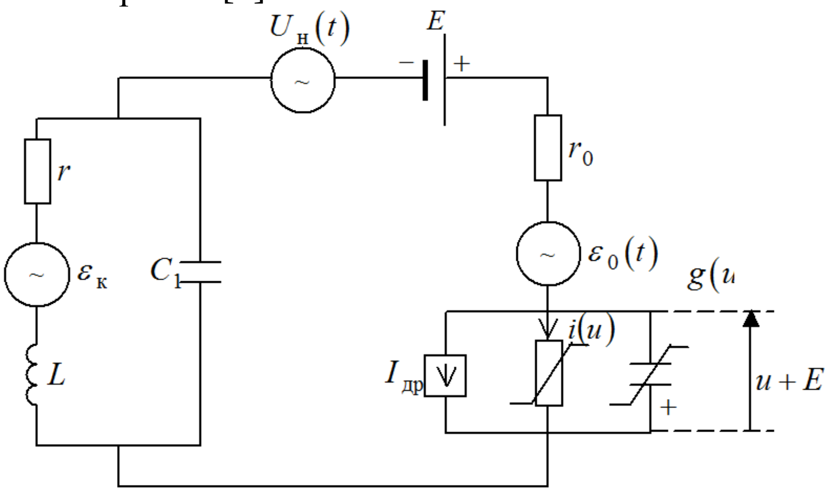


Рис. 1 Схема електрична принципова одноконтурного варакторного помножувача частоти.

В цій схемі (рис. 1) $U_H(t) = U_0 cos\ \omega_0 t$ – електро-рушійна сила (ЕРС) вхідного сигналу (накачки); u і E - змінна та постійна складова напруги на p-n переході варактору; $I_{ДР}(t)$ - шумова компонента струму варактору, що визначається шумами дифузії - рекомбінації [8]; $\varepsilon_К(t)$ і $\varepsilon_0(t)$ – ЕРС теплових шумів опору втрат контуру r і об'ємного опору варактору r_0; $i = i(u)$ і $g = (u)$ – активна компонента струму варактору і заряд, що накопичується варактором.

Врахуємо, що ємність контуру, ємність і провідність варактору випробують мали флуктуації, достатньо повільні в порівнянні з $cos\omega_0 t$:

$$C_1(t) = C_1\left[1+\delta C_1(t)\right],$$

$$C(u,t) = C(u)\left[1+\delta C_0(t)\right],$$

$$g(u,t) = g(u)\left[1+\delta g(t)\right],$$

$$\langle\delta C_1^2\rangle,\ \langle\delta C_0^2(t)\rangle,\ \langle\delta g^2(t)\rangle << 1.$$

не викликаючи якісних змін режиму роботи помножувача.

Введемо позначення:

$\omega_1 = \left[L\left(C_1 + C_0 \right) \right]^{-1|2}$, $Q_0 \quad \omega_1^{-1}\left[r\left(C_1 + C_0 \right) + Lg_0 \right]^{-1}$ – власна частота і добротність "холодного" коливального контуру. Де $C_0 = \left[dg\left(u\right)/du \right]_{u=0}$, $g_0 = \left[di\left(u\right)/du \right]_{u=0}$ – ємність і провідність варактору в робочій точці.

Нас цікавить режим множення частоти накачування ω_0 в N разів. Нехай відносне настроювання контуру стосовно частоти $N\cdot\omega_0$ мале

$$\delta_{\text{Л}} = \frac{\left(N\,\omega_0\right)^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2} << N^{-1},$$

а добротність контуру, гранична частота і опір варактору великі:

$$Q_0 >> N,\; 1/C_0 r_0 >> N\,\omega_0,\; g_0^{-1} > Q_0 r_0 .$$

Врахуємо, що всі гармоніки, які генеруються варактором, "закорочуються" контуром, крім гармоніки $N\cdot\omega_0\approx\omega_1$. В цьому випадку в спектрі напруги u можливо обмежимося врахуванням тільки двох складових - з частотою накачування ω_0 і з частотою гармоніки $N\cdot\omega_0$:

$$u = B\cos\psi_1 + R\cos\psi_2;\; \frac{du}{dt} = -\omega_0 B\sin\psi_1 - N\,\omega_0 R\sin\psi_2;$$
$$\psi_1 = \omega_0 + \vartheta_1;\; \psi_2 = N\,\omega_0 t + \vartheta_2. \quad (1)$$

Частота ω_0 не є резонансною для контуру. Тому для відшукування сталих значень амплітуди B_0 і фази ϑ_{10} першої складової в (1) можна зневажити усіма втратами, нелінійностями і шумами схеми. В результаті маємо:

$$B = U_0\left[C_1 + C_0\left(1 - N^{-2}\right) \right]\left(C_1 + C_0 \right)^{-1},\; u_{10} = 0 .$$

Тепер знаходимо скорочені рівняння для R і ϑ_2:

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{\omega_1 R}{2Q_0} - \frac{\omega_1^2 L}{2}\left[\omega_1 g_{S2} - i_{C2} - g_0 R \right] - \frac{\omega_1 r}{2} \times$$
$$\times\left[\omega_1\left(g_{C2} - C_0 R \right) - i_{S2} \right] + \frac{\omega_0}{2}\left[\ell_1(t) + R b_1(t) \right];$$

$$\frac{d\vartheta_2}{dt} = -\frac{\omega_t\,\delta_{\text{Л}}}{2} - \frac{\omega_1^2}{2R}\left[\omega_1\left(g_{C2} - C_0 R \right) - i_{S2} \right] +$$
$$+ \frac{\omega_1 r}{2R}\left[\omega_1 g_{S2} + i_{C2} - g_0 R \right] - \frac{\omega_1}{2R}\left[\ell_{11}(t) + R b_{11}(t) \right]. \quad (2)$$

В цьому виразі $g_{S2,C2}$ та $i_{S2,C2}$ визначаються як Фур'є - амплітуди синусної і косинусної складової з фазою $\psi_2 = N\,\omega_0 t + \vartheta_2$ заряду і струму варактору, а $l_1(t)$ *і* $l_{11}(t)$, $b_1(t)$ *і* $b_{11}(t)$ – випадкові процеси, обумовлені існуванням в схемі помножувача природних шумів і технічних флуктуацій параметрів. Ці процеси визначаються так як і у випадку автоколивальних систем [9].

Перш, ніж ураховувати вплив шумів на роботу помножувача, знайдемо сталі значення амплітуди й фази коливання $R\cos\psi_2$. Для цього в (2) врахуємо dR/dt, $d\vartheta_2/dt$ і флуктуаційні впливи рівними нулю. Отримана при цьому система трудна для аналізу, так як функція $g_{S2,C2}$ та $i_{S2,C2}$, що визначаються видом вольт - кулоновської $g(u)$, вольтамперної $i(u)$ характеристик варактору, що залежать від B_0, R, та ϑ_2, як правило, не визначаються через елементарні функції.

В реальних помножувачах виконується нерівність $R<<B_0$. Враховуючі цю обставину, розкладемо $g(u)$ і $i(u)$ по ступеням ($R\cos\psi_2$) і обмежимося урахуванням тільки перших двох членів розкладення:

$$\begin{aligned} &g\left(B\cos\psi_1+R\cos\psi_2\right)\approx g\left(B\cos\psi_1\right)+C\left(B\cos\psi_1\right)R\cos\psi_2; \\ &i\left(B\cos\psi_1+R\cos\psi_2\right)\approx i\left(B\cos\psi_1\right)+g\left(B\cos\psi_1\right)R\cos\psi_2, \end{aligned} \quad (3)$$

де $C(u)=dg(u)/du$, $g(u)=di(u)/du$ – ємність і провідність варактору.

Для проведення подальшого аналізу виділимо із $g(u)$ та $i(u)$ компоненти, що представляють коливання з частотами ω_0 та $N\cdot\omega_0$:

$$\begin{aligned} &g(...)=g_1\cos\psi_1+g_N\cos\left[\psi_2+N\vartheta_1-\vartheta_2\right]+C_{CP}R\cos\psi_2+...; \\ &i(...)=i_1\cos\psi_1+i_N\cos\left[\psi_2+N\vartheta_1-\vartheta_2\right]+g_{CP}R\cos\psi_2+... \end{aligned} \quad (4)$$

Тут $C_{CP}=C_{CP}(B)=\dfrac{1}{2\pi}\int\limits_0^{2\pi}C(B\cos\psi)\,d\psi$ – середня ємність варактору, $g_n=g_n(B)=\dfrac{1}{\pi}\int\limits_0^{2\pi}g(B\cos\psi)\cos n\psi\,d\psi$ – амплітуда n-ой гармоніки в спектрі $g(u)$ ($n=N$). Величини $g_{CP}=g_{CP}(B)$ і $i_N=i_N(B)$ визначаються аналогічно.

У виразі (4) для спрощення подальшого аналізу не враховано існування в спектрах $C(u)$ і $g(u)$ члена, пропорційного $\cos 2N\omega_0 t$. Врахування цього члена, тобто зміна $C(u)$ та $g(u)$ з частотою $2N\omega_0$, приведе до виявленню параметричних ефектів. Однак, оскільки розглянутий помножувач є пасивною системою, (тобто не містить активних елементів), зазначені параметричні ефекти не повинні істотно вплинути на його роботу.

Враховуючі (3) і (4), знаходимо:

$$R_0 = \sqrt{\frac{R_{0C}^2 + R_{0g}^2}{1+\eta^2}};$$

$$\sin\vartheta_{20} = \frac{k-\eta}{\sqrt{\left(1+k^2\right)\left(1+\eta^2\right)}};$$

$$\cos\vartheta_{20} = \frac{k\eta+1}{\sqrt{\left(1+k^2\right)\left(1+\eta^2\right)}},$$

де $R_{0C} = Z_{0e}\,\omega_1\, g_N$ *та* $R_{0g} = Z_{0e}\, i_N$ – компоненти амплітуди *R₀*, обумовлені нелінійностями ємності і провідності варактору, відповідно;

$k = R_{0C} / R_{0g}$ – коефіцієнт, що вказує, за рахунок якої нелінійності варактору відбувається множення частоти;

$\eta = Q\left(\delta_{\text{Л}} + \delta_{\text{Н}}\right)$ – приведена розлаштування (в реальних помножувачах $0 \le |\eta| \approx 1$);

$\delta_H = \left(C_{CP} - C_0\right) / \left(C_1 + C_{CP}\right)$ – нелінійне розлаштування контуру;

$t_{OC} = \omega_1 L Q;\ \ Q \quad \omega_1^{-1}\left[r\left(C_1 + C_{CP}\right) + L\, g_{CP}\right]^{-1}$ – резонансний опір і добротність "гарячого" контуру.

При *k>>1* множення частоти відбувається, в основному, на нелінійної ємності варактору. Якщо *k<<1*, то отримуємо помножувач на нелінійної провідності, а при *k≈1* в процесі множення частоти приблизно так само беруть участь і нелінійна провідність, і нелінійна ємкість варактору.

Аналізуючи звичайним методами систему (2), не виклика складнощів показати, що значення R_0 та υ_{20} скрізь стійкі.

Через наявність шумів і флуктуацій параметрів в схемі помножувача амплітуда і фаза вихідного коливання випробують повільні (в порівнянні з $\cos\omega_1 t$) флуктуації поблизу своїх сталих значень: $R = R(t) = R_0\left[1+\varepsilon(t)\right];\ \vartheta_2 = \vartheta_2(t) \quad \vartheta_{20} + \varphi(t)$.

Так як шуми мали, то і флуктуації $\varepsilon(t)$ та $\varphi(t)$ повинні бути малими (в силу стійкості стаціонарного стану): $\langle \varepsilon^2(t)\rangle << 1;\ \langle \varphi(t)^2\rangle << 1$.

Лінеарізучи систему (2) поблизу (R_0, υ_{20}), отримуємо такі остаточні рівняння для флуктуацій амплітуди і фази на виході варакторного помножувача частоти при монохроматичному накачуванні:

$$\left(\frac{1}{N}\frac{d}{dt}+1\right)\varepsilon-\eta\varphi \quad \frac{Q}{R_0}\ell_1(t)+Qb_1(t);$$
$$\eta\varepsilon+\left(\frac{1}{N}\frac{d}{dt}+1\right)\varphi \quad -\frac{\varphi}{R_0}\ell_{''}(t)-Qb_{''}(t). \qquad (5)$$

Тут $2\Pi=\omega_1/Q$ – полоса пропускання "гарячого" контуру; $\ell_{''}(t)$ і $\ell_1(t)$ – випадкові статистичні незалежні процеси.

Форма спектрів при різних значеннях розлад показана на рис. 2. Розлаштування контуру (рис. 2) амплітудні та фазові спектральні частоти флуктуацій можна зменшити майже в 2 рази.

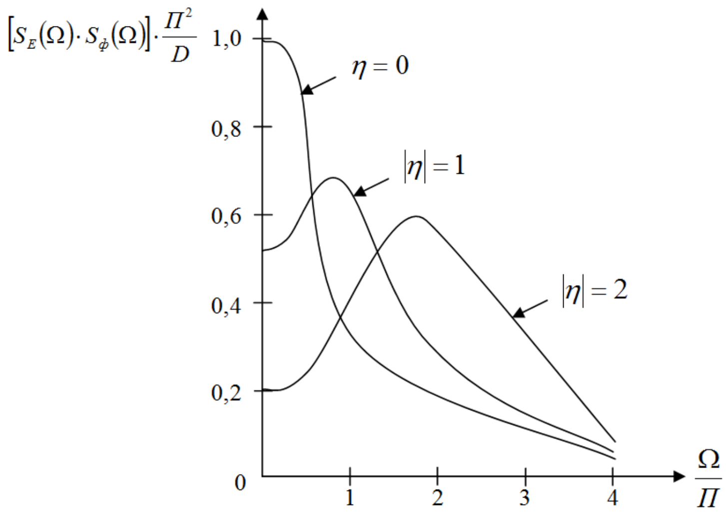


Рис. 2. Спектри амплітудних та фазових флуктуацій на виході помножувача частоти при різних величинах розладу η.

Технічні флуктуації в помножувачі частоти також описуються рівнянням (1), але при цьому ℓ_{I} та ℓ_{II} дорівнюють 0.

Їх спектральні щільності рівні відповідно:

$$S_1(\Omega)=S_{''}(\Omega)\equiv 2S_{\text{Ш}}(\omega_1),$$

$$S_{\text{Ш}}(\omega_1)=\frac{\ell}{2\pi}\left\{2\vartheta_1\left[r+\left(\frac{C_0}{C_1+C_0}\right)^2 r_0\right]+\omega_1^2L^2\left[i_{CP}+2I_0\right]\right\}. \qquad (6)$$

Спектральна щільність напруги шумів схеми, перерахованих на варактор, на частоті $\omega_1\approx N\cdot\omega_0$; i_{cp} та I_0 – середній струм і струм насичення варактору;

$$-Qb_{''}(t) \quad -K_1Q\delta C_1-K_0Q\delta C_0-\frac{K-\eta}{1+K^2}\delta g;$$
$$Qb_1(t)-\frac{K_1}{\Pi}\frac{d\delta C_1}{dt}+\frac{K(K-\eta)}{1+K^2}\delta C_0-\frac{K_0}{\Pi}\frac{d\delta C_0}{dt}+\left[\frac{1+K\eta}{1+K^2}-kg\right]\delta g- \qquad (7)$$

випадкові сили, обумовлені наявністю в схемі помножувача флуктуючих параметрів;

$K_1 = C_1 \big/ \left(C_1 + C_{CP}\right)$; $K_0 = 1 - K$; $K_g = Z_{0\ell} g_{CP}$ – коефіцієнт включення ємності контуру, ємності і провідності варактору у схемі помножувача. Звичайно K_1, K_0, $K_g \le 1$.

Рішення системи (5) можна знайти спектральні щільності відносних флуктуацій амплітуди $S_\varepsilon(\Omega)$ фази $S_\varphi(\Omega)$, парну і непарну компоненти їх сумісної спектральної щільності $S_{\varepsilon\varphi}^{0,1}(\Omega)$, а також форму п'єдесталу в спектрі вихідного коливання. Помітимо, що спектр цього коливання має вигляд

$$W(\omega_1) = \frac{R_0^2}{2}\left[\delta(\omega - N\omega_0) + W_{\text{Ï}}(\omega - N\omega_0)\right], \qquad (8)$$

тобто крім п'єдесталу він має монохроматичну лінію потужності $R_0^2/2$.

Таким чином, з (5) - (6) можна отримати всі важливі для практики спектрально – кореляційні характеристики коливань на виході помножувача у випадку подачі на вхід його монохроматичного сигналу.

Висновки.

1. У багатокаскадних помножувачах частоти, для зменшення фазових флуктуацій слід в перших каскадах реалізувати максимальний коефіцієнт множення частоти, а необхідний ступінь придушення побічних гармонік вхідного сигналу (60...70 дБ) забезпечити фільтрами зосередженої селекції.
2. З аналізу структурної схеми виходить, що наймогутніший внесок в природні флуктуації фази дає помножувач першого каскаду.
3. В першому каскаді потужність корисного сигналу складає 3 мВт.
4. При проходженні через усі подальші помножуючі елементи потужність флуктуацій збільшується в $N^2 = 3{,}24 \cdot 10^6$ разів.
5. Нестабільності вихідної частоти помножувача за 1 мс дорівнює $4 \cdot 10^{-10}$, а за 1 с - $3 \cdot 10^{-13}$.

Література

1. *Малахов Л.Н.* Флуктуации в автоколебательных системах / *Л.Н. Малахов*. - М.: Сов. радио, 1977. - 608 с.
2. Аппаратура для частотных и временных измерений / Под ред. А.П. Горшкова. - М.: Сов. радио, 1971. - 260 с.
3. *Бруевич А.Н.* Умножение частоты / *А.Н. Бруевич.* - М.: Сов. радио, 1970. - 283 с.
4. *Parker O.* Varactor multiplier arrays gore increased frequency multipliers/ *O. Parker, A.I. Grayzel* // Proc. IEEE. - 1967. - V. 55, № 3. - P. 473.

5. *Prabhu V.* Noise performance of abrupt-junction varactor frequency multipliers/ *V. Prabhu* // Proc. IEEE. - 1966. - V. 54, № 2. - P. 285.
6. *Гомзин В.М.* Исследования прохождения случайной помехи и сигнала через многокаскадный умножитель частоты/ *В.М. Гомзин, А.А. Елисеев, В.И. Метельский, С.Д. Соловьев* // Радиотехника и электроника. - 1968. - Т. 13, №6. - стр.1016.
7. *Андерсон*. Варакторные генераторы гармоник: параметры и шумовые характеристики/ *Андерсон, Хискок, Шеппард, Райт* // Зарубежная радиоэлектроника. - 1967. - № 7. - 60 с.
8. А. Ван-дер-Зил. Шумы в полупроводниках / А. Ван-дер-Зил // Шумы в электронных приборах. - М.: Энергия, 1964. - 280 с.
9. *Малахов А.Н.* О некоторых методах и результатах измерения флуктуаций амплитуды и частоты колебаний генераторов / *А.Н. Малахов, В.Н. Никонов, Т.Д. Разина* // Радиофизика. - 1961. - № 4. - С. 1052 - 1054.
10. *Мунтян В.О.* Природні флуктуації в помножувачах частоти на варакторі / *В.О. Мунтян, С.В. Адамова* // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. – 2005. – Вип. 32. – С. 100-104.
11. *Малахов А.Н.* Ширина спектральной линии выходного колебания систем стабилизации и преобразования частоты / *А.Н. Малахов, Л.Г. Шепелевич*// Радиотехника и электроника. - 1970. - Т. 15, №2. - С. 328.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВАРАКТОРНЫХ УМНОЖИТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ

Мунтян В.А., Лобода А.И.

Аннотация **- представлено определение флуктуационных процессов в варакторных и транзисторных умножителях частоты, работающие в миллиметровом диапазоне электромагнитного поля.**

STUDY FLUCTUATION PROCESSES IN THE VARACTOR FREQUENCY MULTIPLIERS

V. Myntian, A. Loboda

Summary

Presented by the definition of the fluctuation processes in the transistor and varactor frequency multiplier operating in the millimeter range of electromagnetic field.

УДК 631.363-52

СИСТЕМНЫЕ ФАКТОРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ КОРМОПРИГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Диордиев В.Т. , к.т.н.
Таврический государственный агротехнологический университет
Тел.: (0619) 42-57-97, e-mail: asv-tdatu@yandex.ru

***Аннотация* – в статье исследованы основные факторы энергетической эффективности динамического функционирования автоматизированных комплексов по производству комбикормов в условиях хозяйств на базе малогабаритных комбикормовых установок.**

***Ключевые слова* – динамическое функционирование, диффузменная динамика, модель Неймана, оптимальное решение.**

Постановка проблемы. При решении задач важнейшей проблемы современного этапа развития рыночной экономики Украины и др. развивающихся стран – резкого повышения энерго-экономической эффективности технологий промышленности и агропромышленного комплекса – основным фактором их успешного разрешения являются вопросы принятия оптимальных решений в сфере широкого круга задач энерго- и ресурсосбережения. Указанные задачи являются дальнейшим развитием методов и рекомендаций по комплексу оптимальных решений по поиску оптимальных решений при проектировании и разработке технологических комплексов, в т.ч. и в животноводстве.

Анализ последних исследований. Рассматриваемые в литературе [1, 2] относительно квазипростой случай выбора наилучшего варианта из существующих проводится потому, что применяемые при этом методы оценки возможных решений являются основой оптимизации и в сложных системах с достаточно большим числом вариантов, где их формирование ввиду наличия многих ограничений также является весьма непростой задачей.

Формулирование целей статьи. Целью статьи является обоснование выбора оптимальных решений экстремальных задач на базе математических методов и алгоритмов.

Основная часть. Практическая направленность исследований базируются на основе:

а) критического обзора проведенных исследований по затронутым проблемам и анализа смежных робот;

б) поливариантного разрешения дискуссионных вопросов Нами излагается и аргументируется только точка зрения, непосредственно вытекающая из постулатов оптимального, в т.ч. экстремального инвариантного управления и регулирования координат технологических процессов кормоприготовления;

в) наличия нескольких предпочтительных и эквивалентных по результатам методов решения одной и той же задачи и процедуры предпочтения более простым с вычислительной точки зрения (даже если рекомендуемый метод более абстрактен).

