

де

$$A_1 = \frac{-1}{4C_{22}(\bar{a})} \left[10C_{11}(\bar{a}) + C_{22}^2(\bar{a}) + C_{11}^{(2)}(\bar{a}) \right];$$

$$B_1 = -\frac{1}{C_{22}(\bar{a})} \left[2C_{11}(\bar{a})C_{22}^2(\bar{a}) - C_{22}^2(\bar{a}) + C_{11}^{(2)}(\bar{a})C_{22}(\bar{a}) \right];$$

$$C_1 = \frac{1}{4C_{22}(\bar{a})} \left[C_{22}^4(\bar{a}) - 2C_{22}^3(\bar{a}) + C_{11}^{(2)}(\bar{a})C_{22}^2(\bar{a}) \right].$$

Оскільки $B_{11}^{(0)}(\bar{a}) = \sigma_{11}(\bar{a})$, $B_{21}^{(0)}(\bar{a}) = D_{11}^{(0)}(\bar{a}) = \sigma_{12}(\bar{a}) = \sigma_{21}(\bar{a})$, $D_{21}^{(0)}(\bar{a}) = \sigma_{22}(\bar{a})$, то всі шукані функції є визначені.

Система (3) є усередненою в першому покращаному наближенні для стохастичної системи (1). Якщо в формулах (2) не враховувати доданки $\varepsilon U_1(\bar{a}, \bar{\psi})$ та $\varepsilon V_1(\bar{a}, \bar{\psi})$, то одержимо просто перше наближення.

1. Коломиець В.Т., Цікайло Т.-Н.М. *Асимптотические методы и периодические Атеб-функции в некоторых линейных задачах теории случайных колебаний.* – К., 1997.
2. Цікайло Т.-Н., Ляшенко В. *Дослідження випадкових коливань істотно нелінійних динамічних систем // Машинознавство.* – 2001. – №7(49). – С. 10 – 12.

УДК 631. 302

І.А. Вікович

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра нарисної геометрії та графіки

КОЛИВАННЯ ДВОШАРНІРНОЇ МАЯТНИКОВОЇ ШТАНГИ ОБПРИСКУВАЧА ДЛЯ ХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ РОСЛИН

© Вікович І.А., 2002

Розглянуто коливання двошарнірної маятникової штанги обприскувача, точка підвісу якої рухається в площині. Одержано систему нелінійних диференціальних рівнянь, які розв'язано числовим методом.

The oscillations and analysis two hinge pendulum's bar of a sprayer for chemical protection of plants. It is shown here the oscillations two hinge pendulum's bar of a sprayer which point of suspension is moving in space. System a non-linear differential equations is derived with a help of numerical method.

Для обприскування невеликих площ сільськогосподарських культур використовують обприскувачі, що мають переважно одношарнірні маятникові штанги, шириною захоплення до 12 м.

На наш погляд двошарнірна маятникова штанга повинна мати кращі стабілізуючі властивості, тобто менше піддаватись впливові від кінематичного збурення, зумовленого нерівностями ґрунтового профілю при виконанні технологічного процесу обприскування.

Передумовою і аналогом для втілення ідеї щодо використання двошарнірної маятникової штанги послужили вже існуючі чотиришарнірні важільні A - і V -подібні маятникові підвіски штангових обприскувачів, що мають непогані стабілізуючі характеристики.

Схема коливань двошарнірної маятникової штанги, точки підвісу якої здійснює вертикальні $z_0(t)$ і кутові $\theta(t)$ рухи в поперечно-вертикальній площині відносного напрямку руху обприскувача, наведена на рис. 1.

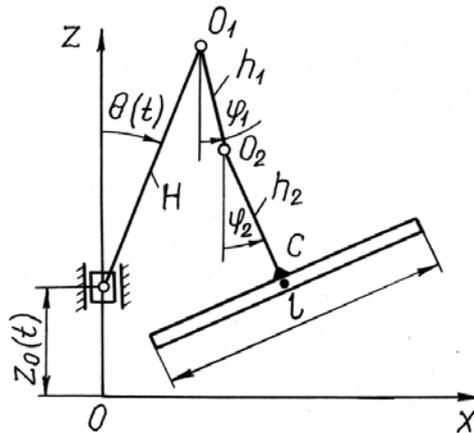


Рис. 1. Схема коливань двошарнірної маятникової штанги обприскувача

З достатньою для практики точністю можна наближено вважати, що $z(t) = Z_0 \cos vt$, $\theta(t) = \Theta_0 \cos vt$, де Z_0, Θ_0 і v відомі амплітуди і частота вертикальних та кутових коливань точки підвісу маятникової штанги O_1 , $v = \frac{2\pi\nu}{s}$, ν – швидкість руху обприскувача, s – довжина хвилі ґрунтового профілю.

Вважаємо безмасовими маятниками h_1 і h_2 , а саму штангу – абсолютно твердим тілом, маса якої зосереджена в її центрі ваги, у точці C .

