



Василюк В. І.

*Відокремлений
підрозділ “Ніжинський
агротехнічний
інститут”
Національного
університету
біоресурсів і
природокористування
України*

Шейченко В. О.

*Національний науковий
центр “Інститут
механізації та
електрифікації
сільського
господарства”
НААН України*

УДК 631.35:633.521

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ЛЬОНОЗБИРАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ПО НЕРІВНОСТЯХ ПОВЕРХНІ ҐРУНТУ

Исследовано и проанализировано колебательное движение льноуборочного агрегата в процессе движения по неровностям поверхности почвы. Составлены дифференциальные уравнения движения механической системы с двумя и с одной степенью вольности. Найдены условия для обеспечения оптимальных параметров растянутости ленты льна и повышения качества убранного льноволокна.

Picking device oscillating motion in flax harvesting assembly is studied. Equivalent dynamic models of mechanical system with one and two degrees of freedom are developed.

Вступ. Якість виконання технологічного процесу, що виконує льноозбиральний комбайн у значній ступені залежить від його сталого руху по нерівностях поверхні ґрунту. Особливо це торкається причіпних льноозбиральних комбайнів, які представляють собою складні динамічні системи, агрегати яких складаються з трактора, самого льноозбирального комбайна і причепа для збору насіння. Самохідний льноозбиральний комбайн може представляти собою самохідне шасі (або трактор), на яке навішуються усі робочі органи комбайна. При цьому ворох насіння, що збирається може транспортуватись безпосередньо у бункер, якій навішений на самохідне шасі (або трактор), або у кузов тракторного причепа, який агрегується самохідним шасі. Однак, у зв'язку з тим, що у самохідного льноозбирального агрегату робочі органи навішуються на шасі (трактор), то можна вважати його під час руху єдиною коливальною системою.

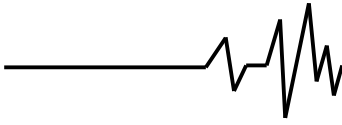
Постановка проблеми. Під час збирання льону-довгунця льноозбиральним агрегатом виконується складний технологічний процес, який ускладнюють нерівності на поверхні поля, і які спричинюють коливання у повздовжньо-вертикальній площині і відхилення від прямолінійності руху агрегату. Це в кінцевому результаті негативно впливає

на роботу льноозбиральних машин, які застосовують для подальшого збирання льону, а також в цілому визначають якість продукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Багато уваги, як вітчизняними так і закордонними вченими, присвячено дослідженню руху різних сільськогосподарських машинних агрегатів у тому числі збиральних, але на жаль рух льноозбиральних агрегатів не було розглянуто [2,3]. Для проведення ґрунтовних аналітичних досліджень коливальних рухів льноозбиральних комбайнів варто використати методику побудови математичних моделей машин і машинних агрегатів, яка розроблена академіком П.М.Василенком [1].

Мета дослідження. Вплив коливальних рухів льноозбиральних агрегатів при русі по нерівностям поверхні ґрунту на якісні показники їх роботи.

Результати дослідження. Самохідний льноозбиральний агрегат складається з самохідного шасі (або інтегрального трактора), на яке навішують робочі органи комбайна. При цьому ворох зібраного насіння може направлятися в бункер, який навішений на самохідне шасі (трактор), або в кузов тракторного причепа. Розглянемо аналітично рух у повздовжньо-вертикальній площині



навісного самохідного шасі (трактора), який можна уявляти, як варіант самохідного машинного агрегату. Зробимо таке припущення, що через те, що у самохідного агрегату робочі органи, які саме і створюють комбайн, навішуються на шасі (трактор), то вони представляють собою одне ціле і здійснюють коливання під час його руху.

Крім того, при аналізі коливання під час руху агрегату по нерівностях поверхні ґрунту в першу чергу нас цікавлять коливання робочої машини, тобто льонокомбайна в причіпному агрегаті і самохідного шасі (трактора) з робочими органами в навісному агрегаті. З урахуванням цього спочатку будемо розрахункову математичну модель агрегату у вигляді машини з робочими органами на рамі з чотирьохколісним ходом, але ця схема справедлива і для причіпного комбайна на двох колесах, якщо врахувати, що в чотирьохколісному варіанті два колеса (наприклад, задні) суттєво впливають на рух агрегату. Нижче приводиться розв'язок задачі для льонозбирального комбайна, який має чотири ходових колеса.