Математические аспекты моделей оптимизации определяются стратегией разрешения конкретной прикладной задачи, где применительно к ряду объектов (n_i-комплексов технологического назначения) и соответствующих неотрицательных коэффициентов прямых затрат a_{ij}, показывающих, сколько единиц i-го эффекта (ресурса) расходуется для производства одной единицы j-го продукта. Требуется определить такие значения $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$, при которых эффект составит соответственно $Э_1, Э_2, \ldots, Э_n$ единиц (Q_i – энергетические потоки, используемые при производстве; $Э_i$ – энерго-экономический эффект).

Модель рассматриваемой задачи будет иметь вид [1]:

$$\begin{aligned}&a_{11}Q_1 + a_{12}Q_2 + \ldots + a_{1n}Q_n + Э_1 = Q_1;\\&a_{21}Q_1 + a_{22}Q_2 + \ldots + a_{2n}Q_n + Э_2 = Q_2;\\&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\&a_{n1}Q_1 + a_{n2}Q_2 + \ldots + a_{nn}Q_n + Э_n = Q_n;\\&Q_1 \geq 0; Q_2 \geq 0; \ldots; Q_n \geq 0.\end{aligned} \tag{1}$$

На искомые значения переменных $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ наложены согласно (1) ограничения и условия неотрицательности типа неравенств. Система (1) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned}&(1-a_{11})Q_1 - a_{12}Q_2 - \ldots - a_{1n}Q_n = Э_1;\\&-a_{21}Q_1 + (1-a_{22})Q_2 - \ldots - a_{2n}Q_n = Э_2;\\&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\&-a_{n1}Q_1 - a_{n2}Q_2 - \ldots + (1-a_{nn})Q_n = Э_n;\\&Q_1 \geq 0; Q_2 \geq 0; \ldots; Q_n \geq 0.\end{aligned} \tag{2}$$

или в матричной форме

$$[A]\vec{Q} = \vec{Э}, \tag{3}$$

где элементы матрицы [A] равны

$$\overline{a_{ij}} = \begin{cases} -a_{ij}, & если \quad i \neq j \\ 1-a_{ij}, & если \quad i = j \end{cases}.$$

Модель (2), в общем случае, показывает, что при единичной интенсивности использования каждого i-го, из них расходуется r_{ij} единиц j-го ресурса и получается эффект в размере c_i единиц. В этом случае требуется при заданных ограничениях r_j на размеры каждого из m-ых видов используемых ресурсов установить, какие технологические способы и с какой интенсивностью следует использовать, чтобы суммарный эффект был максимален.

Задача формализуется следующим образом:

$$\max(C,Q) = \max(C_1Q_1 + C_2Q_2 + ... + C_nQ_n) \qquad (4)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} & r_{11}Q_1 + r_{12}Q_2 + ... + r_{1n}Q_n \leq r_1; \\ & r_{21}Q_1 + r_{22}Q_2 + ... + r_{2n}Q_n \leq r_2; \\ & .... \\ & r_{m1}Q_1 + r_{m2}Q_2 + ... + r_{mn}Q_n \leq r_m; \\ & Q_1 \geq 0; Q_2 \geq 0; ...; Q_n \geq 0. \end{aligned} \qquad (5)$$

Набор значений Q_1, Q_2, …, Q_n, удовлетворяющий системе (5) является допустимым решением задачи, а выражение (4), позволяющее проводить сравнительную оценку различным решениям – целевой функцией задачи. Из теории линейного программирования известно, что наряду с задачей (4) – (5) существует другая задача, двойственная ей:

$$\min(r_1Э_1 + r_2Э_2 + ... + r_mЭ_m) \qquad (6)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} & r_{11}Э_1 + r_{21}Э_2 + ... + r_{m1}Э_m \geq C_1; \\ & r_{21}Э_1 + r_{22}Э_2 + ... + r_{m2}Э_m \geq C_2; \\ & .... \\ & r_{1n}Э_1 + r_{2n}Э_2 + ... + r_{mn}Э_m \geq C_n; \\ & Э_1 \geq 0; Э_2 \geq 0; ...; Э_m \geq 0. \end{aligned} \qquad (7)$$

Связь между условиями и решениями прямой и обратной (двойственной) задач устанавливается известными двумя теоремами двойственности, где вытекающие из второй теоремы двойственности соотношения представляются в виде условий дополняющей не жесткости: для каждого j-го ресурса (j=1, 2, …, m), которому соответствует j-е ограничение типа неравенства в задачах (4) – (5) и переменная $Э_j$ в задачах (6) – (7) вида

$$\tilde{Э}_j(r_{j1}\tilde{Q}_1 + r_{j2}\tilde{Q}_2 + ... + r_{jn}\tilde{Q}_n - r_j) = 0. \qquad (8)$$

Модели (4) – (8) принадлежат к классу линейных статических, но на практике реальными являются случаи, когда при единичной интенсивности использования j-го способа за отрезок времени a_{ij} единиц i-го продукта потребляется, а b_{ij} – производится, т.е. требуется установить, какие способы и с какой интенсивностью должны использоваться для того, чтобы темп использования Q_{Σ} был наибольшим (здесь должна реализоваться нелинейная динамическая модель Неймана [1]), где следует найти значение данного предельно возможного темпа.

При принимаемых допущениях о замкнутости процесса, не отрицательности и неизменности технологических коэффициентов a_{ij}, b_{ij}, и т.д. модель управления формулируется следующим образом:

а) Пусть $\vec{Q}^t = \left(Q_1^t, Q_2^t, ..., Q_n^t\right)$ - искомый не отрицательный вектор интенсивностей использования технологических способов в t-том периоде времени, а $\vec{Z}^t = \left(Z_1^t, Z_2^t, ..., Z_m^t\right)$ - вектор эффективности. В этом случае темп расширения эффективности за t-й период времени определяется как

$$\alpha^t = \min_i \frac{Z_i^t}{Z_i^{t-1}} \le \min_i \frac{b_{i1}Q_1^t + b_{i2}Q_2^t + ... + b_{in}Q_n^t}{a_{i1}Q_1^t + a_{i2}Q_2^t + ... + a_{in}Q_n^t}.$$

б) При учете независимости технологических коэффициентов от времени, индекс t опускается и модель принимает вид

$$\alpha_m = \max_i \alpha_i$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned}
&b_{11}Q_1 + b_{12}Q_2 + ... + b_{1n}Q_n \ge \alpha\left(a_{11}Q_1 + a_{12}Q_2 + ... + a_{1n}Q_n\right);\\
&b_{21}Q_1 + b_{22}Q_2 + ... + b_{2n}Q_n \ge \alpha\left(a_{21}Q_1 + a_{22}Q_2 + ... + a_{2n}Q_n\right);\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&b_{m1}Q_1 + b_{m2}Q_2 + ... + b_{mn}Q_n \ge \alpha\left(a_{m1}Q_1 + a_{m2}Q_2 + ... + a_{mn}Q_n\right);\\
&Q_1 \ge 0; Q_2 \ge 0; ...; Q_n \ge 0,
\end{aligned} \qquad (9)$$

т.е. данная модель Неймана является нелинейной.

в) Приведенной нелинейной задаче также соответствует двойственная задача

$$\alpha_n = \min_i \beta$$

при ограничениях следующего вида:

$$\begin{aligned}
&b_{11}Э_1 + b_{21}Э_2 + ... + b_{m1}Э_m \le \beta\left(a_{11}Э_1 + a_{21}Э_2 + ... + a_{m1}Э_m\right);\\
&b_{12}Э_1 + b_{22}Э_2 + ... + b_{m2}Э_m \le \beta\left(a_{12}Э_1 + a_{22}Э_2 + ... + a_{m2}Э_m\right);\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&b_{1n}Э_1 + b_{2n}Э_2 + ... + b_{mn}Э_n \ge \alpha\left(a_{1n}Э_1 + a_{2n}Э_2 + ... + a_{mn}Э_m\right);\\
&Э_1 \ge 0; Э_2 \ge 0; ...; Э_n \ge 0,
\end{aligned} \qquad (10)$$

В данном случае для оптимальных задач (1.1) – (1.10) справедливы обе теоремы двойственности:

- условие совпадения экстремумов целевых функций

$$\tilde{\alpha} = \max_i \alpha = \max_i \beta = \tilde{\beta};$$

- условие дополняющей нежесткости, т.е. для всех j=1, 2, …, m имеем

$$\tilde{Э}_j\left[b_{j1}\tilde{Q}_1 + b_{j2}\tilde{Q}_2 + ... + b_{jn}\tilde{Q}_n - \alpha\left(a_{j1}\tilde{Q}_1 + a_{j2}\tilde{Q}_2 + ... + a_{jn}\tilde{Q}_n\right)\right] = 0 .$$

д) На реальные процессы развития системы существенное влияние оказывают начальные условия и др. Виды ограничений, поэтому динамические модели, особенно нелинейные, являются более сложными. Если используется дискретное время t=0, 1, …, T (T – общий период времени) (единичный отрезок времени: мин, час, и т.д.), то желательно использовать модели А.Л. Лурье [3]. Состояние процесса при каждом значении t задается m+n числами Q_{1t}, Q_{2t}, …, Q_{mt}, $Q_{m+1,t}$, …, $Q_{m+n,t}$ – координатами вектора $\vec{Q}_t$, при этом первые m координат будут характеризовать количество разных ресурсов m – видов, а последние – n видов потребляемых в t – ом периоде времени.

Для нашего случая такая модель будет иметь вид

$$\Psi\left(\vec{Q}_1^n, \vec{Q}_2^n, ..., \vec{Q}_{T-1}^n, \vec{Q}_T\right) = \min, \tag{11}$$

где $\vec{Q}_t^n$ - вектор, объединяющий последние и координат вектора $\vec{Q}_t$, а Ψ - соответствующая целевая функция. Векторы $\vec{Q}_1, \vec{Q}_2, ..., \vec{Q}_T$ не являются независимыми – их последовательность определяется параметрами технологической карты и меню комбикорма (они удовлетворяют условиям реализуемости – реализуется переход от одного периода времени и одного меню к другому).

Допустимые значения $\vec{Q}_t$ зависят от производственных условий (ресурсов) в предыдущем периоде и имеющихся в t – м периоде технологических способов их использования, откуда следует $\vec{Q}_t \in \omega_t\left(\vec{Q}_{t-1}^m\right)$, ω_t - множество способов, $\vec{Q}_{t-1}^m$ - вектор, объединяющий первые m координат $\vec{Q}_{t-1}$.

В данном случае возможные виды динамических экстремальных моделей будут отличаться формой критерия оптимальности, перечнем используемых ресурсов и степенью их агрегирования, ограничениями возможностей использования ресурсов, что показано на рис. 1.

Вывод. Таким образом, на основании полученных моделей, при обосновании законов управления энергетическими процессами возможно использование моделей на базе методов корреляционного и регрессионного анализа.

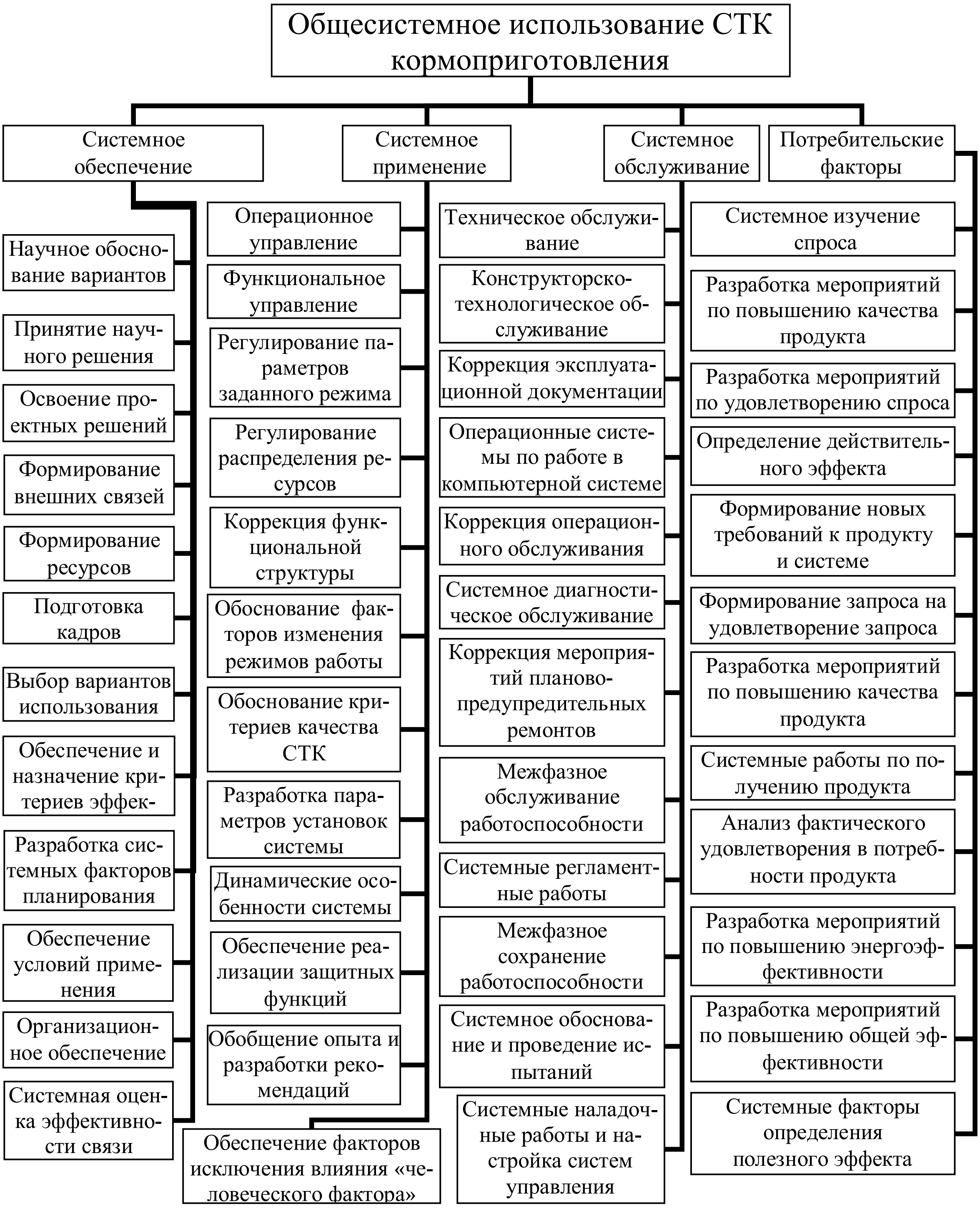


Рис. 1. Классификация направлений использования СТК кормоприготовления.

Литература.

1. *Ванько В.И.* Вариационное исчисление и оптимальное управление / *Ванько В.И., Ермошина О.В., Кувыркин Г.Н.*; под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 488 с.

2. *Діордієв В.Т.* Критерії управління енергозаощаджуючими процесами виробництва комбікормів в умовах господарств / *Діордієв В.Т.* // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. – К., 2004. – Ч.4 – С. 113-118.
3. *Диордиев В.Т.* Системо- и схемотехническая база реализации многокритериальной системы прямого цифрового регулирования параметров технологических процессов производства комбикормов в условиях хозяйств / *Диордиев В.Т., Труфанов И.Д., Кашкарев А.А.* // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. – К.: 2008. – Ч.5 – С. 102-108.

СИСТЕМНІ ФАКТОРИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИНАМІЧНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ МАЛОГАБАРИТНОЇ КОРМОПРИГОТУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Діордієв В.Т.

Анотація **– у статті досліджені основні фактори енергетичної ефективності динамічного функціонування автоматизованих комплексів по виробництву комбікормів в умовах господарств на базі малогабаритних комбікормових установок.**

SYSTEMIC FACTORS THE ENERGY EFFICIENCY OF THE INSTALLING LOWER PRODUCTIVITY FOR PRODUCTION OF MIXED FEED IN THE DYNAMICS

V. Diordiev

Summary

In the article the main factors the energy efficiency the dynamic functioning of automated systems for the production of mixed feed in farms on the basis of the installing low productivity

УДК 631.171:681.5

ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ АСК ТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ВИРОБНИЦТВА КОМБІКОРМІВ

Діордієв В.Т., к.т.н.,
Кашкарьов А.О., інженер *
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-57-97, e-mail: asv-tdatu@yandex.ru

***Анотація* – в статті наведені результати упровадження АСК технологічного комплексу виробництва комбікормів в умовах господарства на базі імітаційної моделі технологічного процесу. Розглянута функціональність АСК на основі мереж Петрі.**

***Ключові слова* – автоматична система керування, технологічний комплекс, комбікорм, мережа Петрі, таймінг.**

Постановка проблеми. Як відомо, в умовах діяльності фермерських тваринницьких господарств АПК України на виробничому рівні автоматичної системи керування (АСК) технологічними процесами (ТП) домінує "часткова" або "локальна" автоматизація [6]. Тут відсутня єдине інформаційне середовище, котре було б основою системи оперативного обліку та керування ресурсами виробництва на рівні виробничої ділянки та підприємства в цілому.

У той час як на адміністративно-господарчому рівні у рамках систем керування ресурсами підприємства здійснюється облік кожної фінансової операції та кожного документу, на рівні виробництва подібного контролю не забезпечується [6].

Щоб процес виробництва був контрольованим та керованим, необхідно вирішити такі задачі [2, 4-6]:

- розробка та упровадження системи вимірювання, яка забезпечить об’єктивний та оперативний контроль поточного стану технологічних та виробничих процесів, а також стану виробничих ресурсів;
- обґрунтований вибір базового математичного апарату АСК ТП та її функціонального насичення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до поставлених задач, авторами запропонована серія технічних, алгоритмічних та інжинирінгових рішень, які дозволяють реалізувати гнучку АСК

---

* Науковий керівник – к.т.н., проф. В.Т. Діордієв

технологічних комплексом (ТК) виробництва комбікормів (ВК) в умовах господарств АПК [1, 3, 7].

Нами за пропонована АСК ТП ВК на базі ТК малої та середньої продуктивності на основі імітаційних моделей, виконаних за допомогою математичного апарату мереж Петрі [1, 2]. Такий підхід забезпечив можливість реалізації гнучкого інтерфейсу програмного забезпечення та побудови мережних моделей ТП, а також їх корегування без участі програмістів. Відкриваються нові можливості реалізації функцій оцінки часових діаграм роботи елементів ТК та стану датчиків, що дозволяє ідентифікувати аварійний режим роботи виконавчих механізмів або порушення нормального ходу ТП [4].

Останні задачі є особливо актуальними, оскільки від надійності роботи елементів ТК ВК залежить стабільність постачання тваринницьких ферм якісними комбінованими кормами.

За результатами аналізу журналу несправностей (рис. 1) ТК ВК №2 ТОВ "Агропромислова компанія" (м. Мелітополь, Запорізька обл.) можна відзначити, що запропоновані алгоритми підвищення інформативності АСК на основі таймінгу елементів ТК дозволили б попередити аварійні ситуації пов'язані з роботою транспортерів, шиберів та датчиків рівня.

Рис. 1. Причини аварійні ситуації ТК ВК №2 ТОВ "Агропромислова компанія".

Формування цілей статті. Дослідження функціональності та інформативності АСК ТК ВК на основі мереж Петрі та результатів виробничих випробувань.

Основна частина. Дослідження часу спрацювання датчиків та тривалості роботи засувок виконувались на базі ТК ВК цеху № 2 ТОВ "Агропромислової кампанії", на якому виконуються такі технологічні операції: приймання компонентів комбікормів, їх переробка (подрібнення, змішування, гранулювання), виробництво комбікорму, тимчасове та тривале зберігання компонентів комбікормів та готової продукції. Для детального розгляду була акцентована окремій ділянці

ТК (рис. 2), для якої була складена модель роботи за допомогою мереж Петрі (рис. 3).

Вхідною інформацією виступає [1, 7]: конструкція ТК, технологічне обладнання, розташування датчиків рівня та засувок (рис. 2), імітаційна модель роботи ділянки ТК (рис. 3), матриці інцедентності дворівневої мережі Петрі (табл. 1). Отримання даних здійснюється технічними засобами автоматизації комплексу, пульту керування та з журналів звіту, яка узгоджується з відповідними рівнями моделі ТП (табл. 2).

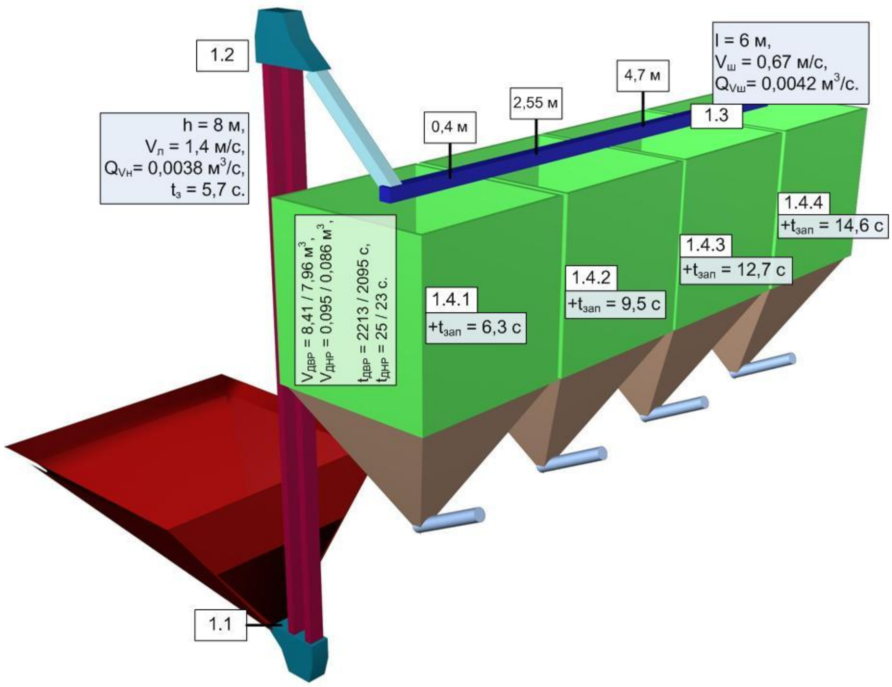
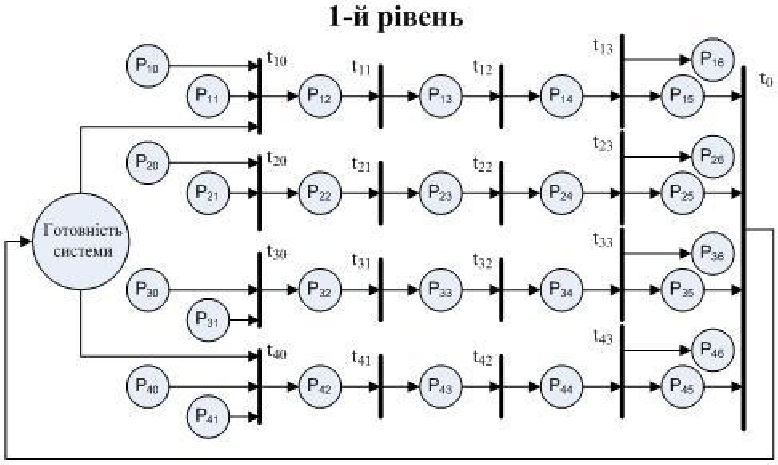


Рис. 2. Ділянка ТК ВК зберігання компонентів, які потребують подрібнення: | - місце встановлення засувок (час відкриття/закриття 1.1 – 12 с, 1.3 – 9 с); ДНР, ДВР – датчик нижнього та верхнього рівня; V, t – об’єм компоненту та час завантаження на зазначеному рівні, м^3; $t_{зап}$ – час транспортного запізнення, с; $V_л$, $V_ш$ – лінійна швидкість руху транспортерів, м/с; Q – об’ємна продуктивність транспортерів, м^3/с.

Вплив коливання властивостей компонентів комбікорму, у зоні припустимих 5%, на таймінг датчиків рівня та засувок статистично не значущий. Для реалізації пропонованого способу втручання у роботу існуючої АСК ТП необхідно тільки на рівні функцій протоколювання контрольованих показників. Алгоритмічне забезпечення може бути реалізовано як окремими функціями існуючої системи керування так і бути у її складі. При створенні АСК ТП ВК на ТК на основі мережі Петрі, відповідні данні передаються та зберігаються у структурах, які відповідають матриці інцедентності [1].



P_{i0} – і-й бункер порожній (стан датчика нижнього рівня =0);
P_{i1} – команда на завантаження і-го бункеру;
P_{i2} – відкриття і-го бункеру для завантаження;
P_{i3} – початок завантаження і-го бункеру;
P_{i4} – і-й бункер завантажено;
P_{i5} – завантаження і-го бункеру виконано;
P_{i6} – і-й бункер повний;
$i \in [1, 2, 3, 4]$.

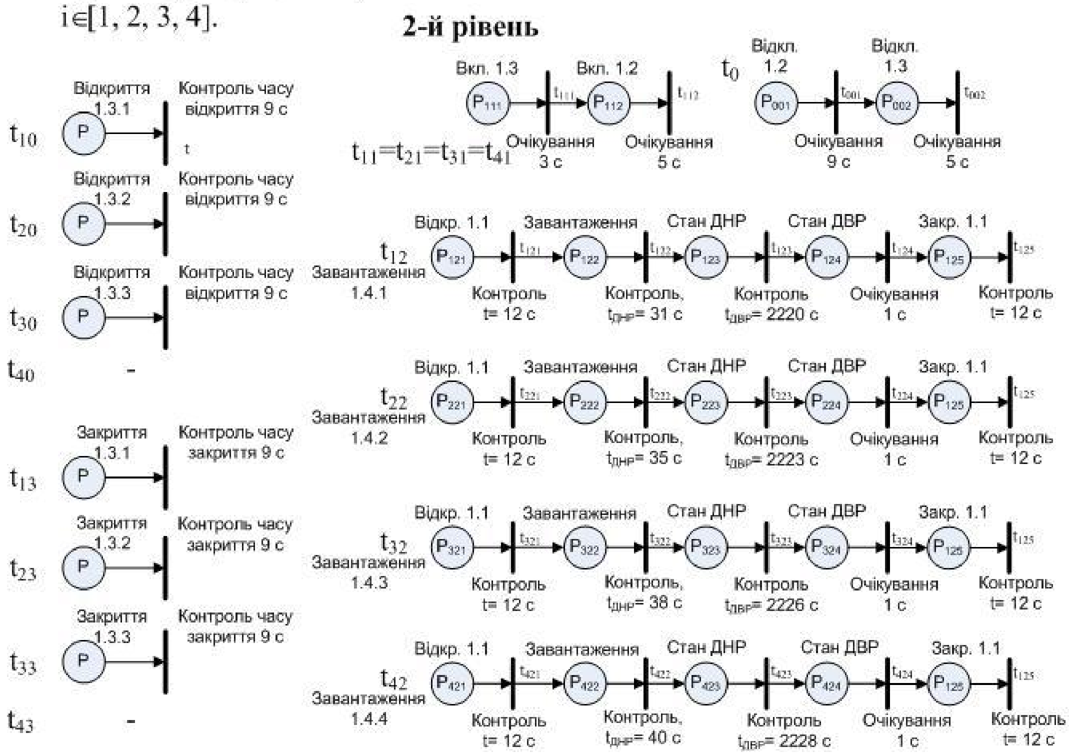


Рис. 3. Імітаційна модель ТП ВК ділянки ТК (рис. 2).

Для удосконалення та розвитку методики оцінки, з огляду на практичне застосування, доцільно данні досліджень представляти у відносних одиницях - нормовані данні ($x_{нi} = x_i / \bar{X}$) відносно середнього арифметичного. За рахунок цього виконується узагальнення досліджень при різних законах розподілу з контрольованими параметрами $\bar{X}_н$=const, $S_н$=var [5].

Таблиця 1 - Матричне представлення складених переходів 1-го рівня (модель 2-го рівня) ділянки ТК ВК (рис. 2)

Позначення переходу 1-го рівня	Представлення 2-го рівня складеного переходу 1-го рівня	
$t_{i0} = t_{i3}$ $i \in [1, 2, 3, 4]$	$\begin{array}{c c} & P \\ \hline t & Start \end{array}$	$\begin{array}{c c} & t \\ \hline P & Stop \end{array}$
$t_{i1} = t_0$ $i \in [1, 2, 3, 4]$	$\begin{array}{c c c} & P_{i11} & P_{i12} \\ \hline t_{i11} & & 1 \\ t_{i12} & & \end{array}$	$\begin{array}{c c c} & t_{i11} & t_{i12} \\ \hline P_{i11} & 1 & \\ P_{i12} & & 1 \end{array}$
t_{i2} $i \in [1, 2, 3, 4]$	$\begin{array}{c c c c c c} & P_{i21} & P_{i22} & P_{i23} & P_{i24} & P_{i25} \\ \hline t_{i21} & & Stop1 & & & \\ t_{i22} & & & Stop21 & & \\ t_{i23} & & & & Stop22 & \\ t_{i24} & & & & & Start3 \\ t_{i25} & & & & & \end{array}$	$\begin{array}{c c c c c c} & t_{i21} & t_{i22} & t_{i23} & t_{i24} & t_{i25} \\ \hline P_{i21} & Start\ 1 & & & & \\ P_{i22} & & Start2 & & & \\ P_{i23} & & & 1 & & \\ P_{i24} & & & & 1 & \\ P_{i25} & & & & & Stop3 \end{array}$

Таблиця 2 - Результати спостережень таймінгу електрифікованих засувок та датчиків рівня ділянки ТК (рис. 2)

Обладнання, перехід (рис. 2)	Тривалість роботи електрифікованої засувки, с	
	відкриття	закриття
1.3.1* (t_{10}/t_{13})	9,6; 9,3; 9,0; 8,7; 8,8; 8,4; 8,9; 8,8; 9,7; 9,3	9,0; 8,9; 9,0; 9,3; 9,9; 9,1; 9,3; 9,3; 9,2; 9,4
1.3.2* (t_{20}/t_{23})	9,6; 9,2; 9,1; 9,3; 9,5; 9,6; 9,0; 9,5; 9,1; 9,1	9,4; 9,5; 9,0; 8,8; 9,2; 9,4; 9,2; 9,7; 9,1; 9,4
1.3.3* (t_{30}/t_{33})	8,9; 8,8; 9,2; 8,8; 8,8; 9,0; 8,8; 9,2; 9,0; 8,8	8,9; 8,9; 9,1; 8,6; 9,0; 8,8; 9,2; 9,2; 9,1; 9,1
1.1** (t_{121}/t_{125}, t_{221}/t_{225}, t_{321}/t_{325}, t_{421}/t_{425},)	11,5; 11,4; 12,9; 13,0; 12,8; 11,4; 11,9; 11,9; 12,2; 11,7; 11,5; 11,8; 12,5; 13,2; 12,1; 11,9;12,4; 11,8; 12,9; 12,6	11,9; 11,9; 11,9; 12,1; 11,7; 11,6; 12,3; 11,8; 12,1; 11,5; 11,9; 12,4; 11,6; 12,1; 11,9; 12,0; 11,8; 11,0; 11,9; 12,7
	Час спрацювання датчиків рівня, с	
	ДНР (t_{i22})	ДВР (t_{i23})
1.4.1 пшениця	30,9; 28,1; 25,9; 29,2; 31,2	2242; 2231; 2256; 2169; 2251
ячмінь	33,6; 32,2; 37,5; 32,8; 29,4	2296; 2395; 2244; 2364; 2313
1.4.2 ячмінь	36,4; 36,5; 35,5; 36,2; 35,4	2321; 2368; 2343; 2409; 2355
кукурудза	32,0; 32,4; 33,2; 32,8; 29,4	2080; 2170; 2228; 2167; 2162
1.4.3 пшениця	38,4; 39,2; 38,0; 39,3; 39,2	2274; 2323; 2337; 2189; 2262
ячмінь	41,3; 41,2; 41,0; 38,3; 39,0	2421; 2346; 2373; 2390; 2426
шрот	39,0; 36,5; 37,1; 39,0; 38,0	2279; 2237; 2375; 2293; 2208
1.4.4 шрот	39,4; 39,1; 37,9; 38,4; 38,2	2207; 2083; 2262; 2280; 2135
кукурудза	40,6; 37,0; 39,7; 36,5; 36,8	2211; 2205; 2208; 2084; 2247

Примітки: * час спрацювання засувки за паспортом 9 с;
** час спрацювання засувки за паспортом 12 с;

Оцінка часу спрацювань виконавчих механізмів та датчиків рівня базується на методах виключення грубих помилок або хибних даних, значення яких у класичному розумінні явно перевищує похибки, обумовлені умовами виробництва та станом елементів ТК. У контексті, таймінгу грубі похибки приймають дещо інше значення, яке дозволяє акцентувати увагу оператора або ідентифікувати аварійний стан на певній ділянці ТК ВК [4].

Для розрахунку $S_{АЧХ}$ використовуємо дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) з кількістю даних 2^n ($n \in$ 1, 2, …), що дозволяє використовувати алгоритм швидкого перетворення [8]. Тригонометричний багаточлен Фур'є, який у контексті дискретних даних часу про таймінг за наближеними формулами Бесселя матиме вигляд:

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{N/2} a_i \cdot \cos\pi \cdot i + \sum_{i=1}^{N/2} b_i \cdot \sin\pi \cdot i\,, \tag{1}$$

$$a_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N} y_i\,,\ b_0=0; \tag{2}$$

$$a_m = \frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N} y_i \cdot \cos\frac{2\pi \cdot i \cdot m}{N}, \quad m = 1,2,\ldots,N/2\,, \tag{3}$$

$$b_m = \frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N} y_i \cdot \sin\frac{2\pi \cdot i \cdot m}{N}, \quad m = 1,2,\ldots,N/2\,, \tag{4}$$

де y_i – масив вхідних значень, А;

N – кількість рівних частин на які поділений період Т.

Тоді визначення площі амплітудо-частотної характеристики матиме вигляд

$$S_{АЧХ} = \int_0^N y(t)\,dt\,,$$

або у дискретній формі для амплітуди

$$S_{АЧХ} = \sum_{i=1}^{m}\sqrt{a_m^2 + b_m^2}\,. \tag{5}$$

Формальним критерієм аномальності результату спостереження (часу спрацювання), а відповідно і висновку про належність даних до еталонної групи вимірювань, виступає нерівність [9]

$$\left|x_н^* - 1\right| \geq t \cdot S_н\,, \tag{6}$$

де $x_н^*$ – спостереження, яке є умовно помилковим;

t – коефіцієнт, який залежить від виду та закону розподілу, об'єму вибірки та рівня значущості;

$S_н$ – нормоване стандартне відхилення (стандартне відхилення нормованих даних).

У реальних умовах таке спостереження має критичну ситуацію, яка властива еталонним даним ($S_н$ =0 або $S_н \approx 0$) - чутливість критерію зростає, що унеможливлює надання об'єктивних та достовірних висновків про техніко-технологічну значущість відхилень [5]. Враховуючи незалежний характер отриманих даних за відповідними елементами ТК можна прийняти значення t таким, яке відповідаю критерію Стьюдента (при довірчій ймовірності 0,05 t=1,96) [9].

Виходячи з задач аналізу таймінгу роботи елементів технологічних комплексів, подальша робота спрямована на визначення впливу можливих умовних помилок $x_н^*$ на площу АЧХ. Для цього прийнято «ідеальні» умови визначенні площі АЧХ. Вважатимемо, що її розмір відповідатиме множині даних, кількість яких дорівнює 2^n, значення елементів якої дорівнює «1».

В результаті виконання теоретичних досліджень, щодо таймінгу роботи виконавчих механізмів та датчиків ТК (табл. 2), можна відзначити можливість використання площі АЧХ (результат обробки вхідних даних апаратом дискретного перетворення Фур'є (ДПФ)), як критерію нормального режиму роботи елементів технологічного комплексу в умовах обмеженої кількості вхідних даних (табл. 3).

Таблиця 3 - Оцінка таймінгу датчиків рівня та засувок

Таймінг датчиків рівня								
Бункер, компонент	ДНР				ДВР			
	$\overline{X}$	S	$S_н$	$S_{АЧХн}$	$\overline{X}$	S	$S_н$	$S_{АЧХн}$
1.4.1, пшениця	28,516	2,088	0,0732	0,19	2224	38	0,0173	0,073
ячмінь	34,032	2,36	0,0693	0,29	2325	68	0,0292	0,12
1.4.2, ячмінь	36,152	0,455	0,0126	0,05	2360	37	0,0158	0,067
кукурудза	32,601	0,5	0,0153	0,038	2161	61	0,0281	0,082
1.4.3 пшениця	38,736	0,636	0,0164	0,066	2281	67	0,0294	0,1
ячмінь	40,46	1,418	0,035	0,138	2383	31	0,0131	0,051
шрот	37,921	1,3	0,0342	0,098	2296	58	0,0251	0,102
1.4.4 шрот	38,7	0,678	0,0175	0,048	2208	89	0,0403	0,141
кукурудза	38,463	1,997	0,052	0,202	2177	62	0,0284	0,115
Таймінг засувок								
Засувка	Відкриття				Закриття			
	$\overline{X}$	S	$S_н$	$S_{АЧХн}$	$\overline{X}$	S	$S_н$	$S_{АЧХн}$
1.3.1	8,941	0,372	0,042	0,421	9,236	0,310	0,034	0,362
1.3.2	9,342	0,213	0,023	0,2	9,26	0,283	0,031	0,307
1.3.3	8,96	0,173	0,02	0,163	8,962	0,195	0,022	0,244
1.1, N=16	12,1	0,579	0,049	1,267	11,92	0,234	0,02	0,457
1.1, N=8	12,1	0,689	0,057	0,568	11,911	0,192	0,016	0,162
1.1, N=4	12,38	0,573	0,046	0,156	11,934	0,108	0,01	0,038

Примітка. $\overline{X}_н$ =1 – відповідно до прийнятої методики обробки даних.

Методика обробки вхідних даних така: формувались вибірки об'ємом 2^2; з формована сукупність нормувалась відносно власного середньоарифметичного; до сукупності додавався час – 5-а точка, яка нормувалась відносно обраної сукупності; розраховувався коефіцієнт *t* (6); виконання ДПФ над сукупністю, в якій додана 5-а точка (точка 1 ігнорувалась) та обчислення $S_{АЧХн}$ (5); отримана множина даних (t; $S_{АЧХн}$) сортувалась та обчислювався коефіцієнт кореляції за стандартною методикою [9].

У результаті обробки експериментальних даних (табл. 3) необхідно зазначити, що у випадку порівняння можливих помилкових даних (максимальний час спрацювання відповідних переходів (табл. 2), окрім переходів, які відповідають засувці 1.1 (рис. 2)) за допомогою критерію Стьюдента (6) із $\mathrm{S_{АЧХн}}$ коефіцієнт кореляції між цими показниками складає менше ніж 0,3 у різних варіантах повторів. Низький зв’язок обумовлений врахуванням динаміки контрольованих значень.

Такий показник не дозволяє безпосередньо використовувати таку вимогу на практиці. При моделюванні були прийняті контрольовані ідеальні вхідні дані – дані нормованої вхідної вибірки дорівнювали "1". Тому необхідно дослідити вплив збільшення об’єму вибірки виробничих даних на коефіцієнт кореляції між критеріальним значенням Стьюдента *t* (6) та $\mathrm{S_{АЧХн}}$ (табл. 4) на прикладі тривалості роботи засувки 1.1 (рис. 2, табл. 2). Розрахунки виконувались для серії різних сполучень даних, що дозволило генерувати більшу кількість вибіркових сукупностей відповідного об’єму (табл. 4).

Таблиця 4 – Аналіз таймінгу роботи засувки 1.1 (рис. 2)

Об’єм вибірки	Коефіцієнт кореляції площі відповідної складової ДПФ		
	амплітудна	дійсна	уявна
4	-0,0613	0,1007	0,3077
8	-0,0308	0,1893	0,3461
16	0,9761	-0,9356	0,3759

Висновки. Обробка виробничих даних апаратом ДПФ, отриманих з мережної моделі ділянки ТК ВК, яка покладена в основу АСК, показала доцільність використання таймінгу як інформаційного показника.

За результатами експериментальних досліджень визначено, що в ідеальних умовах пропоновані алгоритми підвищення інформативності АСК дієздатні, але на практиці необхідно забезпечити достовірну базу еталонних або експертних даних, що дозволить максимізувати кореляційний зв’язок між ймовірною похибкою та обчислюваною площею АЧХ – підвищити достовірність висновків щодо поточного режиму роботи елементів ТК та стану ТК в цілому.

Розробка цих функцій вимагає упровадження алгоритмів навчання АСК або експертного супроводу на початкових етапах експлуатації. Таке рішення обумовлене такими чинниками:

- методика поточної обробки експериментальних даних на основі ДПФ чутлива до стаціонарності вхідних даних та закону розподілу;
- статистично значуще відхилення часу спрацювання датчиків рівня або засувок не має загального статичного значення, яке б відбивало техніко-технологічну значущість події, що пов'язане з широким колом елементів ТК та різними їх умовами роботи.

Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення алгоритмів підвищення інформативності АСК на основі таймінгу технологічного обладнання та датчиків у технологічних комплексах з періодичним характером роботи та дискретною роботою електросилового обладнання.

Подальші дослідження можна зосередити на обґрунтуванні значень техніко-технологічних показників та їх величини для певних елементів ТК, обґрунтуванні об'єму бази еталонних даних, визначення кола ідентифікованих подій та реакцій на них.

Література.

1. А.с. 36841 України. Комп'ютерна програма "MiniAPCSCombi" / *В.Т. Діордієв, А.О. Кашкарьов* / Заявник та власник ТДАТУ. - №37087; заявл. 08.12.2010; опубл. 08.02.2011.
2. *Діордієв В.Т.* Використання мереж Петрі для моделювання технологічного процесу приготування комбікормів / *В.Т. Діордієв, А.О. Кашкарьов* // Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження – Львів: Львів. нац. аграр. ун-т, 2008. – №12., Т2. – С. 55 – 61.
3. *Діордієв В.Т.* Методика експериментальних досліджень АСУ комплексом виробництва комбікормів / *В.Т. Діордієв, А.О. Кашкарьов* // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. - Вип. 10, Том 9. – С. 187-193. – Режим доступу до доповіді: http://nbuv.gov.ua/portal/Chem_Biol/Ptdau/2010_10_9 .
4. *Діордієв В.Т.* Таймінг датчиків технологічного комплексу виробництва комбікорму як сервісна функція автоматизованої системи управління на базі мереж Петрі / *В.Т. Діордієв, А.О. Кашкарьов*// Технічна електродинаміка, – 2010. – Ч. 2. – С. 169-173. – Режим доступу: http://fel.kpi.ua/ppedisc/doc/s5/5_8.pdf.
5. *Кашкарьов А.О.* Аналіз випадкових процесів за допомогою швидкого перетворення Фур'є / *А.О. Кашкарьов, О.М. Терентьєв* // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. - Вип. 10, Том 10. – С. 158-162. – Режим доступу до доповіді: http://nbuv.gov.ua/portal/Chem_Biol/Ptdau/2010_10_10
6. *Лысогор В.Г.* Автоматизация - не роскошь, а необходимый компонент успеха современного производства / *В.Г. Лысогор, Ю.Я. Ски-*

дан // Хранение и переработка зерна, №2. – 2001. – С. 61 – 65. Режим доступа: http://www.apk-inform.ru/showart.php?id=10772.
7. Пат. №54511 Україна. МПК[9] A23N 17/00, G06Q 10/00 . Спосіб автоматизованого керування технологічним процесом виробництва комбікорму / *В.Т. Діордієв, А.О. Кашкарьов* / Заявник та власник ТДАТУ. - № u201006332; заявл. 25.05.2010; зареєстровано у державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.11.2010, бюл. №21/2010
8. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов / *А.Б. Сергиенко*. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.
9. *Третьяк Л.Н.* Обработка результатов наблюдений: Учебное пособие / *Л.Н. Третьяк*. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.

ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ АСУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ПРОИЗВОДСТВА КОМБИКОРМОВ

Диордиев В.Т., Кашкарёв А.А.

***Аннотация* – в статье приведены результаты внедрения АСУ технологического комплекса производства комбикормов в условиях хозяйств на основе имитационной модели технологического процесса. Рассмотрена функциональность АСУ на основе сети Петри.**

CONSIDERED FUNCTIONS ACS TECHNOLOGICAL COMPLEX PRODUCTION MIXED-FODDERS

V. Diordiev, A. Kashkarov

Summary

The article contains results implementing ACS technological complex production mixed-fodders in a farm based on simulation model of the process. Considered functions ACS on the basis of Petri nets.