Побудуємо насамперед еквівалентну схему, для чого представимо льонозбиральний комбайн зазначеного типу у вигляді плоскої моделі (рис. 1). Віднесемо дану механічну систему до нерухокої відносно поверхні ґрунту, системи координат $Oxuz$. При цьому площина xOy є вертикальною площиною до поверхні поля.

Для спрощення введення диференціальних рівнянь та аналізу коливальних рухів льонозбирального комбайна зробимо ряд припущень [1-3]:

1. Льонокомбайн рухається рівномірно і прямолінійно уздовж осі Ox ;
2. Профіль опорної поверхні під обома колесами однаковий;
3. Опорні колеса зберігають точковий і сталий контакт із поверхнею ґрунту;
4. Профіль шляху є стаціонарною випадковою функцією відстані;
5. Опір машин, що агрегуються є випадковою функцією часу і приводиться до сили $F_{kp}(t)$ і моменту $\bar{M}_{kp}(t)$, які прикладені у центрі мас льонокомбайна;
6. Характеристики пружних елементів підвіски лінійні;
7. Сили опору у підвісках та шинах пропорційні до швидкості коливань.

Льонокомбайн у загальному випадку може здійснювати шість типів незалежних коливальних рухів. Виходячи з його конструкції, врахуємо найбільш суттєві коливальні рухи: вертикальні поступальні (підстрибування) та поздовжні кутові (гальмування).

Із урахуванням цих припущень, льонокомбайн із підресореною масою уявляється еквівалентною динамічною моделлю такого кінцевого вигляду (рис. 1), тобто фактично коливальною механічною системою з двома ступенями вільності.

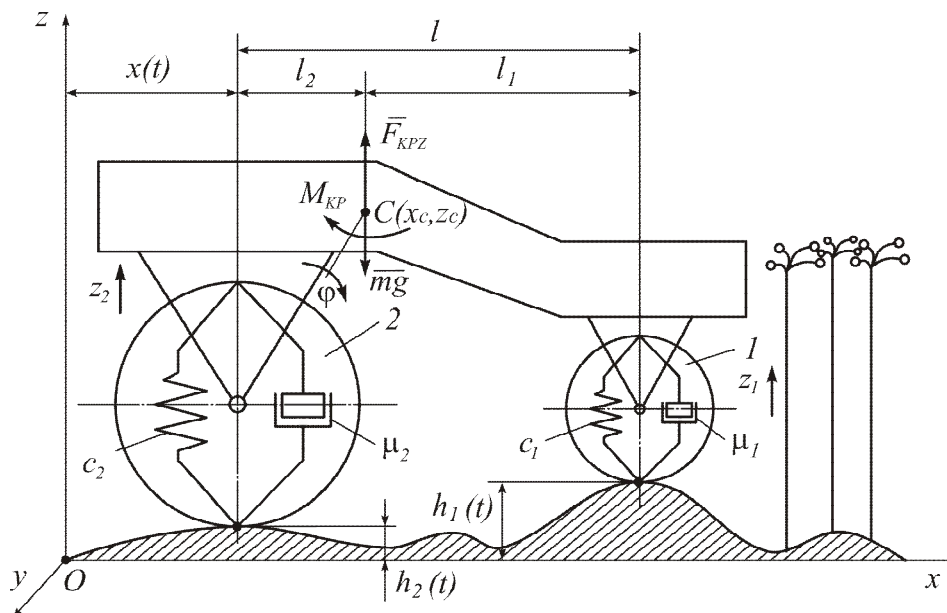


Рис. 1. Еквівалентна схема льонозбирального комбайна, що приведена до коливальної механічної системи з двома ступенями вільності



Для складання диференціальних рівнянь, які описують коливальні рухи одержаної механічної системи у вертикальній площині використаємо рівняння Лагранжа 2-го роду. За узагальнені координати приймемо вертикальні переміщення z_1 та z_2 підресореної маси над передніми та задніми колесами льонокомбайна. Узагальнені координати будемо відраховувати від положення статичної рівноваги системи. Тоді рух механічної системи описується наступними рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial z_1} &= Q_{z_1}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial z_2} &= Q_{z_2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де T – кінетична енергія динамічної системи, що розглядається; Q_{z_1} , Q_{z_2} – узагальнені сили, які відповідають узагальненим координатам z_1 та z_2 .

Кінетична енергія динамічної системи буде дорівнювати:

$$T = \frac{1}{2} M z_c^2 + \frac{1}{2} I_y \dot{\varphi}^2, \quad (2)$$

де M – маса льонозбирального комбайна; I_y – момент інерції комбайна відносно осі, яка переходить через центр мас паралельно до осі Oy ; z_c – вертикальне зміщення центра мас комбайна; φ – кутове зміщення комбайна у вертикальній площині.

Змінні z_c і φ пов'язані з узагальненими координатами z_1 та z_2 наступними залежностями:

$$\begin{aligned} z_c &= (z_1 l_2 + z_2 l_1) / l, \\ \operatorname{tg} \varphi &= (z_2 - z_1) / l, \end{aligned}$$

де l_1 – відстань від передньої точки підвісу до центра мас системи; l_2 – відстань від задньої точки підвісу до центра мас системи; l – відстань від передньої до задньої точки підвісу системи.

При малих кутових коливаннях льонокомбайна можна прийняти, що

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi,$$

а тоді

$$\varphi = (z_2 - z_1) / l.$$

Враховуючи дані залежності, рівність (2) прийме вигляд:

$$T = \frac{1}{2} A_1 \dot{z}_1^2 + \frac{1}{2} A_2 \dot{z}_2^2 + A_3 \dot{z}_1 \dot{z}_2, \quad (3)$$

де

$$A_1 = M(l_2^2 + \rho^2) / l^2,$$

$$\rho = \sqrt{I_y / M},$$

$$A_2 = M(l_1^2 + \rho^2) / l^2,$$

$$A_3 = M(l_1 l_2 - \rho^2) / l^2.$$

Потенціальна енергія Π льонокомбайна у його біжучому положенні дорівнює роботі пружних сил підресорювання і шин:

$$\Pi = \frac{1}{2} c_1 (z_1 - h_1)^2 + \frac{1}{2} c_2 (z_1 - h_2)^2, \quad (4)$$

де c_1 і c_2 – приведені жорсткості відповідно передніх і задніх підвісок льонокомбайна; h_1 і h_2 – висоти нерівностей опорної поверхні ґрунту відповідно під передніми та задніми колесами.

У даному випадку висота нерівностей поверхні ґрунту є величиною змінною, що залежить від часу, тобто

$$h_2 = h(t),$$

$$h_1 = h(t + t_o),$$

$$t_o = \frac{l}{V},$$

де V – швидкість руху льонозбирального комбайна.

Дисипативну функцію розсіювання енергії визначимо згідно [1]:

$$\Phi = \frac{1}{2} \mu_1 (\dot{z}_1 - \dot{h}_1)^2 + \frac{1}{2} \mu_2 (\dot{z}_2 - \dot{h}_2)^2, \quad (5)$$



де μ_1 і μ_2 – приведені коефіцієнти опору відповідно передніх і задніх підвісок та шин льонозбирального комбайна.

Обчислимо узагальнені сили:

$$Q_{z_i} = Q_{z_i}^{(\Pi)} + Q_{z_i}^{(\Phi)} + Q_{z_i}^{(B)}, \quad i = 1, 2, \quad (6)$$

де

$$Q_{z_i}^{(\Pi)} = -\frac{\partial \Pi}{\partial z_i} = -c_i(z_i - h_i),$$

$$Q_{z_i}^{(\Phi)} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}_i} = -\mu_i(\dot{z}_i - \dot{h}_i),$$

$$Q_{z_1}^{(B)} = \frac{F_{KPZ}l_2 - M_{KP}}{l},$$

$$Q_{z_2}^{(B)} = \frac{F_{KPZ}l_1 - M_{KP}}{l}.$$

Дослідимо тепер коливальний рух причіпного льонозбирального комбайна. Тоді еквівалентна динамічна модель буде мати вигляд, зображений на рис. 2. Це механічна система з одним ступенем вільності. В якості узагальненої координати також приймемо вертикальне зміщення z підресорної маси над задніми колесами (передніх не має). Узагальнену координату будемо відраховувати від положення статичної рівноваги системи. Тоді рух даної механічної системи описується рівнянням у формі Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial T}{\partial z} = Q_z, \quad (7)$$

При цьому відповідно кінетична і потенціальна енергії та дисипативна функція мають такий вигляд:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{z}^2,$$

$$\Pi = \frac{1}{2} c(z - h),$$

$$h = h(t),$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \mu (\dot{z} - \dot{h})^2,$$

де: $m = \frac{M l_1}{l}$ – маса частини льонозбирального комбайна, яка здійснює обертальні коливальні рухи.