УДК 621.3:663/635.001.73

МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНЕ СОРТУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ЕМП

Куценко Ю.М., к.т.н.,
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-31-59, e-mail: kucenkoUA@mail.ru
Лукашенко М.І., інженер
Дніпропетровський державний аграрний університет
Тел/факс: (056) 774-08-71

Анотація **– робота присвячена аналізу теоретичних положень та практичним випробуванням пристрою МГД сепарації.**

Ключові слова **– магнітогідродинамічна сепарація, енергія ЕМП, плоди сільськогосподарських культур.**

Постановка проблеми. Головним завданням виробника сільськогосподарської продукції є максимальне збереження корисних властивостей і якостей та доведення її до споживача. Був проведений порівняльний огляд науково-технічної літератури з питань застосування енергії електромагнітних полів в технологічних процесах переробки сільськогосподарської продукції [1]. Огляд показує безумовний інтерес до нових технологій - у застосуванні різних електромагнітних явищ в процесі переробки будь якої сільськогосподарської сировини.

Науковцями розроблені кількісні залежності електричних оптичних, акустичних і теплових характеристик, встановлено в широкому діапазоні вимірювання контролюємих величин, властивостей, складу агропродукції і зовнішніх впливів: частота електромагнітних полів – від 0 до 10^{16} Гц, їх напруженість – від 1 до 10^{15} В/м, частота акустичних коливань – від 20 Гц до 30 МГц, температура – від 0 до 100 °С, різні освітленості, вологість, тиск тощо. Створені зразки електричних, електронно-оптичних пристроїв для сортування сільськогосподарської продукції за фракціями по цим показникам.

Виявлені при дослідженнях електрофізичні ефекти в біосередовищах необхідно використовувати для розробки нових енергозберігаючих технологій в рослинництві та тваринництві.

Аналіз останніх досліджень. Проведені дослідження впливу електромагнітних полів високої і надвисокої частоти на біологічні об'єк-

---

ти. Встановлено, що малі дози їх дії визивають стимулюючі прояв-лення, середні – стресові, а великі – пригнічують. Подальше збіль-шення дози приводить до їх загибелі.

Перехід від хімічних методів інтенсифікації рослинництва до ма-лоенергоємних електрофізичних є головним напрямом розробок, бага-то із яких доведені до практичного використання. Використання елек-тромагнітного поля розширяє функціональні можливості традиційних способів чистки, сортування, сушіння сировини та відкриває нові ефе-кти біотехнологічної та хімічної природи, різко знижує енерговитрати.

Вирощування овочів і фруктів, а також їх переробка, залишається однією з найбільше трудоємних галузей сільського господарства. Особливо це стосується виробництва томатів, які потребують значних витрат праці і коштів під час сортування плодів за степенем зрілості після їх збирання. В більшості випадків сортування томатів викону-ється вручну. Тому велику важливість мають розробки і застосування автоматичних засобів післязбиральної обробки томатів.

В роботі [2] пропонується проводити сортування томатів в потоці рідини. Гідродинамічне сортування плодів томата може бути двох ви-дів: розподіл в потоці рідини на томати, які спливають на поверхню рідини, та які занурюються у рідину з додатковим механічним розпо-ділом шару, який спливає на поверхню.

Виходячи із теоретичних міркувань, була побудована лінія сор-тування плодів томату за степенем зрілості. Для заключного сорту-вання фракції „зелені плоди" доцільно використовувати фотоелект-ронний сортувальник.

В [3] приведена схема конструкція лінії для сортування плодів томату за ступенем зрілості, яка використовує гідродинамічний та фо-тоелектричний сортувальники. В [4] описується гідравлічний класифі-катор томатів за ступенем зрілості, який дозволяє збільшити точність гідродинамічного сортування плодів. При цьому плоди необхідно по-давати в гідролоток з таким розрахунком, щоб вони спливали в сорту-вальній зоні в один шар. В статті [5] описано фотометричний пристрій для автоматичного сортування томатів, який дозволяє сортувати їх за ступенем зрілості: червоні, бурі, зелені. Установка випробована. В ро-боті [6] пропонується розроблений і виготовлений пристрій для роз-поділу плодів томату на 5 фракцій за ступенем зрілості.

Аналіз сортувальних пристроїв томатів за степенем зрілості до-зволяє зробити висновок про їх відносну складність за будовою, що потребує подальшого удосконалення.

Формування цілей статті. Розробка альтернативних ресурсозбе-рігаючих технологій на основі функціональної нелінійності, квантово-механічних перетворень та нанотехнологічної спорідненості процесів обробки агросировини. Метою подальших досліджень є вивчення дії електромагнітного поля на плоди як на фізичний об’єкт.

Основна частина. У роботі пропонується альтернативний магнітогідродинамічний сортувальник, принцип дії якого заснований на виникненні додаткової до архімедової електромагнітної сили внаслідок взаємодії протікаючого через електропровідну рідину електричного струму з магнітним полем [7]. В якості електропровідної рідини можна використовувати розчини різноманітних солей у воді, наприклад, хлористого натрію. Такий розчин найбільш сприятливий для сортування сільськогосподарської продукції, так як не шкідливий і має невелику вартість. Слід зазнати, що магнітногідродінамічне сортування дозволяє сортувати не тільки з густиною, більшою за густину рідини, а навіть продукцію з густиною меншою густини розчину.

У теоретичному плані використовується математичний апарат для дослідження руху фізичного тіла в ламінарній рідині [2] з наданням додаткових умов при дії електричного та магнітного полів на провідну речовину.

Рух плоду в рідині визначається диференційними рівняннями:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = m\frac{dv_x}{dt} = R, \tag{1}$$

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = m\frac{dv_y}{dt} = P - G - F_{\partial} \pm \Delta F, \tag{2}$$

де m – маса плоду, кг;

x, y – координати плоду через час t після початку спливання/занурення, м;

v_x, v_y – вертикальна та горизонтальна складові швидкості спливання/занурення плоду, м/с;

R – сила дії струменю потоку на плід, Н;

P – виштовхувальна сила, Н;

G – сила тяжіння плоду. н;

F_{∂} – гідродинамічний опір, Н;

ΔF – додатна або від’ємна сила до виштовхувальної сили, що додатково діє на плід зі сторони електромагнітного поля у провідній речовині, Н

$$\Delta F = \alpha BjV = \frac{\sigma}{\rho}[EB], \tag{3}$$

де α – коефіцієнт(чисельно менший одиниці), який враховує зниження теоретичної величини електромагнітної сили;

B – індукція магнітного поля, Тл;

j – густина струму в провідній рідині, А/м^2;

V - об’єм плоду, м^3.

Для плодів кулеподібної форми:

$$m\frac{dv_x}{dt} = C_x S\rho_p (v_p - v_x)^2 , \tag{4}$$

$$m\frac{dv_y}{dt} = \frac{mg\rho_p}{\rho_n} - mg - C_x S\rho_p v_y^2 \pm \alpha BjV , \tag{5}$$

де C_x- коефіцієнт лобового опору плода в рідині;
S- переріз плоду в площині, яка перпендикулярна напрямку руху, м^2;
ρ_p – густина рідини, кг/м^3;
v_p - швидкість руху рідини, м/с;
g – прискорення вільного падіння, м/с^2;
ρ_n – щільність плоду, кг/м^3.

Якщо прийняти, що плід до моменту сплиття/занурення придбав швидкість $v_x = v_p$, то рівняння (4) має вигляд

$$\frac{dv_x}{dt} = 0 \text{, а } x = v_p t . \tag{6}$$

Перетворимо рівняння (5):

$$\frac{dv_y}{dt} = g(\frac{\rho_p}{\rho_n} - 1) - \frac{C_x S\rho_p v_y^2}{m} \pm \frac{\alpha BjV}{m} , \tag{7}$$

$$\frac{dv_y}{dt} = g(\frac{\rho_p}{\rho_n} - 1) - \frac{C_x S\rho_p v_y^2}{m} \pm \rho_n^{-1}\alpha Bj . \tag{8}$$

Позначимо:

$$a = g(\frac{\rho_p}{\rho_n} - 1) \pm \rho_n^{-1}\alpha Bj ,$$

$$b = \frac{C_x S\rho_p v_y^2}{m} .$$

Тоді рівняння (8) можна записати у вигляді

$$\frac{dv_y}{dt} = a - bv_y^2 . \tag{9}$$

Інтегруємо рівняння (9):

$$\int \frac{dv_y}{(a - bv_y^2)} = \int dt , \tag{10}$$

$$\frac{1}{2\sqrt{ab}} \ln\left|\frac{\sqrt{ab} + v_y b}{\sqrt{ab} - v_y b}\right| = t + \text{C}. \tag{11}$$

Так як $v_y\big|_{t=0} = 0$, то C = 0, тоді

$$\frac{1}{2\sqrt{ab}} \ln\left|\frac{\sqrt{ab} + v_y b}{\sqrt{ab} - v_y b}\right| = t . \tag{12}$$

Перетворимо рівняння (12) і визначимо швидкість сплиття/занурення плоду в рідині:

$$v_y = \sqrt{\frac{a}{b}}\frac{(e^{2t\sqrt{ab}}-1)}{e^{2t\sqrt{ab}}+1)}, \tag{13}$$

$$v_y = (\frac{a}{b})^{\frac{1}{2}} th(\sqrt{ab}t). \tag{14}$$

Після інтегрування рівняння (14) по переміщенню y, одержимо

$$y = \frac{1}{b}\ln ch(\sqrt{ab}t). \tag{15}$$

Тоді параметричні рівняння руху плоду в потоці рідини, який близький до ламінарного, буде мати вигляд:

$$x = v_p t, \tag{16}$$

$$y = \frac{1}{b}\ln ch(\sqrt{ab}\frac{x}{v_p}). \tag{17}$$

Звідси рівняння траєкторії спливання/занурення плоду в потоці рідини має вигляд

$$y = \frac{m}{C_x S\rho_p}\ln ch(\sqrt{\frac{(g(\rho_p-\rho_n)\pm\alpha Bj)C_x S\rho_p}{\rho_n m}}\frac{x}{v_p}). \tag{18}$$

З рівняння видно (18), що траєкторія спливу/занурення плоду з однаковою щільністю залежить від масово-розмірних характеристик плодів, а також електромагнітних параметрів МГД сепаратора.

В роботі [8] приведено вираз для розрахунку електромагнітної системи МГД сепаратора.

$$P = \frac{4\pi B^2\rho_1 L\left(R^2+r^2\right)}{\left(\mu\mu_0 L\ln\left(\frac{2R+\sqrt{4R^2+L^2}}{2r+\sqrt{4r^2+L^2}}\right)\right)^2} + \left(\frac{f}{\alpha B}\right)^2\rho_2 L r^2, \tag{19}$$

де P_1 - потужність втрат в електромагніті, Вт;

$\rho_1=\rho/k_3$ - приведений питомий опір обмотки;

ρ - питомий опір міді, ом м;

k_3 - коефіцієнт заповнення перерізу обмотки міддю;

j_2 - густина струму в рідині, А/м^2;

ρ_2 - питомий опір рідини, ом м;

α - коефіцієнт виштовхуючої сили.

B- індукція магнітного поля, Тл;

μ_0, μ, - магнітна стала та проникність середовища, Гн/м;

L- довжина електромагніту, м;

r - внутрішній радіус електромагніту, м.

Графічне рішення цього рівняння приведено на рис. 1 [9]. Рішення отримано для наступних умов: величина додаткової об'ємної сили 1000 Н/м^3; питомий електричний опір розчину становить 14,9 Ом см, що відповідає концентрації хлористого натрію 5%; об'єм робочої зони становить 10×10^{-3} м^3. Зі зменшенням електричного опору розчину до

6,9 Ом см (15% розчин хлористого натрію) споживана потужність зменшується до 6000 Вт.

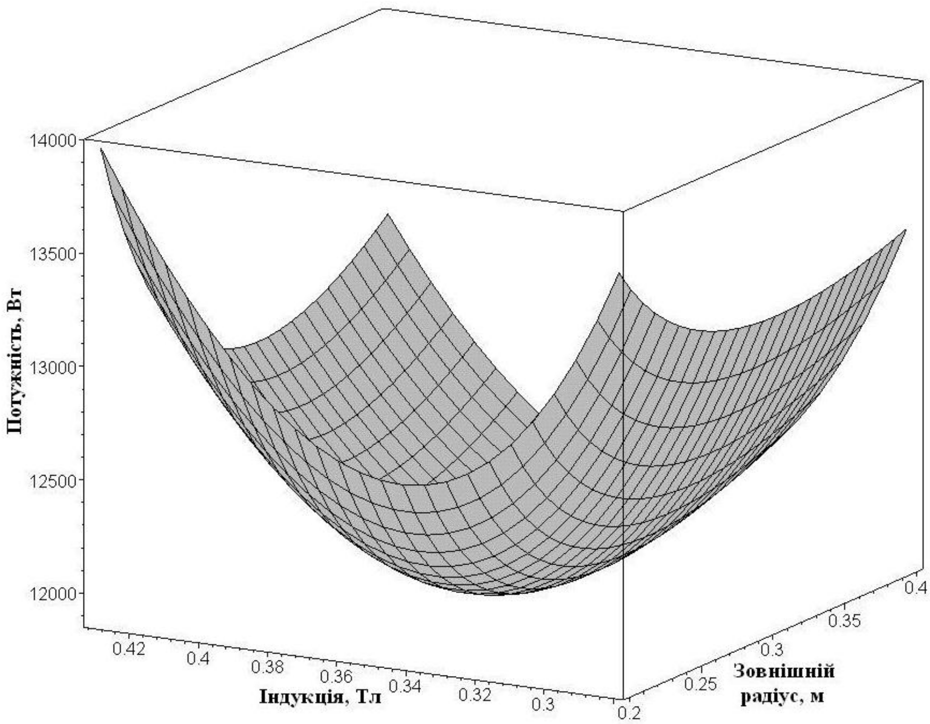


Рис. 1. Залежність спожитої потужності від індукції магнітного поля та зовнішнього радіусу соленоїду електромагніту.

З аналізу рішення витікає, що існує мінімум спожитої потужності, який визначається як розмірами соленоїду, так і величиною індукції магнітного поля. В нашому випадку оптимальне значення індукції складає 0,35 Тл при зовнішньому діаметрі електромагніта 0,31 м. При цьому споживана потужність рівна 12000 Вт або 1200 Вт/дм^3.

Крім того, мінімум функції потужності витрат електроенергії при підвищенні об'ємної сили і питомого опору рідини зсувається в бік підвищення індукції магнітного поля, при цьому зростають і самі витрати. З нахилу кривих до і після мінімуму видно, що відхилення від оптимуму енергетично більш вигідне у бік збільшення індукції магнітного поля, ніж підвищення густини струму у робочій зоні сепаратора.

Отже, електромагнітні параметри МГД сепаратора впливають на:

- виштовхувальну силу, яка діє на плід;
- траєкторію руху плодів;
- розрахунок енергетичних характеристик соленоїду магнітної системи.

Лабораторні випробування дослідного зразку магнітогідродинамічного сортувального пристрою.

Був змонтований експериментальний зразок МГД сепаратора, який складається із ємності 1, яка заповнена провідною рідиною, стінок 2, до яких прикладається постійна напруга, стінки 3 виконані у вигляді сталих магнітів, магнітну індукцію яких можна змінювати у певних межах. Перфоровані перетинки 4 дозволяють значно зменшити вихрові збурення провідної рідини при проведенні дослідів з кульками – імітаторами. Струмопідводи 5 дозволяють підвести напругу до провідної рідини. У якості провідної рідини використовується 10% розчин хлористого натрію. У якості імітатора плодів використовувалася непровідна кулька діаметром 2,75 см щільністю 1,1 г/см^3. Для вимірювань електромагнітної сили використовуються ваги з точністю вимірювань до 1 мг. Індукція магнітного поля змінювалася у межах 0,2...0,5 Тл ступеньово. Була побудована залежність додаткової електромагнітної сили *ΔP*, яка діє на кульку – імітатор, від струму I, який проходить через провідну рідину, при сталому значенні індукції магнітного поля *B* рис.2. Експериментальні дані приведені в таблиці 1.

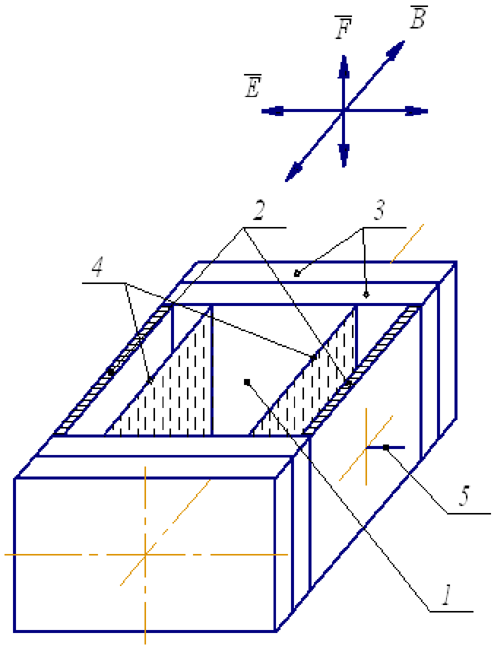


Рис. 2. Конструкція МГД сепаратора.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень

I, A	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,2	1,4	1,6
ΔP, г.	71,129	71,131	71,133	71,140	71,149	71,157	71,160	71,161	71,162
I, A	1,4	1,2	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	-
ΔP, г.	71,160	71,154	71,146	71,133	71,128	71,117	71,116	71,113	-

Якщо провідна або непровідна частинка знаходиться у ламінарному потоці рідини і при цьому спливає, то її рух описується диференційними рівняннями:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = m\frac{dv_x}{dt} = F_x; \tag{20}$$

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = m\frac{dv_y}{dt} = F_A - P - F_y \pm \Delta F_e, \qquad (21)$$

$$\Delta F_e = \frac{\sigma}{\rho}[EB] \qquad (22)$$

де F_x- сила Архімеда, яка діє на частинку;
P - сила тяжіння частинки;
F_y- сила гідродинамічного опору, яка діє на частинку;
$\Delta F_в$- додатна або від'ємна сила до архімедової сили зі сторони електромагнітного поля;
σ, ρ - провідність і густина рідини, відповідно;
E - напруженість електричного поля;
B - індукція магнітного поля.

На етапі лабораторних досліджень схема була спрощена і досліди проводилися у нерухомій провідній рідині (розчині кухонної солі у воді), яка знаходиться в однорідному магнітному полі, що утворене сталими магнітами. При цьому система рівнянь буде мати вигляд:

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = m\frac{dv_y}{dt} = F_A - P - F_y \pm \Delta F_e, \qquad (23)$$

$$\Delta F_e = \frac{\sigma}{\rho}[EB]. \qquad (24)$$

Швидкість спливання для такого випадку визначається інтегруванням рівняння за часом:

$$v_y = \int (F_A - P - F_y \pm \Delta F_e)\frac{1}{\mathrm{m}}dt\,, \qquad (25)$$

$$\Delta F_e = \frac{\sigma}{\rho}[EB]. \qquad (26)$$

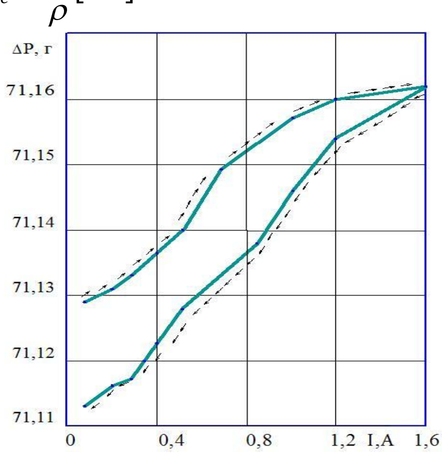


Рис. 3. Залежність електромагнітної сили від величини струму.

Привертає увагу, що графік (рис. 3) має дві галузі: пряму і зворотну. В певних межах зазначені галузі мають вигляд прямої лінії, що говорить про пропорційну залежність додаткової сили від сили струму через провідний розчин.

Таким чином, є можливість прогнозувати межі щільностей плодів овочів та фруктів для їх сепарації у провідній рідині. Для прямої галузі додаткова сила складає приблизно 38 Н/м^3, а для зворотної – 45 Н/м^3. Для збільшення меж зміни додатної сили необхідно провести експерименти з різним набором діючих фізичних факторів.

Були підготовлені непровідні кульки - імітатори різних щільностей у межах 0,86...1,1 г/см^3 з різними діаметрами від 6 мм до 30 мм.

У дослідах з непровідними кульками з різними діаметрами від 3 мм до 12 мм і з різними щільностями було досягнуто чіткого реагування їх на зміну відносної густини рідини. В залежності від напряму проходження електричного струму через робочий розчин кульки занурювалися або спливали на поверхню.

Проводилися вимірювання сил, які діють на кульки, що занурювалися у провідну рідину під дією електричного і магнітного полів. Визначили підходи для розрахунку електричних потужностей, які може споживати магнітогідродинамічний сортувальник.

Висновок. Електромагнітне поле діє на агросировину, як на фізичний об’єкт, з додатною / від'ємною до архімедової силою; додатна / від'ємна сила, яка діяла на імітатор плоду в процесі досліджень складала, в середньому - 42 Н/м^3, що відповідає щільності плодів 952…1042 кг/м^3.

Складені рівняння траєкторії спливання/занурення плодів у ламінарній провідній рідині дозволяють розрахувати розмірні параметри МГД сепаратора (довжину та переріз сортувальної зони); оцінити енергетичні характеристики соленоїду магнітної системи сепаратора.

Необхідно провести додаткові дослідження МГД сепаратора з метою розширення меж зміни додатної/ від'ємної сили з різним набором діючих фізичних факторів.

Література

1 *Куценко Ю.М.* Застосування енергії ЕМП в технологічних процесах переробки сільськогосподарської продукції [Електронний ресурс]/ *Ю.М. Куценко, М.І. Лукашенко*// «Наукові доповіді НАУ». - К.: НАУ. – 2006-1(2). Випуск 2.- С. 20-23. – Режим доступу: http://www.nbuv.gov.ua/e-Journals/nd/2006-1/06kumpap.pdf

2 *Тарасенко В.В.* Гидродинамическое сортирование плодов томата по степени зрелости/ *В.В. Тарасенко, В.П. Медведев* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1986. - №11. – С. 29 – 30.