Визначимо узагальнені сили та зробимо необхідні перетворення:

$$Q_z = Q_z^{(\Pi)} + Q_z^{(\Phi)} + Q_z^{(B)},$$

$$Q_z^{(\Pi)} = -\frac{\partial \Pi}{\partial z} = -c(z - h),$$

$$Q_z^{(\Phi)} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}} = -\mu(\dot{z} - \dot{h}),$$

$$Q_z^{(B)} = 0,$$

$$Q_z = -c(z - h) - \mu(\dot{z} - \dot{h}), \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} = m \dot{z},$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) = m \ddot{z},$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

Підставляючи (8) у (7), одержимо диференціальне рівняння руху такого вигляду:

$$m \ddot{z} = -c(z - h) - \mu(\dot{z} - \dot{h}).$$

Перепишемо його таким чином:

$$\ddot{z} = -\frac{c}{m}(z - h) - \frac{\mu}{m}(\dot{z} - \dot{h}),$$

або

$$\ddot{z} + \frac{\mu}{m} \dot{z} + \frac{c}{m} z = \frac{c h}{m} + \frac{\mu}{m} \dot{h}, \quad (9)$$

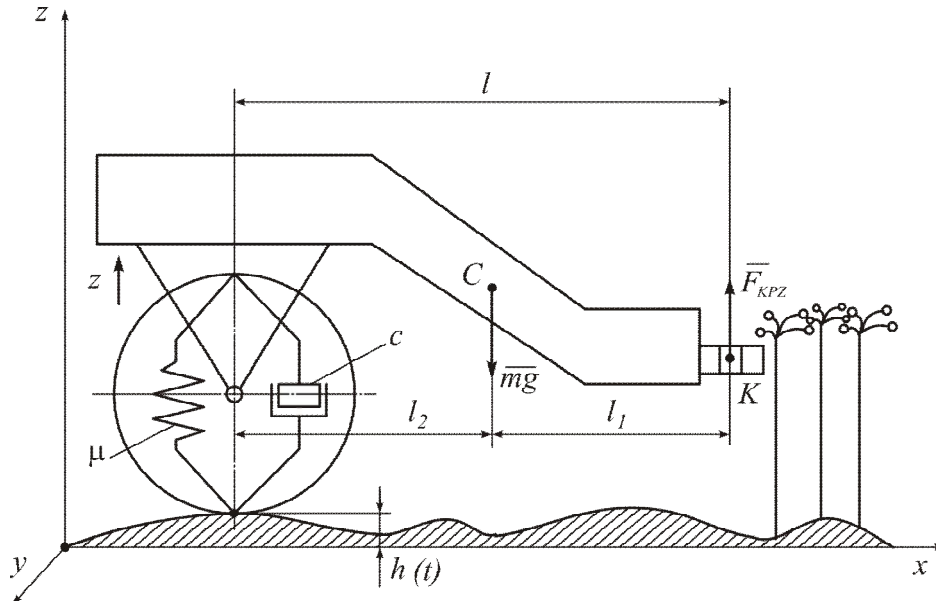


Рис. 2. Еквівалентна схема льонозбирального комбайна, яка приведена до коливальної механічної системи з одним ступенем вільності

Нехай

$$\frac{c}{m} = k^2,$$

$$\frac{\mu}{2m} = n,$$

Тоді

$$\ddot{z} + 2n\dot{z} + k^2 z = \frac{ch(t)}{m} + \frac{\mu}{m} \dot{h}(t),$$

$$\ddot{z} + 2n\dot{z} + k^2 z = k^2 h(t) + 2n\dot{h}(t),$$

$$z = z_1 + z_2,$$

$$\ddot{z}_1 + 2n\dot{z}_1 + kz_1 = 0.$$

Згідно з теорією диференціальних рівнянь загальний розв'язок даного рівняння має вигляд:

1. $z_1(t) = e^{-nt} [C_1 \cos(k_1 t) + C_2 \sin(k_1 t)]$, якщо малий опір $n < k$; $k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}$
або $z_1(t) = e^{-nt} \sin(k_1 t + \beta)$,
2. $z_1(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}$, де $\lambda_1 = -n + \sqrt{n^2 - k^2}$; $\lambda_2 = -n - \sqrt{n^2 - k^2}$
 $z_1(t) = e^{-nt} (C_1 e^{k_2 t} + C_2 e^{-k_2 t})$, великий опір ($n > k$) $k_2 = \sqrt{n^2 - k^2}$,
3. $z_1(t) = e^{-nt} (C_1 + C_2 t)$ $n = k$ – критичний опір.

Випадок (2), (3) – це згасаючі неколивальні рухи. Випадок (1) – згасаючі коливальні рухи.

Структура $z_2(t)$ – часткового розв'язку диференціального рівняння залежить від форми нерівностей поверхні ґрунту, тобто від $h(t)$.

Нехай у першому наближенні нерівності поверхні ґрунту мають вигляд гармонійної функції такого вигляду:

$$h(t) = h_o \sin\left(\frac{Vt}{L}\right),$$

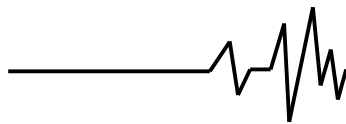
де $h(t)$ – висота нерівності поверхні ґрунту; L – довжина нерівності поверхні ґрунту; V – стала швидкість руху льонозбирального комбайна; (h_o, V, L) – параметри, значення яких задаються.

Позначимо

$$\frac{V}{L} = k_3,$$

$$h(t) = h_o \sin(k_3 t).$$

Тоді



$$\begin{aligned} \dot{h}(t) &= h_0 k_3 \cos(k_3 t), \\ k^2 h(t) + 2n\dot{h}(t) &= k^2 h_0 \sin(k_3 t) + \\ &+ 2nh_0 k_3 \cos(k_3 t) = \\ &= A_0 \sin(k_3 t) + B_0 \cos(k_3 t), \\ \ddot{z} + 2n\dot{z} + k^2 z &= A_0 \sin(k_3 t) + B_0 \cos(k_3 t), \end{aligned}$$

де

$$k^2 = \frac{c}{m},$$

$$n = \frac{\mu}{2m},$$

$$k = \frac{V}{L},$$

$$A_0 = k^2 h_0,$$

$$B_0 = 2nk_3 h_0.$$

$$z_2(t) = A \sin(k_3 t) + B \cos(k_3 t), \text{ якщо } k_3 \neq k, \text{ тобто}$$

$$\sqrt{\frac{c}{m}} \neq \frac{V}{L},$$

$$\text{якщо } \sqrt{\frac{c}{m}} = \frac{V}{L}, \text{ то буде резонанс.}$$

$$\dot{z}_2(t) = Ak_3 \cos(k_3 t) + Bk_3 \sin(k_3 t),$$

$$\ddot{z}_2(t) = -Ak_3^2 \sin(k_3 t) + Bk_3^2 \cos(k_3 t),$$

$$- Ak_3^2 \sin(k_3 t) - Bk_3^2 \cos(k_3 t) + 2n \left[Ak_3 \cos(k_3 t) + Bk_3 \sin(k_3 t) \right] +$$

$$+ k^2 \left[A \sin(k_3 t) + B \cos(k_3 t) \right] \equiv A_0 \sin(k_3 t) + B_0 \cos(k_3 t),$$

$$\left. \begin{aligned} \sin(k_3 t) \left[-Ak_3^2 - 2nk_3 + Ak^2 - A_0 \right] + \\ + \cos(k_3 t) \left[-Bk_3^2 - 2nk_3 A + Bk^2 - B_0 \right] \equiv 0, \end{aligned} \right| \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} A(k^2 - k_3^2) - 2nk_3 B = A_0 \\ B(k^2 - k_3^2) + 2nk_3 A = B_0 \end{cases} \Rightarrow A = \frac{A_0 + 2nk_3 B}{k^2 - k_3^2},$$