3. *Тарасенко В.В.* Линия для сортирования плодов томата по степени зрелости/ *В.В. Тарасенко, А.И. Орцис* // Картофель и овощи. – 1986. - №6. – С. 41 – 42.

4. *Тарасенко В.В.* Гидравлический классификатор томатов по степени зрелости/ *В.В. Тарасенко* // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1991. - №3. – С. 32-34.

5. *Бородин И.Ф.* Фотометрическое устройство для автоматической сортировки томатов/ *И.Ф. Бородин, А.К. Гасанов* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1979. -№11. – С. 25 -26.
6. *Богун В.П.* Сортирование томатов по спелости/ *В.П. Богун* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1974. - №4. – С. 44 -45.
7. *Небренчин А.М.* Исследование моделей магнитогидродинамических сепараторов, питаемых переменным током / *А.М. Небренчин* // Сб. Техническая электромагнитная гидродинамика. – Донецк: Металлургия, 1965.- №2 – с.325 – 341
8. *Березняк О.О.* Розрахунок електромагнітної системи магнітогідродинамічного сепаратора /*О.О. Березняк* // Збагачення корисних копалин. НГА України. Науково - технічний збірник - 1998.– №1(42). – С. 24-29.
9. *Березняк О.О.* Магнітодинамічна сепарація матеріалів в розчині. /*О.О. Березняк, М.І. Лукашенко* // Геотехнічна механіка: Між від. зб. наук. праць Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 75. – С. 268-271.
10. *Лубко Д.В.* Обґрунтування параметрів і режимів роботи гідродинамічного сортувальника плодів томатів за ступенем зрілості комбайнових зборів: автореф. дис. канд. техн. наук:05.05.11/ *Д.В. Лубко*: ТДАТА.- Мелітополь; 2005.- 24 с.

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СОРТИРОВКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ЭМП

Куценко Ю.Н., Лукашенко Н.И.

Аннотация **– работа посвящена анализу теоретических положений и практическим испытаниям устройства МГД сепарации.**

MAGNETOHYDRODYNAMIC SORTING OF AGRICULTURAL PRODUCTS USING ELECTROMAGNETIC ENERGY

Ju. Kushenko , N. Lukashenko

Summary

The paper analyzes the theoretical principles and practical testing device MHD separation.

УДК [628.87:621. 234]+[681.5:001.827]

АДАПТИВНА СИСТЕМА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ ТЕПЛИЦІ ЯК ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ

Сабо А.Г., к.т.н.
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-57-97

***Анотація* – в роботі обґрунтована можливість створення моделі теплиці для наступної побудови системи управління мікрокліматом захищеного ґрунту на основі адаптивної системи з використанням принципів нечіткої логіки. Наведено приклад отримання моделі, що пов'язує температуру в теплиці з основними збурюючими впливами.**

***Ключові слова* – теплиця, мікроклімат, температура, модель, нечітка логіка, ідентифікація, адаптивна система.**

Постановка проблеми. Відомо, що галузь тепличного овочівництва є чи не найбільш енергоємною серед усіх галузей сільського господарства. Наприклад, зараз у країнах помірного клімату на 1 га зимових теплиць витрачається до 3 тис. тон умовного палива на рік, а на виробництво однієї тони продукції йде від 100 до 350 ГДж теплової енергії [1]. Між тим, постійне підвищення цін на енергоносії суттєво стримує нарощування площ споруд захищеного ґрунту. Саме тому подальше нарощування площ споруд захищеного ґрунту, до якого спонукає недостатнє забезпечення населення України овочевою продукцією, особливо у зимовий період, що суттєво знижує продовольчу безпеку країни, конче потребує зменшення питомого енергоспоживання цими об'єктами. Одним з основних шляхів зменшення енергоспоживання тут є вдосконалення систем управління параметрами мікроклімату. Слід згадати, що робота таких систем управління ускладнена наявністю численних збурюючих факторів а також зміною параметрів теплиці як об'єкту управління під час роботи як внаслідок зміни цих параметрів під дією згаданих збурюючи факторів, так і при зміні параметрів рослин, що вирощуються у теплиці. Одним з найбільш перспективних шляхів для побудови систем управління є використання моделей теплиці як об'єкту управління, що особливо важливо для систем з використанням принципу управління «за збуренням»,

---

які мають кращу швидкість реакції, а отже, і дозволяють досягти більшої точності підтримання параметрів мікроклімату, що в свою чергу дозволяє досягти більшої врожайності, а отже, і зниження питомої енергоємності продукції [2-6].

Між тим, більшість моделей, що отримується з цією метою, як правило можуть бути використані для застосування лише з певними типами теплиць або навіть для використання з окремими конкретними теплицями, а тому не мають універсального застосування, тобто використані на них технічні засоби, принципи управління та програмне забезпечення не можуть бути використані на іншому об’єкті без суттєвої переробки та перенастроювання, що здорожує самі системи управління, подовжує період налагодження систем та ускладнює навчання персоналу [2,3,6]. До того ж такі моделі як правило не є достатньо точними через зазначену вище високу вірогідність зміни параметрів об’єкту управління при його експлуатації.

Аналіз останніх досліджень. Проблема отримання моделей об’єктів управління, зокрема і теплиць, є темою багатосторонніх досліджень [2-10]. Слід зазначити, що переважно для розробку моделей теплиць використовують теоретичні методи або методи активного експерименту. Використання традиційних методів активного експерименту утруднюється великим різноманіттям збурюючи факторів і надзвичайною складністю підтримання вхідних факторів на належному рівні при проведенні експериментів. До того ж такі методи є помітно дорожчими, ніж теоретичні. Теоретичні побудови моделей ведуть з використанням основних фізичних законів, що описують процеси, які відбуваються в спорудах захищеного ґрунту, в основному балансів потоків речовини та енергії. Проте слід зазначити, що точність таких моделей невелика, оскільки в теплицях одночасно відбувається кілька досить складних процесів тепломасопереносу при наявності численних періодичних і детермінованих збурюючи факторів, що тісно пов’язані між собою, що суттєво ускладнює побудову точних моделей [2,3,6]. Використання методів обчислювальної термодинаміки дозволяє підвищити точність теоретичних моделей, однак отримані моделі тісно прив’язані до конкретного об’єкту і не є доступними для виробників, до того ж їх точність суттєво залежить від точності початкових параметрів для розрахунку, отримання яких потребує проведення активних експериментів і знову ж таки не гарантує незмінності параметрів моделі в процесі експлуатації системи управління [5,7,8].

Відносно невелика кількість моделей була отримана з використанням досягнень теорії ідентифікації систем, що пояснюється тим, що через складності лінеаризації та нестабільність параметрів об’єкту застосовувати традиційні методи, наприклад, метод найменших квадратів, не є можливим [7,10]. Перспективним шляхом є використання для ідентифікації нейронних мереж, однак через досить тривалий час навчання систем ідентифікації, погану збіжність алгоритмів та непрозорість систем їх використання є досить обмеженим [6,9]. Також обмежене використання мають звичайні методи нечіткої логіки, які хоч і дозволяють використати експертні оцінки, проте не мають можливості для безпосередньої корекції правил при роботі системи в цілому. Саме це і обумовило вибір адаптивної системи ідентифікації на основі використання нечіткої логіки, яка дозволяє як використовувати попередні експертні знання, так і провадити корекцію правил висновку під час змін самих вхідних і вихідних правил, тобто навчати систему, при цьому вибір початкових параметрів є обґрунтованим з точки зору фізичних моделей і законів на відміну, наприклад, від використання нейронних мереж, для яких такий вибір є випадковим, що дозволяє прискорювати процес навчання системи та досягати значно більшої універсальності отриманого результату у вигляді моделей [6-11].

Мета публікації. Таким чином, постає задача пошуку універсальних принципів для побудови моделей теплиць для використання в системах управління параметрами мікроклімату споруд захищеного ґрунту.

Основні результати досліджень. При пошуку принципів для побудови моделей теплиць як об’єктів управління з метою побудови систем управління мікрокліматом споруд захищеного ґрунту найбільшу увагу привертають так звані універсальні апроксиматори, зокрема нечітка логіка, оскільки вона дозволяє найбільш швидко враховувати наявний людський досвід, що має велике значення саме для цієї галузі [5,11], а також є найбільш придатною для адаптації в нових умовах, наступної модернізації в сенсі зміни меж контрольованих чи регульованих величин, збільшення переліку параметрів та врахування додаткових вхідних та збурюючих факторів [4-7]. До того ж, розробка систем управління на базі принципів нечіткої логіки полегшується наявністю спеціалізованих програмних пакетів (таких, як Matlab та FuzyTech) та наявністю досвіду застосування цих принципів в інших галузях [11].

В даному випадку було поставлено задачу побудови моделі залежності температури повітря в теплиці T від основних збурюючи факторів, за які було прийнято наступні: температуру зовнішнього повітря A1, надходження сонячної радіації до теплиці A2, дефіциту тиску водяної пари A3 та сили вітру назовні A4.

Модель має вигляд дискретної нелінійної системи, що описується функціональною залежністю

$$T(i) = F(A1(i), A2(i), A3(i), A4(i), T(i-1)). \qquad (1)$$

Сам процес отримання моделі можна розділити умовно на дві частини:

1) отримання початкових параметрів системи на основі нечіткої логіки, що виконується при використанні основних фізичних законів та експертних знань;
2) корекція правил висновку отриманої системи в режимі реального часу.

На першому етапі було визначено список основних збурюючи факторів та визначено початкові значення центрів кожної з функцій належності (табл. 1). Було обрано вид функцій належності – гаусові функції [11].

Таблиця 1 – Вхідні та вихідні величини

	Позначення	Назва	Одиниці вимірювання	Початкове середнє значення відповідних рівнів				
				1	2	3	4	5
Збурюючі впливи	**A1**	Температура повітря назовні	°C	-10	-3	+4	+11	+18
	A2	Сонячна радіація	Вт/м^2	50	150	300	500	700
	A3	Дефіцит тиску водяної пари	У.о.	-0,5	0	0,5	1,0	1,5
	A4	Сила вітру	м/с	2	7	12	17	22
Вихідна величина	**T**	Температура повітря в теплиці	°C	10	15	20	25	30

Слід зазначити, що хоча теоретично зазначена система має мати 5^5 правил висновку, але попередньо проведені досліди щодо зв'язку між параметрами [9] та наявність цілком зрозумілих фізичних звязків між окремими параметрами дозволяє значно скоротити список правил висновку. Зокрема, можна зауважити, що розбіжність між параметрами A1(i), A2(i) та T(i-1) не може перевищувати 2 рівнів і т.п. На основі зазначених факторів було залишено лише 20 висновку, які приведено тут:

IF A1(i)=5 & A2(i)=5 & A3(i)=5 & A4(i)=5 & T(i-1)=5 THEN T(i)=5
IF A1(i)=5 & A2(i)=4 & A3(i)=5 & A4(i)=5 & T(i-1)=5 THEN T(i)=5
IF A1(i)=5 & A2(i)=3 & A3(i)=5 & A4(i)=5 & T(i-1)=5 THEN T(i)=5
IF A1(i)=5 & A2(i)=3 & A3(i)=5 & A4(i)=5 & T(i-1)=4 THEN T(i)=5
IF A1(i)=4 & A2(i)=2 & A3(i)=4 & A4(i)=3 & T(i-1)=3 THEN T(i)=3
IF A1(i)=4 & A2(i)=3 & A3(i)=3 & A4(i)=3 & T(i-1)=3 THEN T(i)=4
IF A1(i)=4 & A2(i)=4 & A3(i)=3 & A4(i)=1 & T(i-1)=4 THEN T(i)=5
IF A1(i)=4 & A2(i)=1 & A3(i)=2 & A4(i)=5 & T(i-1)=4 THEN T(i)=4

IF A1(i)=3 & A2(i)=1 & A3(i)=3 & A4(i)=5 & T(i-1)=4 THEN T(i)=3
IF A1(i)=3 & A2(i)=2 & A3(i)=3 & A4(i)=4 & T(i-1)=3 THEN T(i)=2
IF A1(i)=3 & A2(i)=5 & A3(i)=2 & A4(i)=2 & T(i-1)=2 THEN T(i)=3
IF A1(i)=3 & A2(i)=1 & A3(i)=2 & A4(i)=4 & T(i-1)=3 THEN T(i)=2
IF A1(i)=3 & A2(i)=3 & A3(i)=3 & A4(i)=3 & T(i-1)=3 THEN T(i)=2
IF A1(i)=2 & A2(i)=4 & A3(i)=3 & A4(i)=2 & T(i-1)=3 THEN T(i)=3
IF A1(i)=2 & A2(i)=2 & A3(i)=2 & A4(i)=4 & T(i-1)=3 THEN T(i)=2
IF A1(i)=2 & A2(i)=4 & A3(i)=3 & A4(i)=1 & T(i-1)=2 THEN T(i)=3
IF A1(i)=1 & A2(i)=1 & A3(i)=1 & A4(i)=2 & T(i-1)=2 THEN T(i)=1
IF A1(i)=1 & A2(i)=3 & A3(i)=2 & A4(i)=5 & T(i-1)=2 THEN T(i)=1
IF A1(i)=1 & A2(i)=4 & A3(i)=3 & A4(i)=2 & T(i-1)=1 THEN T(i)=2
IF A1(i)=1 & A2(i)=5 & A3(i)=3 & A4(i)=2 & T(i-1)=3 THEN T(i)=3

На другому етапі проводилося настроювання системи в режимі реального часу при використанні ПК з наявною нечіткою моделлю, побудованою в середовищі Matlab з використанням системи Мамдані та методу дефузіфікації «центр мас» [11]. Загальна схема отримання моделі наведена на рисунку 1.

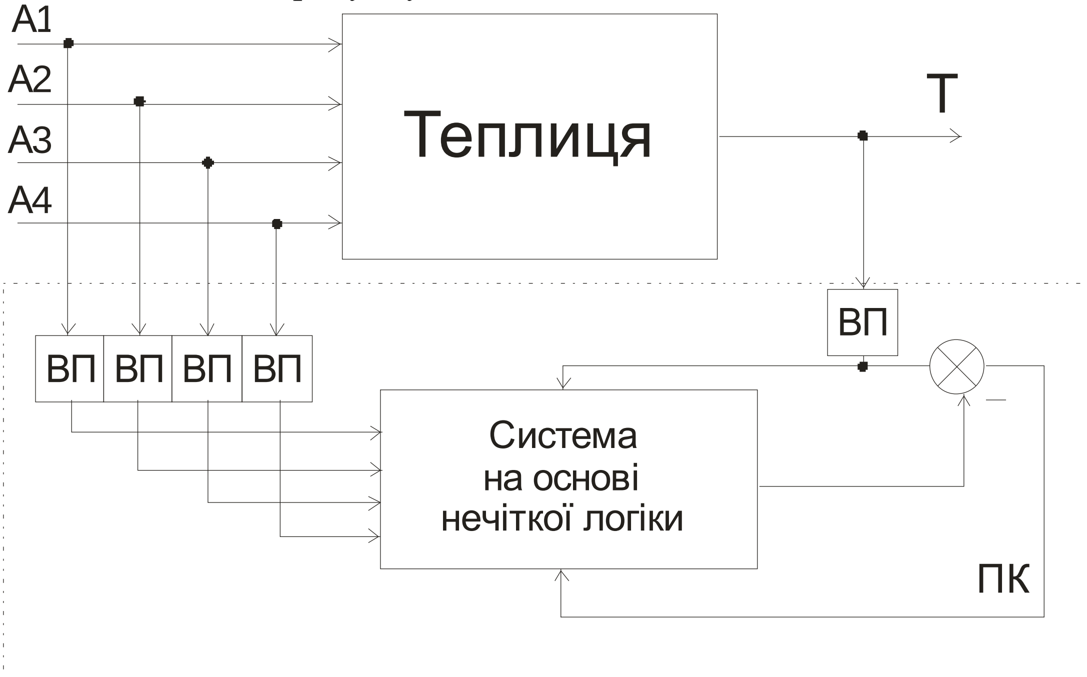


Рис. 1. Схема настроювання адаптивної системи на етапі 2.

Для даної системи функція належності має вигляд

$$F(x)=\frac{\sum_{n=1}^{N} C_n \prod_{m=1}^{M} K_{mn} \exp\left(-\left(\frac{x_m - C_{mn}}{W_{mn}}\right)^2\right)}{\sum_{n=1}^{N} \prod_{m=1}^{M} K_{mn} \exp\left(-\left(\frac{x_m - C_{mn}}{W_{mn}}\right)^2\right)}$$

де C_n – центр для вихідної нечіткої множини;
K_{mn} та W_{mn} – центри та ширина відповідних вхідних нечітких множин;
x_m – відповідні вхідні величини.

Ідентифікація значення вихідної величини йшла згідно виразу

$$T(i) = {}^{Y}\!/_{Z}, \tag{2}$$

у якому значення Y та Z визначалися наступним чином:

$$Y=\sum_{n=1}^{20} T_n(i)\left(\prod_{m=1}^{4} K_{mn} \exp\left(-\left(\frac{A_m(i)-A_{mn}(i)}{W_{mn}}\right)^2\right)\cdot K_{5n} \exp\left(-\left(\frac{T\ (i-1)-T_n(i-1)}{W_{5n}}\right)^2\right)\right),$$

$$Z=\sum_{n=1}^{20} \left(\prod_{m=1}^{4} K_{mn} \exp\left(-\left(\frac{A_m(i)-A_{mn}(i)}{W_{mn}}\right)^2\right)\cdot K_{5n} \exp\left(-\left(\frac{T\ (i-1)-T_n(i-1)}{W_{5n}}\right)^2\right)\right).$$

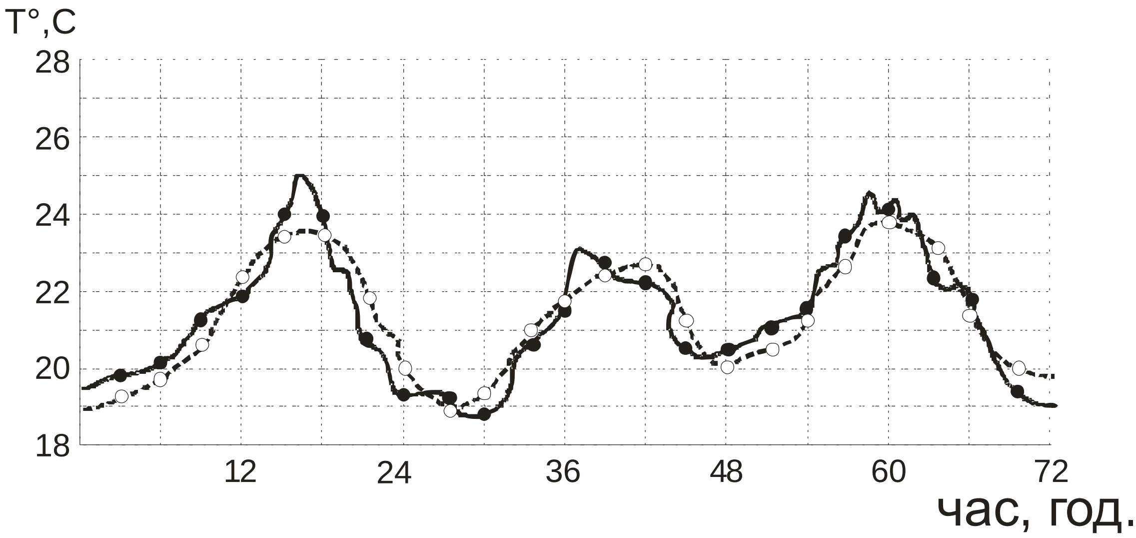


Рис. 2. Результати вимірювання (—●—) та прогнозування (--○--) значень температури повітря в теплиці при проведенні експерименту 2-4 січня 2011 р.

На рис. 2 наведено у порівнянні фактичні зміни температури повітря у теплиці та її прогнозовані значення на основі використання розробленої системи ідентифікації. Як бачимо, результати моделювання можна вважати цілком задовільними. Незначні розходження між моделлю та об’єктом спостерігаються головним чином при дуже швидких змінах збурюючи факторів. Вірогідно, ці розходження можна в подальшому зменшити при використанні усереднених значень від вимірювання температури та сонячної радіації в кількох точках об’єкту.

Висновки. Для отримання моделі теплиці як об’єкту управління для наступної розробки систем управління параметрами мікроклімату споруд захищеного ґрунту є доцільним використання принципів нечіткої логіки у системі ідентифікації в режимі реального часу, що дозволяє створити більш універсальні, зручні в користуванні та точні моделі для використання принципу управління «за збуренням» у системах управління у порівнянні з традиційними підходами.

Література

1. *Тихомиров А.В.* Энергетические показатели работы тепличных комбинатов / *А.В. Тихомиров, Е.К. Маркелова, Е.Ю. Черномурова* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2002. - №12. - С. 6-9.
2. *Van Stratten G.* Towards user accepted optimal control of greenhouse climate / *G. Van Stratten, H. Challa, F. Buvalda* // Comp. & Electron. in Agric. - 2000. - №26. - P. 221-238.
3. *Сабо А.Г.* Управління мікрокліматом споруд захищеного ґрунту як задача зменшення питомої енергоємності продукції/ *А.Г. Сабо* // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип. 19. – Мелітополь: ТДАТА, 2004. – С. 124-131.
4. *Рысс А.А.* Автоматическое управление температурным режимов в теплицах / А.*А. Рысс, Л.И. Гурвич*. - М.: Агропромиздат, 1986. - 128 с.
5. *Ерков А.А.* Микропроцессорная система управления микроклиматом в теплицах / *А.А. Ерков* // Техника в сельском хозяйстве. – 2005. - №3. – С. 23-27.
6. *Martin-Clouaire R.* A survey of computer-based approaches for greenhouse climate management / *R. Martin-Clouaire, P.J. Schotman, M.Tchamitchian* // Acta Horticulturae. - 1996. – V. 406. - P. 409-423.
7. *Sigrimis N.* Advances in greenhouse environment control / *N. Sigrimis, R. King* // Computers & Electronics in Agric. -2000. - №. 26(3). – P. 321-342.
8. *Сабо А.Г.* Універсальна система управління мікрокліматом споруд захищеного ґрунту на основі використання нечіткої логіки / *А.Г. Сабо, Р.В. Василішин, Д.М. Нестерюк* // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип. 43. – Мелітополь: ТДАТА, 2006. – С. 109-118.
9. *Seginer I.*. Neural network models of the greenhouse climate / *I. Seginer, T. Boulard, B.J. Bailey* //. J. Agr. Engng. Res., 1994. - № 59 - P. 203-216.

10. *Sigrimis N.* A linear model for greenhouse control / *N. Sigrimis, N. Rerras* // Trans. ASAE, 1996. - № 39(1) - P. 253-261.
11. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / *А.В. Леоненков.* – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ТЕПЛИЦЫ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ

Сабо А.Г.

***Аннотация* - в работе обоснована возможность создания модели теплицы для последующего синтеза системы управления микроклиматом на основе адаптивной системы с использованием принципов нечеткой логики. Приведен пример получения модели, которая связывает температуру в теплице с основными возмущающими воздействиями.**

ADAPTIVE FUZZY LOGIC SYSTEM FOR CREATION OF THE GREENHOUSE MODEL FOR TEMPERATURE CONTROL

A. Sabo

Summary

The options for the adaptive fuzzy logic system for greenhouse identification and modeling are the subject of the consideration. The result of the greenhouse modeling with main disturbances as inputs and greenhouse air temperature as output is given on the base of on-line experiment.

УДК 514.18

ЗАСТОСУВАННЯ ДОДАТКОВИХ УМОВ МОДЕЛЮВАННЯ У МЕТОДІ НА ОСНОВІ ВАРІАТИВНОГО ФОРМУВАННЯ РІЗНИЦЕВИХ СХЕМ КУТОВИХ ПАРАМЕТРІВ

Найдиш А.В., д.т.н.,
Спірінцев Д.В., к.т.н.
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-20-32

***Анотація* – пропонується використання різноманітних додаткових умов стосовно нової варіативної схеми згущення дискретно представлених кривих (ДПК) на основі кутових параметрів, а також розглядаються модифікації основного алгоритму методу згущення відповідно до цих додаткових умов.**

***Ключові слова* – варіативне дискретне геометричне моделювання, метод згущення, основний алгоритм згущення, різницеві схеми кутових параметрів, додаткові умови, кутові параметри.**

Постановка проблеми. Дослідження та побудова моделей кривих ліній і поверхонь, що описують досліджуване явище або процес, безумовно, є пріоритетним напрямом для науки і техніки. Класичні методи інтерполяції не завжди в змозі ефективно вирішити деякі практичні завдання, особливо якщо виникає необхідність у збільшенні кількості параметрів з метою дотримання додаткових вимог моделювання, а також завдання, пов’язані з рядом особливостей в геометрії як вихідної, так і результуючої ДПК (перехідні, прямолінійні ділянки, особливі точки ДПК). Тому проблема полягає у розробці нових геометричних схем та відповідних їм алгоритмів, які б вирішували ці питання. Крім того, необхідно, щоб вони мали значні можливості у корегуванні форми моделюємої кривої, дозволяли проводити її локальну корекцію, володіли значною швидкодією та простотою розрахунків, а також відповідали внутрішній геометрії вихідної ДПК.

Аналіз останніх досліджень. Проведені у рамках варіативного дискретного геометричного моделювання (ВДГМ) дослідження [1-6], показали ефективність розроблених методів дискретної інтерполяції для вирішення подібних завдань. При цьому основна увага дослідників була приділена розробці методів, що спираються на лінійні параметри [6]. Проте, останнім часом активізувалися дослідження з розробки методів, що враховують кутові параметри [2-5]. Це обумовлено тим, що кутові параметри мають ряд переваг перед лінійними [7].

Поряд з наявними перевагами, розроблені на сьогодні методи ВДГМ, що враховують кутові параметри [2-4], ще мають перспективи подальшого розвитку та досліджень які були розглянуті в роботах Найдиша В.М. та його учнів, у напрямку розширення можливостей керування (варіювання) формою моделюємої кривої та її локальної корекції. Тому розробка нових методів ВДГМ на основі моделювання кутових параметрів, за умови відсутності осциляції і дотримання додаткових умов задачі, є актуальною.

Формулювання цілей статті. Метою статті є застосування різноманітних додаткових умов стосовно нової варіативної схеми згущення, а також розгляд основного алгоритму згущення методу на основі варіативного формування різницевих схем кутових параметрів відповідно до цих умов.

Основна частина. Розглянемо фрагмент ДПК довільної конфігурації, заданої координатами $(x_i, y_i), i=\overline{0;n}$, своїх точок у глобальній системі координат (рис.1).

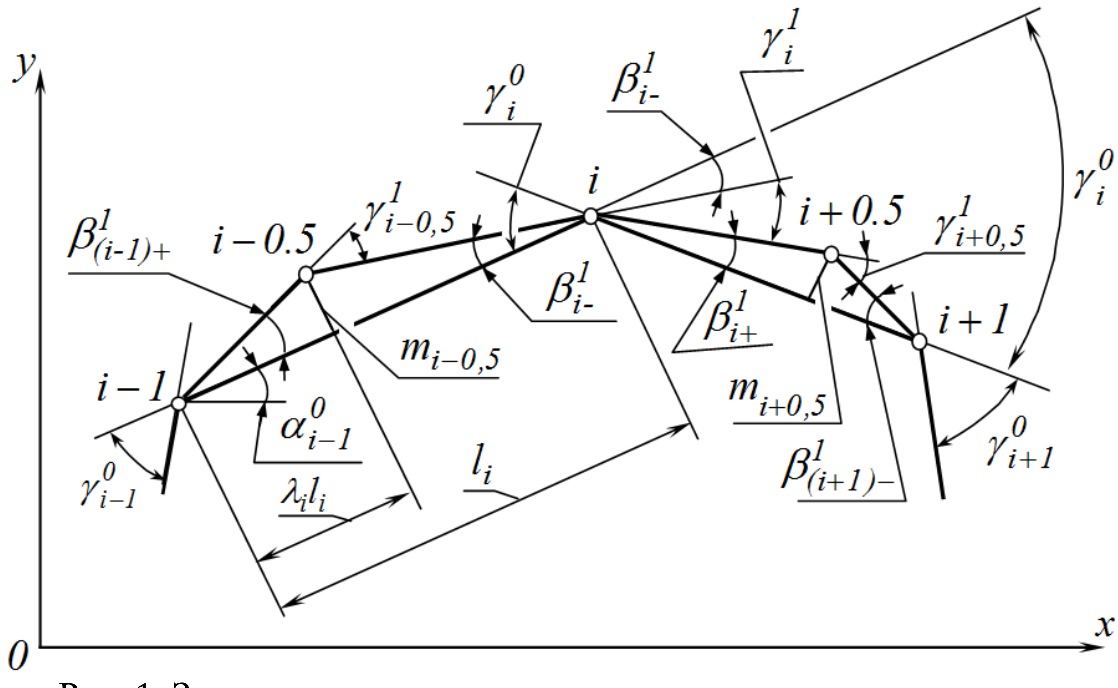


Рис. 1. Загальна кутова схема згущення.

У попередніх дослідженнях [7,8] нами було запропонована варіативна схема згущення на основі кутових параметрів:

$$(1-\eta_{i-1})\gamma_{i-0.5}^1+\gamma_i^1+\eta_i\gamma_{i+0.5}^1=\gamma_i^0, \quad i=\overline{1;n-1}, \qquad (1)$$

де γ_i^0, γ_i^1 – кути суміжності між ланками СЛЛ до і після першого кроку згущення (індекс угорі) в i-му вузлі ДПК;

$\gamma_{i+0.5}^1$ – кут суміжності у точці згущення $i+0.5$;

$\eta \in [0;1]$ – коефіцієнт співвідношення кутових параметрів;

$$\eta_i = \frac{\gamma_i^0}{\gamma_i^0 + \gamma_{i+1}^0}, \quad i = \overline{0;n-1}. \qquad (2)$$

Моделювання ДПК довільної конфігурації з використанням запропонованої варіативної схеми (1) можливо за рахунок накладання таких додаткових умов на співвідношення між кутами суміжності, які дозволяють зберігати геометричні властивості вихідної ДПК. Розглянемо наступні види додаткових умов:

1. Додаткові умови, що не приводять до формування різницевих схем, однак у порівнянні з існуючими схемами надають можливість управління формою згущеної кривої. Наприклад, γ_{min}^1, $\gamma_{cp.}^1$ або γ_{opt}^1 [2, 6, 7].
2. Додаткові умови, що призводять до формування різницевих схем першого порядку. Наприклад, додаткова умова (3), яка переносить співвідношення між кутами суміжності з вихідної на згущену ДПК.

$$\gamma_i^1 = \frac{\gamma_i^0}{\gamma_{i+1}^0} \cdot \gamma_{i+0,5}^1, \quad i = \overline{0;n-1}. \qquad (3)$$

3. Додаткові умови, що призводять до формування різницевих схем другого порядку. Це дозволяє збільшити кількість управляючих параметрів при управлінні формою моделюємої кривої. Наприклад, умова (4) згідно з якою кут суміжності у середній точці згущення $\gamma_{i+0,5}^1$ дорівнює сумі кутів у сусідніх точках згущення $\gamma_{i-0,5}^1$ та $\gamma_{i+1,5}^1$ з урахуванням коефіцієнтів η_i

$$(1-\eta_{i-1})\gamma_{i-0,5}^1 + \eta_{i+1}\gamma_{i+1,5}^1 = \gamma_{i+0,5}^1, \quad i = \overline{1;n-1}. \qquad (4)$$

Використання описаних додаткових умов можливо на основі використанням **основного алгоритму** розрахунку координат точок згущення методом варіативного формування різницевих схем кутових параметрів, який полягає у наступному.

1. Визначаються геометричні характеристики вихідної ДПК:
   – довжина ланок l_i

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}, \quad i = \overline{1;n}; \qquad (5)$$

   – кути суміжності γ_i^0 у вузлах до згущення

$$\gamma_i^0 = \pm arccos\left(\frac{a_1 a_2 + b_1 b_2}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2)\cdot(a_2^2 + b_2^2)}}\right), \quad i = \overline{1,n-1}; \qquad (6)$$

де «+» – для опуклої ДПК ($\gamma_i^0 < 0,\ i = \overline{0;n}$);

«–» – для увігнутої ДПК ($\gamma_i^0 > 0,\ i = \overline{0;n}$);

a_1, a_2, b_1, b_2 – коефіцієнти рівнянь прямих, на яких лежать ланки $(i-1, i)$ та $(i, i+1)$, $i = \overline{1, n-1}$ відповідно;

$a_1 = y_{i+1} - y_i$; $b_1 = x_i - x_{i+1}$; $a_2 = y_i - y_{i-1}$; $b_2 = x_{i-1} - x_i$,

де x_{i-1}, y_{i-1}, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1} – координати *i-1*, *i*, *i+1* вихідної ДПК.

– кути суміжності у першому γ_0^0 та останньому γ_n^0 вузлах ланок вихідної ДПК:
  – для незамкненої кривої

$$\gamma_0^0 = \gamma_1^0, \quad \gamma_n^0 = \gamma_{n-1}^0; \tag{7}$$

  – для замкненої кривої

$$\gamma_0^0 = \gamma_n^0 = \pm arccos\left(\frac{((x_1 - x_{n-1})^2 + (y_1 - y_{n-1})^2) - l_1^2 - l_n^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_n} \right); \tag{8}$$

– кут нахилу α_0 першої ланки до осі Ox:

$$\begin{cases} \alpha_0 = arcsin \dfrac{y_1 - y_0}{[0,1]}, \quad якщо \quad \Delta x_1 = [x_1 - x_0] > 0, \\ \alpha_0 = -180^0 - arcsin \dfrac{y_1 - y_0}{[0,1]}, \quad якщо \quad \Delta x_1 = [x_1 - x_0] < 0. \end{cases} \tag{9}$$

– кути α_i, $i = \overline{1, n-1}$

$$\alpha_i = \gamma_i + \alpha_{i-1}, \qquad i = \overline{1, n-1}. \tag{10}$$

2. Визначається конфігурація вихідної ДПК (опукла, увігнута, містить прямолінійні або перехідні ділянки) на підставі її дискретних геометричних характеристик [6].
3. Визначаються значення коефіцієнтів ηі згідно з (2).
4. Розраховуються кути суміжності $\gamma_i^1, i = \overline{1; n-1}$ і $\gamma_{i-0,5}^1, i = \overline{1; n}$ ланок згущеної ДПК.

Значення кутів суміжності у першому й останньому вузлах після згущення для незамкненої кривої визначаються згідно з (11)–(12), для замкненої кривої згідно з (13):

$$\gamma_0^1 = \gamma_0^0 - \eta_0 \cdot \gamma_{0.5}^1; \tag{11}$$

$$\gamma_n^1 = \gamma_n^0 - (1 - \eta_{n-1}) \cdot \gamma_{n-0.5}^1; \tag{12}$$

$$\gamma_0^1 = \gamma_n^1 = \gamma_n^0 - (1 - \eta_{n-1}) \cdot \gamma_{n-0.5}^1 - \eta_0 \cdot \gamma_{0.5}^1. \tag{13}$$

5. Розраховуються геометричні характеристики згущеної ДПК.

– коефіцієнти λ_i (відношення проекцій довжин ланок СЛЛ на відповідні хорди)

$$\lambda_i = \frac{tg[(1 - \eta_{i-1})\gamma_{i-0,5}^1]}{tg(\eta_{i-1} \cdot \gamma_{i-0,5}^1) + tg[(1 - \eta_{i-1})\gamma_{i-0,5}^1]}, \; i = \overline{1; n}; \tag{14}$$

– перевищення точок згущення над відповідними хордами

$$m^{1}_{i-0.5} = -l_i \cdot \lambda_i \cdot tg(\eta_{i-1} \cdot \gamma^{1}_{i-0.5}),\ i = \overline{1;n}; \qquad (15)$$

– кути нахилу ланок згущеної СЛЛ ДПК до осі Оx:

$$\alpha^{1}_{i} = \alpha_i - \eta_i \cdot \gamma^{1}_{i+0,5}, \qquad i = \overline{0, n-1},;$$
$$\alpha^{1}_{i+0,5} = \alpha_i + (1-\eta_i) \cdot \gamma^{1}_{i+0,5}, \qquad i = \overline{1; n-1}. \qquad (16)$$

– координати точок згущення:

$$\begin{aligned} x^{1}_{i-0,5} &= x_{i-1} + \sqrt{(l_i \cdot \lambda_i)^2 + (m_{i-0,5})^2} \cdot \cos(\alpha^{0}_{i-1} - \eta_{i-1} \cdot \gamma^{1}_{i-0,5}), \\ y^{1}_{i-0,5} &= y_{i-1} + \sqrt{(l_i \cdot \lambda_i)^2 + (m_{i-0,5})^2} \cdot \sin(\alpha^{0}_{i-1} - \eta_{i-1} \cdot \gamma^{1}_{i-0,5}). \end{aligned} \quad i = \overline{1; n}. \qquad (17)$$

6. Критерієм закінчення згущення є досягнення умови (18) на k-му кроці згущення

$$max\left|\gamma^{1}_{i+0,5}\right| \le \varepsilon, \quad i = \overline{1; n-1}, \qquad (18)$$

де $\varepsilon \ge 0$ – як завгодно мале наперед задане число.

При необхідності продовження згущення, точки ряду перенумеровуються і розрахунок повторюється. По досягненні цієї умови точки згущеної ДПК з'єднуються відрізками супровідної ломаної лінії (СЛЛ), що і вважається остаточною формою інтерполюючої кривої.

Пункт 4 даного алгоритму дозволяє розраховувати кути суміжності у точках згущення у залежності від виду використовуємих додаткових умов.

Наприклад, при використанні додаткової умови γ^{1}_{opt}, значення кутів суміжності у точках згущення розраховуються згідно виразу (19), а значення кутів згущення γ^{1}_{i} у вузлових точках розраховуються згідно з виразом (20):

$$\gamma^{1}_{i-0,5} = \frac{1}{2}\gamma^{0}_{opt},\ i = \overline{1,n},\ \text{де}\ \gamma^{0}_{opt} = \begin{cases} min\left(\gamma^{0}_{i-1}, \gamma^{0}_{i}\right), \gamma^{0}_{i} > 0, \\ (-1)\,min\left(\left|\gamma^{0}_{i-1}\right|, \left|\gamma^{0}_{i}\right|\right), \gamma^{0}_{i} < 0, \end{cases} \qquad (19)$$

$$\gamma^{1}_{i} = \gamma^{0}_{i} - (1-\eta_{i-1})\gamma^{1}_{i-0,5} - \eta_i \cdot \gamma^{1}_{i+0,5},\ i = \overline{1; n-1}. \qquad (20)$$

Розглянуті додаткові умови (19) раніше [2,6] застосовувались до схеми побудови точок згущення на серединних перпендикулярах відповідних ланок супровідної ломаної лінії ДПК. Використання цих додаткових умов у новій варіативній схемі згущення (1) змінює геометричну ідею побудови точок згущення. При цьому зберігаються всі переваги даного способу, але, у порівнянні зі схемою [2], з'являється можливість керування формою згущеної кривої за рахунок варіювання коефіцієнтом співвідношення кутових параметрів.

Для отримання різницевої схеми першого порядку з використанням додаткової умови (3), у пункті 4 даного алгоритму необхідно виконати наступну послідовність дій.

1. Підставляється вираз (3) у варіативну схему (1)

$$(1-\eta_{i-1})\gamma^{1}_{i-0,5}+\left(\frac{\gamma^{0}_{i}}{\gamma^{0}_{i+1}}+\eta_{i}\right)\gamma^{1}_{i+0,5}=\gamma^{0}_{i},\ i=\overline{1;n-1}. \quad (21)$$

2. З системи (21) визначаються залежності між кутами суміжності у точках згущення

$$\gamma^{1}_{i+0,5}=A_{i+0,5}-B_{i+0,5}\cdot\gamma^{1}_{i-0,5},\quad i=\overline{1;n-1}, \quad (22)$$

де $A_{i+0,5}=\dfrac{(\gamma^{0}_{i}+\gamma^{0}_{i+1})\cdot\gamma^{0}_{i+1}}{\gamma^{0}_{i}+2\gamma^{0}_{i+1}}$, $B_{i+0,5}=\dfrac{(\gamma^{0}_{i}+\gamma^{0}_{i+1})\cdot\gamma^{0}_{i+1}}{(\gamma^{0}_{i-1}+\gamma^{0}_{i})\cdot(\gamma^{0}_{i}+2\gamma^{0}_{i+1})}$.

3. Один з кутів суміжності у точці згущення обирається в якості управляючого параметру, після чого виражаються усі кути згущення в точках згущення через обраний управляючий параметр.
4. Накладаються умови відсутності осциляції (23)-(24) на отримані в попередньому пункті залежності:

   – для опуклої ДПК:

$$\gamma^{1}_{i}<0 \text{ и } \gamma^{1}_{i+0,5}<0,\ i=\overline{1;n-1}; \quad (23)$$

   – для увігнутої ДПК:

$$\gamma^{1}_{i}>0 \text{ и } \gamma^{1}_{i+0,5}>0,\ i=\overline{1;n-1}. \quad (24)$$

5. Вирішується отримана система нерівностей відносно управляючого параметра. З відрізку рішень вибирається його допустиме значення.
6. Розраховуються значення інших кутів суміжності у точках згущення ($\gamma^{1}_{i+0,5}$, $i=\overline{0;n-1}$) шляхом підстановки значення управляючого параметра в отримані в п. 3 залежності. Значення кутів суміжності у вузлових точках ($\gamma^{1}_{i},i=\overline{0,n-1}$) знаходяться з виразу (3).

Особливістю даної схеми, по-перше, є її простота, оскільки у результаті рішення різницевої схеми маємо відрізок рішень, а не багатокутник (простіше в програмній реалізації), по-друге, дане додаткове умова не нав'язує згущеної ДПК якісь певні властивості, а переносить співвідношення між кутами суміжності з вихідної на згущену, зберігаючи при цьому її геометричні властивості. Недоліком даної схеми є зменшення кількості управляючих параметрів, що звужує можливості управління формою модельованої кривої.

Тестовий приклад (два кроки згущення) з використанням даної додаткової умови наведено на рис. 2.

Для отримання різницевої схеми другого порядку з використанням додаткової умови (4), у пункті 4 основного алгоритму згущення виконується наступна послідовність дій.

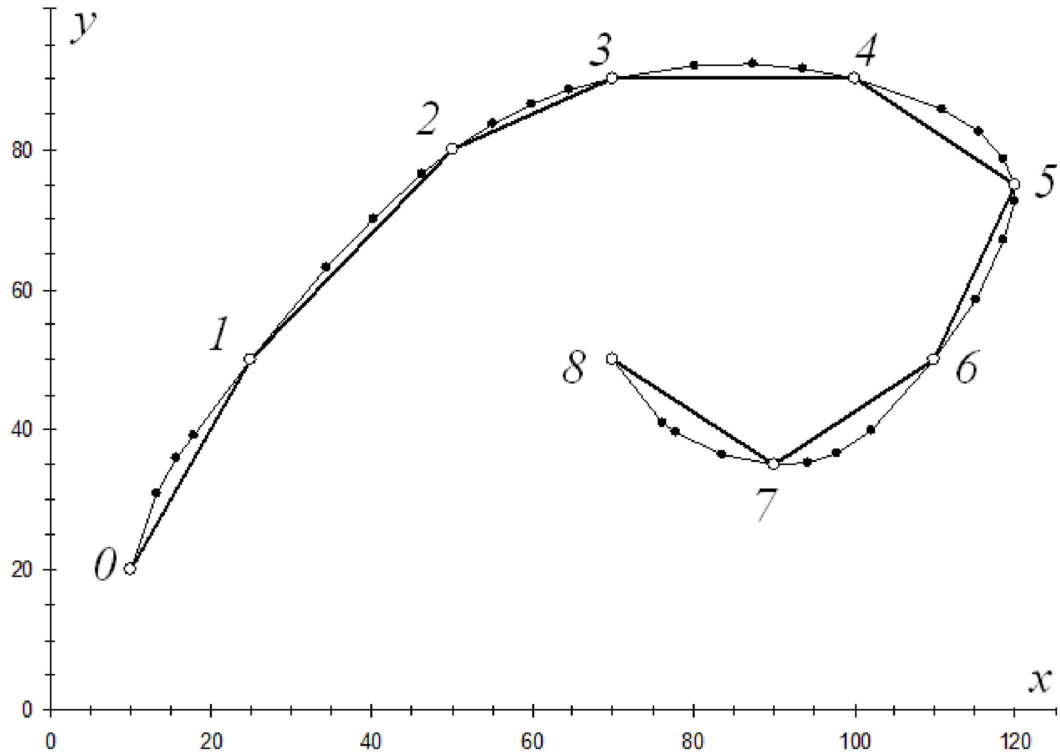


Рис. 2. Тестовий приклад (додаткова умова (3)).