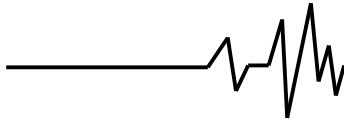
$$B(k^2 - k_3^2) + 2nk_3 \frac{A_0 + 2nk_3 B}{k^2 - k_3^2} = B_0,$$

$$B \left[k^2 - k_3^2 + \frac{4n^2 k_3^2}{k^2 - k_3^2} \right] = B_0 - \frac{2nk_3 A_0}{k^2 - k_3^2},$$

$$B \left[\frac{(k^2 - k_3^2) + 4n^2 k_3^2}{k^2 - k_3^2} \right] = \frac{B_0(k^2 - k_3^2) - 2nk_3 A_0}{k^2 - k_3^2},$$

$$B = \frac{2nk_3 h_0 (k^2 - k_3^2) - 2nk_3 k^2 h_0}{(k^2 - k_3^2)^2 + 4n^2 k_3^2} = - \frac{2nk_3^3 h_0}{(k^2 - k_3^2)^2 + 4n^2 k_3^2},$$

$$B = - \frac{2nk_3^3 h_0}{(k^2 - k_3^2)^2 + 4n^2 k_3^2},$$



$$A = \frac{\left(A_0 + 2nk_3 \frac{-2nk_3^2 h_0}{(k^2 - k_3^2) + 4n^2 k_3^2} \right)}{(k^2 - k_3^2)} =$$

$$\frac{\left(A_0 - \frac{4n^2 k_3^4 h_0}{(k^2 - k_3^2) + 4n^2 k_3^2} \right)}{(k^2 - k_3^2)} =$$

$$\frac{\left(k^2 h_0 - \frac{4n^2 k_3^4 h_0}{(k^2 - k_3^2) + 4n^2 k_3^2} \right)}{(k^2 - k_3^2)} =$$

$$\frac{(k^2 - k_3^2)^2 k^2 h_0 + 4n^2 k_3^2 k^2 h_0 - 4n^2 k_3^4 h_0}{\left[(k^2 - k_3^2)^2 + 4n^2 k_3^2 \right] (k^2 - k_3^2)} =$$

$$= \frac{(k^2 - k_3^2) k^2 h_0 + 4n^2 k_3^2 h_0}{(k^2 - k_3^2)^2 + 4n^2 k_3^2} = \frac{h_0 \left[k^2 (k^2 - k_3^2) + 4n^2 k_3^2 \right]}{(k^2 - k_3^2)^2 + 4n^2 k_3^2}.$$

Отже

$$A = \frac{h_0 \left[k^2 (k^2 - k_3^2) + 4n^2 k_3^2 \right]}{(k^2 - k_3^2)^2 + 4n^2 k_3^2},$$

$$B = -\frac{2nk_3^3 h_0}{(k^2 - k_3^2)^2 + 4n^2 k_3^2},$$

$$z_2(t) = A \sin(k_3 t) + B \cos(k_3 t) \equiv H \sin(k_3 t + \beta_3),$$

де

$$H = \sqrt{A^2 + B^2},$$

$$\operatorname{tg} \beta_3 = \frac{B}{A},$$

$$z(t) = z_1(t) + H \sin(k_3 t + \beta_3),$$

При $t > T$,

де T деякий час;

$$z(t) \approx H \sin(k_3 t + \beta_3) \quad - \text{вимушені}$$

коливання.

Якщо $n < k$ – малий опір, тоді маємо:

$$z(t) = a e^{-nt} \sin(k_1 t + \beta) + H \sin(k_3 t + \beta_3).$$

На рис. 3, показано вертикальні коливання причіпного льонозбирального агрегату при таких значеннях параметрів:

$$l = 3,00 \text{ м}; l_1 = 2,975 \text{ м}; l_2 = 0,025 \text{ м}; L = 1 \text{ м};$$

$$V = 1,5 \text{ м/с}; M = 1800 \text{ кг}; c = 250\,000 \text{ Н/м};$$

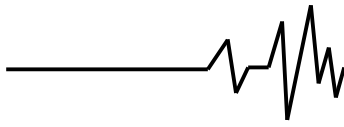
$$\mu = 1785 \text{ кг/с}; h_0 = 0,03 \text{ м}; z_2(0) = 0; \dot{z}_2(0) = 0.$$