Використовуючи методику, розглянутої у роботі [7,8], та додаткову умову (4) отримаємо різницеву схему другого порядку:

$$\begin{array}{ll} (1-\mu_{i-1})\gamma^1_{i-0.5}+\gamma^1_i+\mu_i\gamma^1_{i+0.5}=\gamma^0_i; & i=\overline{1;n-1}; \\ \gamma^1_i+2\gamma^1_{i+0.5}+\gamma^1_{i+1}=\gamma^0_i+\gamma^0_{i+1}, & i=\overline{1;n-1}. \end{array} \quad (25)$$

Для розв'язання різницевої схеми (25) застосуємо запропоновану проф. Найдишем В.М. наступну методику:

1. Отримуються залежності невідомих $\gamma^1_{i+0.5}$ і γ^1_i, $i=\overline{1;n-1}$, від $\gamma^1_{0.5}$ і $\gamma^1_{n-0.5}$, вибраних у якості управляючих параметрів
2. Накладаються на отримані у п.1 залежності невідомих $\gamma^1_{i+0.5}$ і γ^1_i, $i=\overline{1;n-1}$, умови опуклості для ДПК або її ділянок ((23)–(24)).

Існує область розв'язку у просторі вихідних умов, що відповідає зазначеним умовам. У даному випадку цей простір – двовимірна площина, а область розв'язку – багатокутник, що відокремлений прямими, які виражають обмеження (23)–(24) та позитивними напрямками зазначених осей $\gamma^1_{0.5}$ і $\gamma^1_{n-0.5}$ (оскільки розв'язок знаходиться в системі координат $0,\ \gamma^1_{0.5},\gamma^1_{n-0.5}$).

3. З області багатокутника розв'язку вибираються значення управляючих параметрів $\gamma^1_{0.5}$ і $\gamma^1_{n-0.5}$ (в середині області).
4. Отримані значення $\gamma^1_{0.5}$ і $\gamma^1_{n-0.5}$ підставляються у залежності $\gamma^1_{0.5}$ і

$\gamma^{1}_{n-0.5}$, що були отримані в п.1 та розраховуються решта значень $\gamma^{1}_{i-0.5}$ і γ^{1}_{i}, $i=\overline{1;n}$.

У даній схемі значення кутів суміжності визначаються шляхом розв'язування різницевих схем другого порядку, що дозволяє збільшити варіативність рішення (збільшується кількість керуючих параметрів до трьох), формуючи при цьому глобальне узгоджене згущення всій ДПК.

Тестовий приклад (4 кроки згущення), а також багатокутник вибору управляючих параметрів для першого кроку згущення, з використанням даної додаткової умови, наведено на рис. 3.

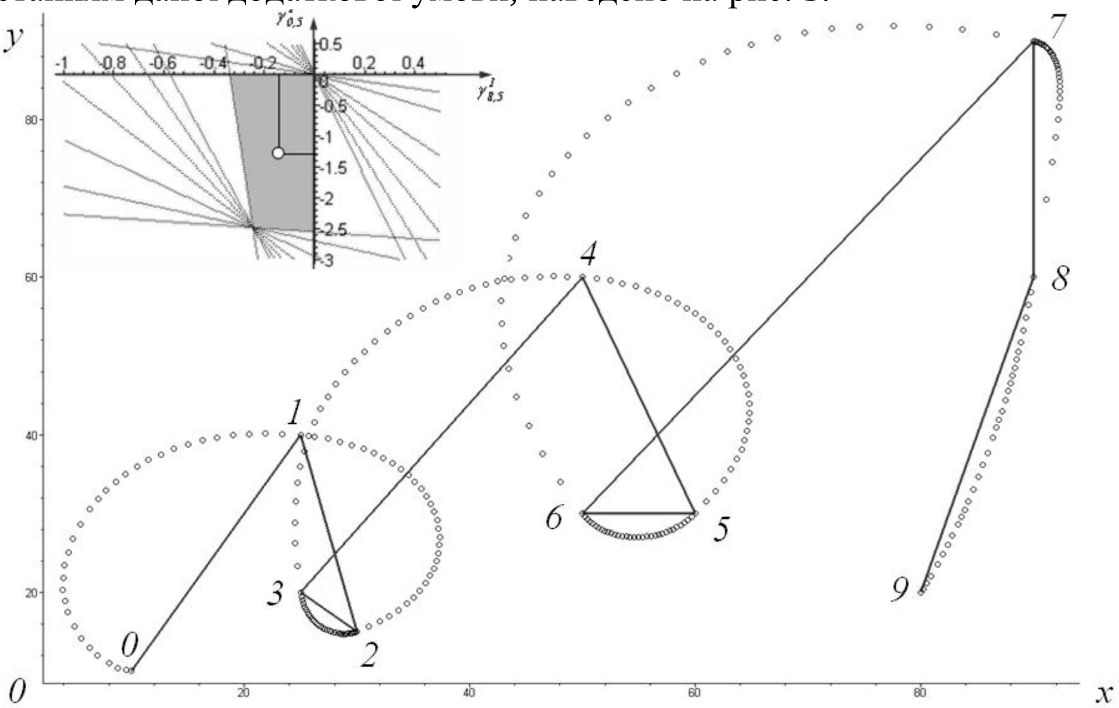


Рис. 3. Тестовий приклад (додаткова умова (4)).

Використання різноманітних додаткових умов відповідно до запропонованої варіативної схеми згущення у порівнянні з існуючими способами дозволяє:

– здійснити глобальне управління формою згущеної кривої за рахунок широкої варіації вибору значень управляючих параметрів з області багатокутника розв’язків, формуючи таким чином глобальне узгоджене згущення всієї ДПК;

– здійснити локальну корекцію будь-якої окремо взятої ланки вихідної ДПК, за рахунок варіювання у межах діапазону припустимих значень введеного у роботі безрозмірного коефіцієнту співвідношення кутових параметрів, що дозволяє удосконалити форму згущеної ДПК та уникнути осциляції у точках згущення;

– збільшити вплив вихідної інформації на процес згущення, за рахунок збільшення кількості управляючих параметрів;

– задовольняти додатковим умовам на співвідношення кутів суміжності у запропонованій варіативній схемі з метою отримання нових можливостей у моделюванні та управлінні формою модельованої кривої;
– значно спростити розрахунковий процес та знизити втрати часу на отримання результату.

Слід відмітити, що в цілях розширення можливостей розробленого методу у межах одного алгоритму були вирішенні задачі моделювання ДПК з особливостями (перехідні ділянки, ДПК з прямолінійними ділянками, особливі точки, неоднозначні ДПК) [9-11], а також розроблено спосіб варіативного дискретного моделювання просторової ДПК на основі кутових параметрів [12].

Висновки. У статті запропоновані різноманітні варіанти накладання додаткових умов на співвідношення між кутами суміжності стосовно нової варіативної схеми згущення. Використання цих різноманітних умов дозволяє підвищити ступінь варіативності отриманого розв’язку, дає можливість у межах одного алгоритму розв’язувати задачі моделювання ДПК з особливостями (перехідні ділянки, ДПК з прямолінійними ділянками, особливі точки, неоднозначні ДПК), а також усуває недоліки існуючих методів. Все це значно розширює можливості застосування методу на основі варіативного формування різницевих схем кутових параметрів для дискретного геометричного моделювання кривих ліній довільної конфігурації. Отримані результати доцільно використовувати при побудові геометричних моделей явищ і процесів з наперед заданими диференційно-геометричними характеристиками. Подальший розвиток запропонованих досліджень доцільно проводити у наступних напрямках: збільшення числа додаткових умов; збільшення числа управляючих параметрів з метою задоволення додатковим вимогам моделювання; застосування методу для згущення дискретно представлених поверхонь; розв’язку інших прикладних задач геометричного моделювання, обумовлених потребами виробництва.

Література

1. *Верещага В.М.* Дискретное моделирование замкнутых кривых / *В.М.Верещага, В.М. Щербина* // Мелит. ин-т механиз. с. хоз-ва. – Мелитополь, 1994. Деп. в ГНТБ Украины 20.04.94 г., №803-Ук 94.
2. *Щербина В.М.* Геометрическое моделирование спиралеобразных дискретно представленных кривых линий: дисс. … к-та. техн. наук: 05.01.01 / *В.М. Щербина*. – Мелитополь, ТГАТА, 2003, – 192с.
3. *Лебедєв В.О.* Дискретна інтерполяція дискретно представлених кривих ліній на основі кутів згущення: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01 / *В.О. Лебедев*. – Мелітополь, ТДАТА. 2004. –22с.

4. *Спиринцев В.В.* Дискретная интерполяция дискретно представленных кривых линий на основе заданного закона изменения угловых параметров: дисс. … к-та. техн. наук: 05.01.01 / *В.В. Спиринцев.* – Мелитополь, ТГАТА, 2006, – 163с.
5. *Найдиш В.М.* Використання кутових параметрів при згущенні дискретно представлених кривих / *В.М. Найдиш, А.В. Найдиш, В.О. Лебедєв* // Матеріали міжнародної наук. - практ. конф. "Сучасні проблеми геометричного моделювання». – Львів, 2003. – С. 23–25.
6. *Найдиш В.М.* Основи прикладної дискретної геометрії [навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації] / *В.М. Найдиш, В.М. Верещага, А.В. Найдиш, В.М. Малкіна*. – Мелітополь: ТДАТУ, 2007. – 194с.
7. *Спиринцев Д.В.* Дискретная интерполяция на основе вариативного формирования разностных схем угловых параметров: дисс. ... канд. техн. наук: 05.01.01 / *Д.В. Спиринцев*. – Мелітополь, ТГАТУ, 2010. – 214 с.
8. *Найдиш В.М.* Варіативна схема згущення ДПК на основі кутових параметрів з використанням додаткових умов / *В.М. Найдиш, Д.В. Спірінцев* // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Випуск 35 «Прикладна геометрія та інженерна графіка».– Мелітополь: ТДАТА, 2007.– С.3-9.
9. *Найдиш А.В.* Дискретна інтерполяція перехідних ділянок ДПК на основі розв'язання різницевих схем / *А.В. Найдиш, Д.В. Спірінцев* // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Випуск 37 «Прикладна геометрія та інженерна графіка». – Мелітополь: ТДАТА, 2008. – С.3-8.
10. *Спірінцев Д.В.* Згущення прямолінійних ділянок ДПК на основі варіативного формування різницевих схем кутових параметрів / *Д.В. Спірінцев* // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Випуск 39 «Прикладна геометрія та інженерна графіка».– Мелітополь: ТДАТУ, 2008. – С.155-161.
11. *Найдиш А.В.* Дискретна інтерполяція ДПК в околі особливих точок на основі варіативного формування різницевих схем кутових параметрів / *А.В. Найдиш, В.М. Малкіна, Д.В. Спірінцев* // Вісник Херсонського національного технічного університету. Випуск 2(31).– Херсон: ХНТУ, 2008. – С.339–345.
12. *Найдиш А.В.* Згущення просторових ДПК на основі їх параметричного подання / *А.В. Найдиш, Д.В. Спірінцев* // Праці Харківського державного університету харчування та торгівлі. Випуск 23 «Геометричне та комп'ютерне моделювання». – Харків, 2009. – С.66-71.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ В МЕТОДЕ НА ОСНОВЕ ВАРИАТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Найдиш А.В., Спиринцев Д.В.

Аннотация **– предлагается использование разнообразных дополнительных условий моделирования применительно к новой вариативной схеме сгущения дискретно представленных кривых на основе угловых параметров, а так же рассматриваются модификации основного алгоритма метода сгущения с использованием этих условий.**

USE OF ADDITIONAL TERMS MODELING IN THE METHOD BASED ON VARIATIVE FORMATIONS DIFFERENCE SCHEMES OF ANGULAR PARAMETRES

A. Naydysh, D. Spirintsev

Summary

The proposed use of a variety of additional conditions in relation to the new modeling scheme variative accumulation of discrete representation of curves on the basis of the angular parameters, as well as a modification of the basic algorithm of the method of condensation with the use of these terms.

УДК 514.18

МОДЕЛЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕРХНІ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНОГО ЛІНІЙЧАТОГО КАРКАСА

Малкіна В.М., д.т.н.,
Гавриленко Е.А., к.т.н.
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-68-62

***Анотація* – в статті запропоновано спосіб моделювання динамічної поверхні на основі дискретного лінійчатого каркаса сформованого на основі просторової осьової лінії.**

***Ключові слова* – внутрішня динамічна поверхня, поперечний перетин, просторова крива лінія, головна нормаль.**

Постанова проблеми. Поверхні, які обмежують складні технічні вироби формуються, як правило, на основі дискретних лінійчатих каркасів. Функціональні якості поверхонь, забезпечуються властивостями елементів каркаса і їхнім взаємним розташуванням.

При моделюванні внутрішніх динамічних поверхонь – поверхонь, що направляють середовище, основними елементами каркаса є осьова лінія і сімейство поперечних перетинів [1, 3].

Необхідною умовою забезпечення динамічних якостей поверхні, що формується, є вдале розташування поперечних перетинів щодо осьової лінії.

Використання сучасних CAD пакетів (Компас, SolidWorks, AutoCAD) дозволяє формувати геометричні образи по заздалегідь заданих умовах на якісно більш високому рівні. Однак для створення програмного забезпечення, яке дозволяє ефективно розв'язувати прикладні задачі, таки як моделювання внутрішніх динамічних поверхонь, необхідна розробка спеціальних методик, що дозволяють вирішувати специфічні завдання, за допомогою стандартних функцій CAD-пакета.

Аналіз останніх досліджень. В [1, 3] викладені вимоги які висуваються до властивостей і взаємного розташування елементів каркаса динамічних поверхонь. Осьовою лінією повинна бути гладка крива лінія, значення кривини уздовж якої змінюється закономірно. Поперечні елементи каркаса розташовуються в площинах нормальних до осьової лінії. Форма і площа поперечних перетинів повинна закономірно змінюватися від вхідного перетину до вихідного.

Методика формування поперечних перетинів каркаса в системі геометричного моделювання SolidWorks запропонована в [4]. Виходячи з форми та площі вхідного й вихідного перетинів, графіка зміни площ перетинів уздовж поверхні, в автоматизованому режимі формується довільна кількість поперечних елементів каркаса.

Методика формування поверхні в системі SolidWorks по каркасу сформованому на основі плоскої осьової лінії запропонована в [5]. На осьовій лінії формується точковий ряд, що розбиває її на ділянки, відповідно до графіка зміни площ поперечних перетинів. Формується сімейство площин, нормальних до осьової лінії, які проходять через отримані точки. Поперечні перетини, сформовані за методикою запропонованої в [4] копіюються у відповідні площини. На основі отриманого каркаса, з використанням стандартних функцій SolidWorks, формується поверхня. Запропонована в [5] методика не розрахована на моделювання поверхні, осьовою лінією якої є просторова крива лінія.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розробка методики побудови каркасу внутрішньої динамічної поверхні у випадку просторової осьової лінії.

Основна частина. Внутрішню динамічну поверхню пропонується формувати на основі дискретного лінійчатого каркасса з використанням системи геометричного моделювання SolidWorks.

Розглянемо випадок, коли осьова лінія поверхні – просторова крива. Поперечні перетини каркаса розташовані в площинах, нормальних до осьової лінії. Форма поперечних перетинів закономірно змінюється від прямокутника з округленими кутами до кола, відповідно до прямолінійного графіка зміни площ перетинів уздовж поверхні. Центри ваги поперечних елементів каркаса розташовуються на осьовій лінії.

Необхідно визначити положення поперечних елементів каркаса, яке, при виконанні вищевикладених вимог, забезпечить найкращі динамічні якості поверхні.

Динамічні якості побудованої поверхні можна оцінити на основі аналізу зміни значень кривини і скруту уздовж ліній, розташованих на поверхні. Значення кривини повинне змінюватись закономірно, а скрут повинен бути одного знаку [3].

Для досягнення зазначених якостей пропонується орієнтувати поперечні елементи каркаса виходячи з положення основного тригранника у відповідних точках осьової лінії [1, 3].

УДК 514.18

МОДЕЛЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕРХНІ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНОГО ЛІНІЙЧАТОГО КАРКАСА

Малкіна В.М., д.т.н.,
Гавриленко Е.А., к.т.н.
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619) 42-68-62

***Анотація* – в статті запропоновано спосіб моделювання динамічної поверхні на основі дискретного лінійчатого каркаса сформованого на основі просторової осьової лінії.**

***Ключові слова* – внутрішня динамічна поверхня, поперечний перетин, просторова крива лінія, головна нормаль.**

*Постанова проблеми***.** Поверхні, які обмежують складні технічні вироби формуються, як правило, на основі дискретних лінійчатих каркасів. Функціональні якості поверхонь, забезпечуються властивостями елементів каркаса і їхнім взаємним розташуванням.

При моделюванні внутрішніх динамічних поверхонь – поверхонь, що направляють середовище, основними елементами каркаса є осьова лінія і сімейство поперечних перетинів [1, 3].

Необхідною умовою забезпечення динамічних якостей поверхні, що формується, є вдале розташування поперечних перетинів щодо осьової лінії.

Використання сучасних CAD пакетів (Компас, SolidWorks, AutoCAD) дозволяє формувати геометричні образи по заздалегідь заданих умовах на якісно більш високому рівні. Однак для створення програмного забезпечення, яке дозволяє ефективно розв'язувати прикладні задачі, таки як моделювання внутрішніх динамічних поверхонь, необхідна розробка спеціальних методик, що дозволяють вирішувати специфічні завдання, за допомогою стандартних функцій CAD-пакета.

*Аналіз останніх досліджень***.** В [1, 3] викладені вимоги які висуваються до властивостей і взаємного розташування елементів каркаса динамічних поверхонь. Осьовою лінією повинна бути гладка крива лінія, значення кривини уздовж якої змінюється закономірно. Поперечні елементи каркаса розташовуються в площинах нормальних до осьової лінії. Форма і площа поперечних перетинів повинна закономірно змінюватися від вхідного перетину до вихідного.

Методика формування поперечних перетинів каркаса в системі геометричного моделювання SolidWorks запропонована в [4]. Виходячи з форми та площі вхідного й вихідного перетинів, графіка зміни площ перетинів уздовж поверхні, в автоматизованому режимі формується довільна кількість поперечних елементів каркаса.

Методика формування поверхні в системі SolidWorks по каркасу сформованому на основі плоскої осьової лінії запропонована в [5]. На осьовій лінії формується точковий ряд, що розбиває її на ділянки, відповідно до графіка зміни площ поперечних перетинів. Формується сімейство площин, нормальних до осьової лінії, які проходять через отримані точки. Поперечні перетини, сформовані за методикою запропонованої в [4] копіюються у відповідні площини. На основі отриманого каркаса, з використанням стандартних функцій SolidWorks, формується поверхня. Запропонована в [5] методика не розрахована на моделювання поверхні, осьовою лінією якої є просторова крива лінія.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розробка методики побудови каркасу внутрішньої динамічної поверхні у випадку просторової осьової лінії.

Основна частина. Внутрішню динамічну поверхню пропонується формувати на основі дискретного лінійчатого каркасса з використанням системи геометричного моделювання SolidWorks.

Розглянемо випадок, коли осьова лінія поверхні – просторова крива. Поперечні перетини каркаса розташовані в площинах, нормальних до осьової лінії. Форма поперечних перетинів закономірно змінюється від прямокутника з округленими кутами до кола, відповідно до прямолінійного графіка зміни площ перетинів уздовж поверхні. Центри ваги поперечних елементів каркаса розташовуються на осьовій лінії.

Необхідно визначити положення поперечних елементів каркаса, яке, при виконанні вищевикладених вимог, забезпечить найкращі динамічні якості поверхні.

Динамічні якості побудованої поверхні можна оцінити на основі аналізу зміни значень кривини і скруту уздовж ліній, розташованих на поверхні. Значення кривини повинне змінюватись закономірно, а скрут повинен бути одного знаку [3].

Для досягнення зазначених якостей пропонується орієнтувати поперечні елементи каркаса виходячи з положення основного тригранника у відповідних точках осьової лінії [1, 3].

Розв’язок поставленої задачі забезпечимо розташував поперечні елементи каркаса таким чином, щоб їхня вісь симетрії збігалася з головною нормаллю просторової осьової лінії у відповідній точці.

Головну нормаль сформуємо як пряму, яка проходить через точку на просторовій кривій та центр відповідного стичного кола.

Стичне коло визначимо як коло, яке проходить через точку дотику з кривою лінією та дві нескінченно близькі до неї точки, які належать до цієї кривої [2].

Для цього в пакеті SolidWorks створимо три точки, які належать до кривої лінії та довільне коло. На коло та кожну з точок, послідовно накладаємо взаємозв’язок «Совпадение». Між середньою з трьох розташованих на кривій точок – точкою дотику та іншими двома точками створюємо, з використанням функції «Автоматическое нанесение размеров», лінійні розміри. Зменшуючи відстань між вказаними точками можливо, як завгодно точно, визначити положення стичного кола. При цьому, пряма, яка проходить через точку дотику і центр створеного кола, займає положення головної нормалі просторової кривої лінії.

Побудована модель дозволяє визначити положення стичного кола, а отже і головної нормалі, в довільній точці кривої лінії (рис. 1).

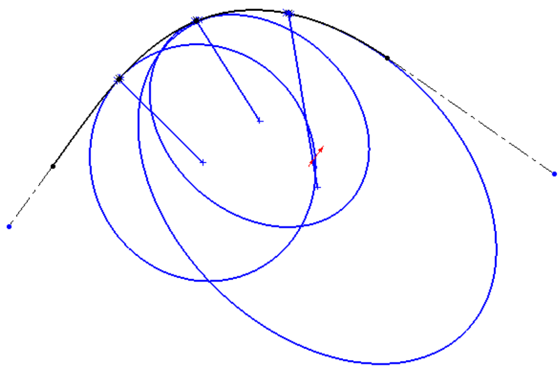


Рис. 1.

Після побудови головних нормалей у точках осьової лінії з якими сполучені центри ваги поперечних перетинів каркаса, на осі симетрії перетинів і головні нормалі накладається взаємозв'язок «Паралельний», що дозволяє добитися співпадання вісі симетрії та головної нормалі. В результаті зазначених дій перетини займають задане положення (рис. 2).

На основі отриманого каркаса формується модель поверхні. Динамічні якості поверхні досліджені за допомогою аналізу сімейства поздовжніх ліній, розташованих на поверхні, а також у пакеті FloWorks.

Для зазначеного аналізу поздовжні лінії побудованої поверхні і графіки зміни значень кривини уздовж них отримані в автоматизованому режимі за допомогою стандартних функцій системи SolidWorks (рис. 3).

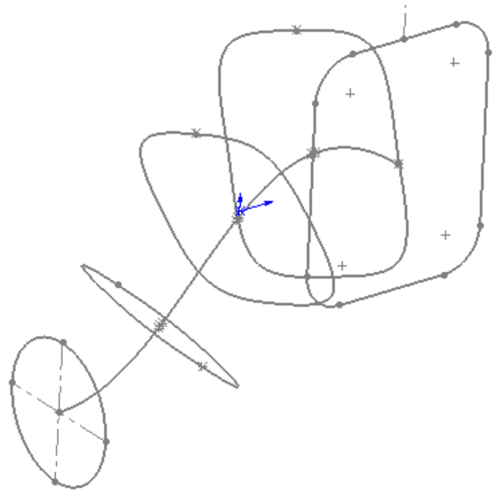


Рис. 2.

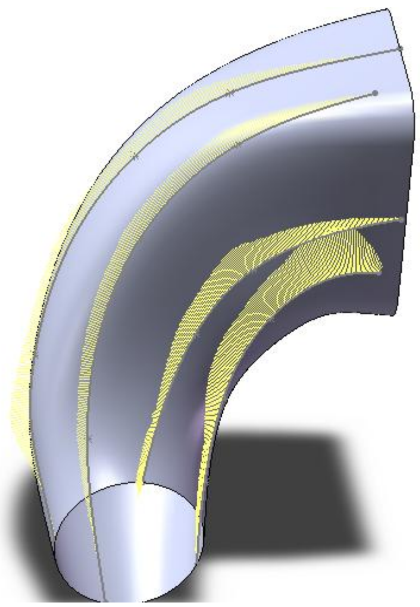


Рис. 3.

За допомогою системи FloWorks будується та аналізується потік середовища, який направляється створеною поверхнею (рис. 4).

Дослідження в системі FloWorks показали, що отримана модель поверхні формує стійкий по напрямку і швидкості потік, усередині якого відсутні завихрення, тиск усередині потоку змінюється закономірно, що відповідає вимогам, які висуваються до поверхні [1].

Дослідження властивостей поверхонь, сформованих на основі каркасів, поперечні елементи яких орієнтовані з відхиленням від пропонованої методики показали, що відхилення осьових ліній поперечних перетинів від положення головних нормалей, при дотриманні інших умов формування каркаса, приводить до погіршення динамічних властивостей поверхні.

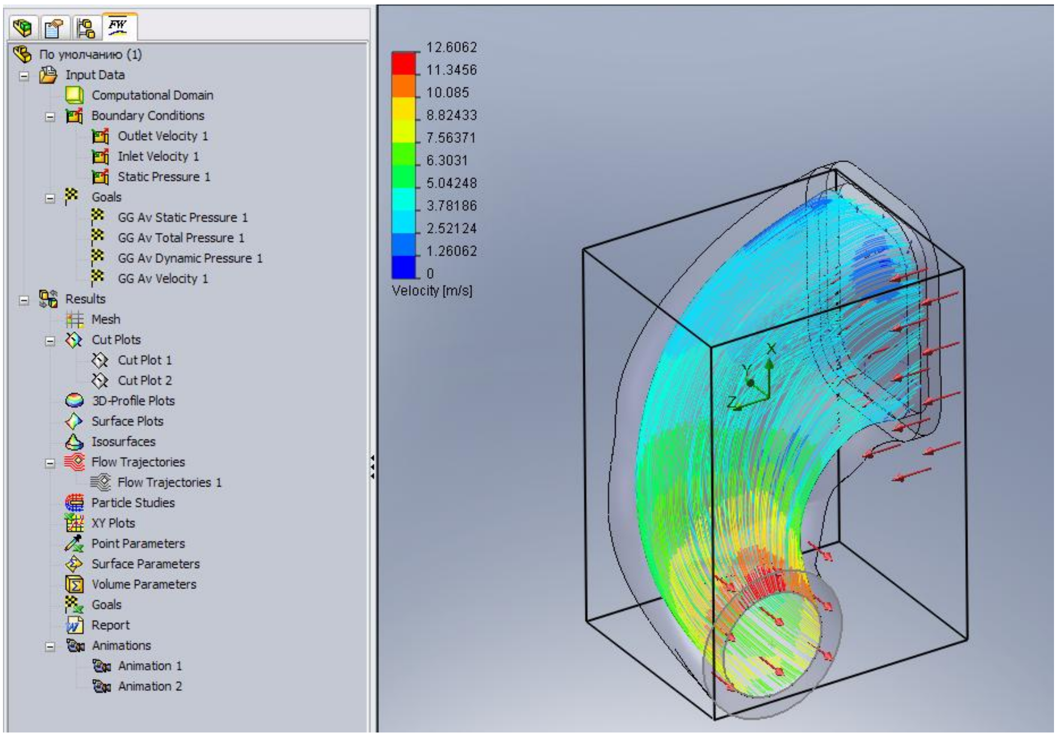


Рис. 4.

Графіки зміни значень кривини вздовж ліній, розташованих на поверхні, яка сформована з відхиленням від пропонованої методики, наведена на рис. 5.

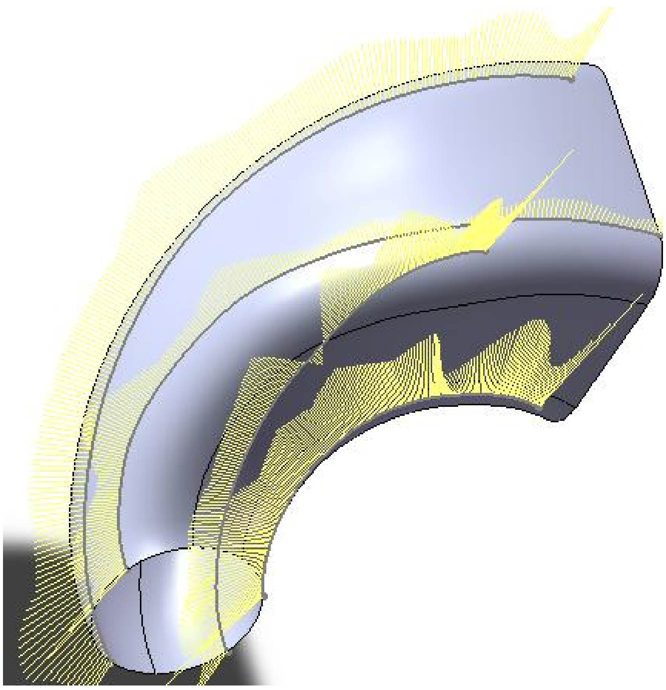


Рис. 5

Висновки. У роботі запропонована методика моделювання внутрішньої динамічної поверхні на основі дискретного лінійчатого каркаса. Дослідження властивостей поверхонь, отриманих на основі сформованих каркасів показало, що пропоноване розташування поперечних перетинів найкращім чином забезпечує динамічні якості поверхні.

Література

1. *Драганов Б.Х.* Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания. / *Драганов Б.Х., Круглов М.Г., Обухова В.С.* – К.: Вища школа, 1987. – 176 с.
2. *Рашевский П.К.* Курс дифференциальной геометрии. / *Рашевский П.К.* – М.: ГИТТЛ, 1956. – 480 с.
3. *Осипов В.А.* Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей. / *Осипов В.А.* – М., «Машиностроение», 1979. – 248 с.
4. *Гавриленко Є.А.* Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні в системі SolidWorks / *Гавріленко Є.А., Верещага В.М., Гриценко О.В.* – Інформаційні технології в прикладній геометрії // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2010. – Вип. 5. Т 4. С. 49-52.
5. *Гавриленко Є.А.* Моделювання динамічної поверхні у системі Solid Works / *Гавриленко Є.А., Дмітрієв Ю.О.* – Современные проблемы геометрического моделирования // Сборник трудов Х Международной научно-практической конференции.– Мелітополь, 2008. – С. 57-60.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ЛИНЕЙНОГО КАРКАСА

Малкина В.М., Гавриленко Е.А.

Аннотация **– в статье предложен способ моделирования динамической поверхности на основе дискретного линейного каркаса сформированного на основе пространственной осевой линии.**

MODELING OF INTERNAL DYNAMIC SURFACE ON THE BASIS OF DISCRETE LINEAR FRAME

V. Malkyna, E. Gavrilenko

Summary

In the article proposed a method of modeling of dynamic surface on the basis of discrete linear frame formed on the basis of the spatial axial line.

УДК 514.18

ПОБУДОВА ЕКВІДИСТАНТИ ДПК У ТОЧКОВОМУ ЧИСЛЕННІ

Верещага В.М., д.т.н.,
Бездітний А.О., аспірант*
Таврійський державний агротехнологічний університет
Тел.: (0619)42-68-62

Анотація **–у роботі розглядається задача знаходження та побудови еквідистанти дискретно представленої кривої у точковому численні.**

Ключові слова **– еквідистанта, ДПК, точкове числення.**

Постановка проблеми. Задача побудови еквідестанти дискретно представленої кривої дуже часто є складовою частиною більш складних задач, і тому потребує опису з використанням новітніх течій в геометричному моделюванні, зокрема точковому численні [1]. Для розв'язання цієї задачі було залучено апарат точкового числення як найбільш орієнтований для розв'язання задач, що підлягають подальшій реалізації на ЕОМ [2].

Аналіз останніх досліджень. Побудова еквідистанти є дуже розповсюдженою задачею, що була реалізована вже багато разів різними способами. У цій роботі пропонується новий спосіб побудови еквідистанти ДПК, оснований на новому перспективному математичному апараті точкового числення [3].

Формування цілей статті. Дана стаття має ціль знаходження алгоритму побудови еквідистанти заданої ДПК за допомогою математичного апарату точкового числення, що розширить клас задач, вирішуваних на базі цього математичного апарату. Результати розв'язання цієї задачі будуть використані для написання програми на ЕОМ для автоматизації побудови еквідистантних кривих.

Основна частина. Викладемо розв'язання поставленої задачі.

Хай в декартовому симплексі OE_1E_2 задана ДПК m (рис.1):

$$A_0A_1 \dots A_{i-1}A_iA_{i+1} \dots:$$
$$A_{i-1} = E_1x_{i-1} + E_2y_{i-1},$$
$$A_i = E_1x_i + E_2y_i,$$
$$A_{i+1} = E_1x_{i+1} + E_2y_{i+1}.$$

Науковий кервiник – д.т.н. Верещага В.М.

Треба побудувати точку $\tilde{A}_i$, що є еквідистантною до точки A_i.

Хай дотична до ДПК у точці A_i паралельна до $A_{i-1}A_{i+1}$. Проведемо нормаль H_iA_i та відкладемо $A_i\tilde{A}_i = d$. Точки $\tilde{A}_i$ визначають еквідистанту ДПК. Для знаходження точки $\tilde{A}_i$ використаємо апарат точкового числення.

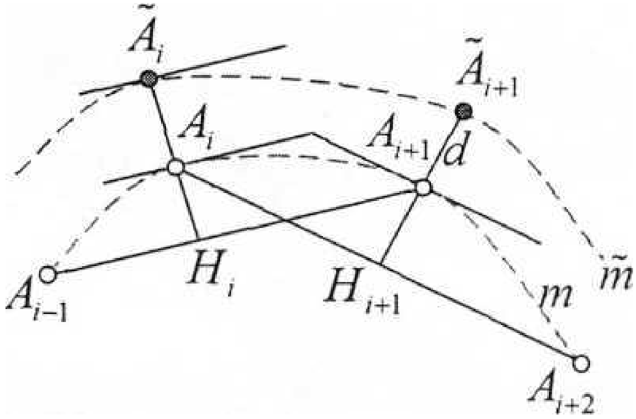


Рис. 1. Побудова еквідистанти ДПК.

Визначимо основу перпендикуляру H_i з точки A_i на $A_{i-1}A_{i+1}$:

$$H_i = \frac{A_{i-1}\,\Sigma_{i-1,i}^{i+1} + A_{i+1}\,\Sigma_{i+1,i}^{i-1}}{\Sigma_{i-1,i}^{i+1} + \Sigma_{i+1,i}^{i-1}}. \qquad (1)$$

Далі визначаємо:

$$(A_iH_i)^2 = \sum (H_i - A_i)^2 = = \sum \left(\frac{(A_{i-1} - A_i)\,\Sigma_{i-1,i}^{i+1} + (A_{i+1} - A_i)\,\Sigma_{i+1,i}^{i-1}}{\Sigma_{i-1,i}^{i+1} + \Sigma_{i+1,i}^{i-1}}\right)^2 \to$$

$$\to (A_iH_i)^2(A_{i-1}A_{i+1})^4 = \sum \left[(A_{i-1} - A_i)\sum\nolimits_{i-1,i}^{i+1} + (A_{i+1} - A_i)\sum\nolimits_{i+1,i}^{i-1}\right]^2 =$$

$$= \sum \left[(A_{i-1} - A_i)^2\Big(\sum\nolimits_{i-1,i}^{i+1}\Big)^2 + (A_{i+1} - A_i)^2\Big(\sum\nolimits_{i+1,i}^{i-1}\Big)^2 + 2(A_{i-1} - A_i)(A_{i+1} - A_i)\sum\nolimits_{i-1,i}^{i+1}\sum\nolimits_{i+1,i}^{i-1}\right] = \qquad (2)$$

$$= \Big(\sum\nolimits_{i-1,i}^{i+1}\Big)^2(A_{i-1}A_i)^2 + \Big(\sum\nolimits_{i+1,i}^{i-1}\Big)^2(A_{i+1} + A_i)^2 +$$

$$+2\sum\nolimits_{i-1,i}^{i+1}\sum\nolimits_{i+1,i}^{i-1}\sum\nolimits_{i-1,i+1}^{i}.$$

Виразимо цю відстань через метричні оператори:

$$(A_{i-1}A_{i+1})^2 = \sum\nolimits_{i-1,i}^{i+1} + \sum\nolimits_{i+1,i}^{i-1};$$

$$(A_{i-1}A_i)^2 = \sum\nolimits_{i+1,i}^{i-1} + \sum\nolimits_{i-1,i+1}^{i}; \qquad (3)$$

$$(A_iA_{i+1})^2 = \sum\nolimits_{i-1,i+1}^{i} + \sum\nolimits_{i-1,i}^{i+1}.$$

Після підстановки у (2) отримуємо:

$$(A_iH_i)^2 = \\ = \frac{\left(\Sigma_{i-1,i}^{i+1}\right)^2\left(\Sigma_{i+1,i}^{i-1}+\Sigma_{i-1,i}^{i}\right)+\left(\Sigma_{i+1,i}^{i-1}\right)^2\left(\Sigma_{i+1,i}^{i}+\Sigma_{i-1,i}^{i+1}\right)+2\,\Sigma_{i-1,i}^{i+1}\Sigma_{i+1,i}^{i-1}\Sigma_{i-1,i+1}^{i-1}}{\left(\Sigma_{i-1,i}^{i+1}+\Sigma_{i+1,i}^{i-1}\right)^2}.$$

$$A_iH_i = \\ = \frac{\sqrt{\left(\Sigma_{i-1,i}^{i+1}\right)^2\left(\Sigma_{i+1,i}^{i-1}+\Sigma_{i-1,i}^{i}\right)+\left(\Sigma_{i+1,i}^{i-1}\right)^2\left(\Sigma_{i+1,i}^{i}+\Sigma_{i-1,i}^{i+1}\right)+2\,\Sigma_{i-1,i}^{i+1}\Sigma_{i+1,i}^{i-1}\Sigma_{i-1,i+1}^{i-1}}}{\Sigma_{i-1,i}^{i+1}+\Sigma_{i+1,i}^{i-1}},$$

де

$$A_{i-1} = E_1x_{i-1}+E_2y_{i-1},\ A_i = E_1x_i+E_2y_i,\ A_{i+1} = E_1x_{i+1}+E_2y_{i+1}. \qquad (4)$$

$$\Sigma_{i-1,i}^{i+1} = \sum(A_{i-1}-A_{i+1})(A_i-A_{i+1}) = \sum(E_1x_{i-1}+E_2y_{i-1}-E_1x_{i+1}- \\ E_2y_{i+1})(E_1x_i+E_2y_i-E_1x_{i+1}-E_2y_{i+1}) = \sum[E_1(x_{i-1}-x_{i+1})+E_2(y_{i-1}- \\ y_{i+1})]\,[E_1(x_i-x_{i+1})+E_2(y_i-y_{i+1})] = \\ = \sum\nolimits_{E_1E_1}^{0}(x_{i-1}-x_{i+1})(x_i-x_{i-1}) + \sum\nolimits_{E_1E_2}^{0}[(x_{i-1}-x_{i+1})(y_i-y_{i+1})+(y_{i-1} \\ y_{i+1})(x_i\ \ x_{i+1})] \\ +\sum\nolimits_{E_2E_2}^{0}(y_{i-1}-y_{i+1})(y_i-y_{i+1}) = (x_{i-1}-x_{i+1})(x_i-x_{i+1}) + \\ +(y_{i-1}-y_{i+1})(y_i-y_{i+1}); \qquad (5)$$

$$\sum\nolimits_{E_1E_1}^{0} = \sum\nolimits_{E_2E_2}^{0} = 1;\ \sum\nolimits_{E_1E_2}^{0} = 0.$$

Аналогічно знаходимо:

$$\sum\nolimits_{i-1,i+1}^{i} = (x_{i-1}-x_i)(x_{i+1}-x_i)+(y_{i-1}-y_i)(y_{i+1}-y_i); \\ \sum\nolimits_{i,i+1}^{i-1} = (x_i-x_{i-1})(x_{i+1}-x_{i-1})+(y_i-y_{i-1})(y_{i+1}-y_{i-1}). \qquad (6)$$

Переходимо до визначення еквідистантної ДПК:

$$\frac{A_iH_i}{A_i\tilde{A}_i} = \frac{H_i-A_i}{\tilde{A}_i-A_i} = \frac{A_iH_i}{d} \rightarrow (H_i-A_i)d = (\tilde{A}_i-A_i)(A_iH_i) \rightarrow \\ \rightarrow \tilde{A}_i = \frac{(H_i-A_i)d+A_i(A_iH_i)}{(A_iH_i)}. \qquad (7)$$

Підставляємо (1) у (7):

$$\tilde{A}_i = \frac{\frac{(A_{i-1}-A_i)d\,\Sigma_{i-1,i}^{i+1}+(A_{i+1}-A_i)d\,\Sigma_{i+1,i}^{i-1}}{\Sigma_{i-1,i}^{i+1}+\Sigma_{i+1,i}^{i-1}}+A_i(A_iH_i)}{(A_iH_i)} = \\ = \frac{[A_{i-1}d-A_id+A_i(A_iH_i)]\,\Sigma_{i-1,i}^{i+1}+[A_{i-1}d-A_id+A_i(A_iH_i)]\,\Sigma_{i+1,i}^{i-1}}{\left(\Sigma_{i-1,i}^{i+1}+\Sigma_{i+1,i}^{i-1}\right)\ (A_iH_i)} \qquad (8)$$

Підставляємо (4) у (8):

$$\bar{A}_i = \frac{[E_1(x_{i-1}\,d - x_i d + x_i(A_iH_i)) + E_2(y_{i-1}\,d - y_i d + y_i(A_iH_i)]\sum_{i-1,i}^{i+1}}{(\sum_{i-1,i}^{i+1} + \sum_{i+1,i}^{i-1})\ (A_iH_i)} + \\ + \frac{[E_1(x_{i+1}\,d - x_i d + x_i(A_iH_i)) + E_2(y_{i+1}\,d - y_i d + y_i(A_iH_i)]\sum_{i+1,i}^{i-1}}{(\sum_{i-1,i}^{i+1} + \sum_{i+1,i}^{i-1})\ (A_iH_i)}. \qquad (9)$$

Таким чином ми визначили еквідистанту до заданої ДПК та маємо всі необхідні дані для її побудови.

Висновки. Задачу побудови еквідистанти ДПК було вирішено, що дозволяє розширити клас задач, що вирішуються за допомогою математичного апарату точкового числення. Отримана математична модель дає можливість написання програми на ЕОМ для автоматизації побудови еквідистант кривих ліній на базі точкового числення.

Література

1. *Найдиш В.М.* Дискретна інтерполяція. / *В.М. Найдиш.* - Мел.:2008.- 250 с.

2. *Балюба І.Г.* Вычислительная геометрия в точечном исчислении / *І.Г. Балюба, С.Л. Корнілов, Т.П. Малютіна* // - Макеевка: ДГАСА, 1990. – 52 с.

3. *Балюба І.Г.* Основи математичного апарату точкового числення./ *І.Г. Балюба, В.І. Поліщук, Т.П. Малютіна* // Прикл. геом. та інж. граф. Праці ТДАТА. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. - Вип. 4, Т. 29. – С. 22-30.

ПОСТРОЕНИЕ ЭКВИДИСТАНТЫ ДПК В ТОЧЕЧНОМ ИСЧИСЛЕНИИ

Верещага В.М., Бездитный А.А.

***Аннотация* - в работе рассматривается задача нахождения и построения эквидистанты дискретно представленной кривой в точечном исчислении.**

A CONSTRUCTION OF THE DISCRETELY PRESENTED CURVE'S EQUIDISTANT LINE IN DOT CALCULATION

V. Vereshaga, A. Bezditniy

Summary

The task of finding and construction of equidistant line of the discretely presented curve is in-process examined in a point calculation.