Графік побудований із використанням пакету прикладних програм Maple 7.

```

VER := proc (v, L, h0, M, l, l1, l2, c, MU, z0, zvo);
Local m, kk1, k1, k3, kk3, n, A0, B0, A, B, H, B3, AS, AKS, a, B1;
m := M*l1/l; kk1 := c/m; k1 := sqrt(kk1); k3 := v/L;
kk3 := k3*k3; n := MU/(2*m); A0 := kk1*h0; B0 := 2*n*k3*h0;
A := h0*(kk1*(kk1 - kk3) + 4*n*n*kk3) / ((kk1 - kk3)**2 + 4*n*n*kk3);
B := -2*n*k3*kk3*h0/((kk1 - kk3)**2 + 4*n*n*kk3);
H := sqrt(A**2 + B**2); B3 := arctan(B/A);
AS := z0 - H*sin(B3); AKS := zvo + n*AS - H*k3*cos(B3);
A := sqrt(AS**2 + AKS**2); B1 := arctan(AS/AKS);
Plot (a*exp(-n*t)*sin(k1*t + B1) + H*sin(k3*t + B3), t = 0 .. 3*Pi, thickness = 3);
end;
VER (1.5, 1.0, 0.03, 1800.0, 3.0, 2.975, 0.025, 250000, 2000, 0, 0);

```



Із графіка, наведеного на рис. 3 бачимо, що у початковий період часу (0-9 с) вплив форми нерівностей поверхні ґрунту на поперечні коливання агрегату, в першу чергу

його брального апарату, суттєвий, а при $t > 9$ с коливання агрегату узгоджується із формою нерівностей поверхні ґрунту.

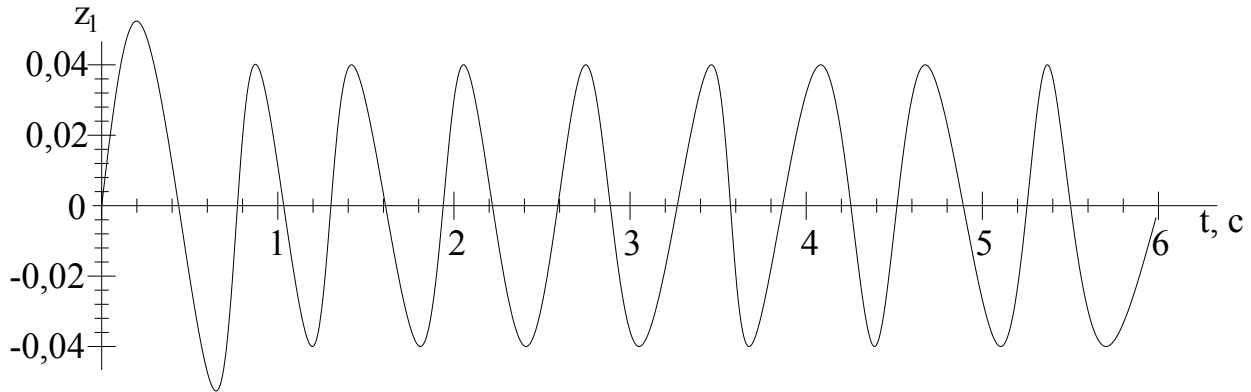


Рис. 3. Відхилення брального апарату льонозбирального комбайна від положення статистичної рівноваги на початок його руху

Висновки

Запропонована теорія руху льонозбиральних агрегатів по нерівностях поверхні ґрунту, які виконують технологічний процес збирання льону-довгунця. Під час руху льонозбиральні агрегати коливаються, рухаючись по нерівності поверхні поля та завдяки пружних властивостей його ходових коліс і підвісок. Відповідно їх бральні апарати відхиляються від положення статичної рівноваги та прямолінійного руху, що спричиняє значну розтягнутість стрічки льону та не відвідає необхідним параметрами її товщини і кривизни, що негативно впливає на якість зібраного льону.

Застосування цієї теорії дає можливість знайти такі конструктивні параметри, які будуть сприяти стабілізації руху льонозбирального агрегату, що у свою чергу приведе до покращення якості зібраного льоноволокна, відповідно збільшує рентабельність вирощування льону.

Література

1. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику. К.: Сільгоспосвіта, 1996. – 252 с.
2. Горбовий А.Ю. Побудова математичної моделі функціонування причіпного льонозбирального агрегата // Сборник научных трудов КМТИ "Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий". Выпуск 4. Керчь: КМТИ. – с.181-186.
3. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е., Богаров Н.Ф., Ксенович И.П., Солонский А.С. Тракторы: Теория: – М.: Машиностроение, 1988 – 376 с.
4. Камкэ Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971. – 278 с.