Відстань від рами обприскувача O_0 до осі підвісу O_1 маятникової штанги дорівнює H .

Дана механічна система має два ступені вільності [1,4].

Виберемо за узагальнені координати кути повороту φ_1 і φ_2 маятників h_1 та h_2 , причому кут повороту φ_2 дорівнює куту повороту самої націпної штанги, тобто кутова деформація стрижня маятника h_2 відсутня.

Для одержання диференціальних рівнянь руху запропонованої маятникової штанги обприскувача використаємо систему рівнянь Лагранжа другого роду у вигляді

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}_i} = 0; \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Абсолютні координати центра ваги даної маятникової штанги дорівнюють

$$\begin{aligned} x_c &= H \sin \theta + h_1 \sin \varphi_1 + h_2 \sin \varphi_2; \\ z_c &= z_0 + H \cos \theta - h_1 \cos \varphi_1 - h_2 \cos \varphi_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Кінетична і потенціальна енергія системи визначається такими виразами:

$$T = \frac{1}{2} m V_c^2 + \frac{1}{2} J_{yc} \dot{\varphi}_2^2; \quad (3)$$

$$\Pi = mg[z_0 - H(1 - \cos\theta) + h_1(1 - \cos\varphi_1) + h_2(1 - \cos\varphi_2)] \quad (4)$$

де $V_c^2 = \dot{x}_c^2 + \dot{z}_c^2$, v_c – швидкість центра мас системи, $J_{yc} = \frac{ml^2}{12}$, g – пришвидшення земного тяжіння.

Вираз (3) для кінетичної енергії з урахуванням (2) матиме вигляд

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} m [H^2 \dot{\theta}^2 + h_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + h_2^2 \dot{\varphi}_2^2 + 2Hh_1 \dot{\theta} \dot{\varphi}_1 \cos(\theta + \varphi_1) + 2Hh_2 \dot{\theta} \dot{\varphi}_2 \cos(\theta + \varphi_2) + \\ & + 2h_1 h_2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \dot{z}_0 (\dot{z}_0 - 2H\dot{\theta} \sin\theta + 2h_1 \dot{\varphi}_1 \sin\varphi_1 + 2h_2 \dot{\varphi}_2 \sin\varphi_2)] + \\ & + \frac{ml^2}{2h} \dot{\varphi}_2^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Враховуючи, що на вісь маятникової штанги діє момент сил в'язкого опору, пропорційний його відносній кутовій швидкості, то функція розсіювання системи буде

$$\Phi = \frac{1}{2} (\alpha_{r1} \varphi_1^2 + \alpha_{r2} \varphi_2^2), \quad (6)$$

де α_{r1} , α_{r2} – коефіцієнти момента сил в'язкого тертя в шарнірах маятникової штанги.

Вираховуючи похідні від узагальнених координат і підставляючи значення всіх величин у систему рівнянь (1), одержимо, після відповідних перетворень, нелінійні диференціальні рівняння коливань двошарнірної маятникової штанги обприскувача:

$$\left. \begin{aligned} & h_1^2 \ddot{\varphi}_1 + h_1 h_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 + h_1 h_2 \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{\alpha_{r1}}{m} \dot{\varphi}_1 + \\ & + H h_1 (\ddot{\theta} \cos(\theta + \varphi_1) - \dot{\theta}^2 \sin(\theta + \varphi_1)) + h_1 (g + \ddot{z}_0) \sin \varphi_1 = 0; \\ & \left(h_2^2 + \frac{l^2}{12} \right) \ddot{\varphi}_2 + h_1 h_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 - h_1 h_2 \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{\alpha_{r2}}{m} \dot{\varphi}_2 + \\ & + H h_2 (\ddot{\theta} \cos(\theta + \varphi_2) - \dot{\theta}^2 \sin(\theta + \varphi_2)) + h_2 (g + \ddot{z}_0) \sin \varphi_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Враховуючи, що $\theta(t) = \Theta_0 \cos vt$ і $z(t) = Z_0 \cos vt$, система нелінійних диференціальних рівнянь буде:

$$\left. \begin{aligned} & \ddot{\varphi}_1 + \frac{h_2}{h_1} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 + \frac{h_2}{h_1} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 + \frac{\alpha_{r1}}{m h_1^2} \dot{\varphi}_1 + \\ & + \frac{1}{h_1} (g - Z_0 v^2 \cos vt) \sin \varphi_1 = \frac{H}{h_1} v^2 \Theta_0 [\cos vt \cdot \cos(\Theta_0 \cos vt + \varphi_1) + \\ & + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \sin(\Theta_0 \cos vt + \varphi_1)] \\ & \ddot{\varphi}_2 + h_1 h_2 \alpha_{h2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 - h_1 h_2 \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{\alpha_{r2} \cdot \alpha_{h2}}{m} \dot{\varphi}_2 + \\ & + h_2 \alpha_{h2} (g - Z_0 v^2 \cos vt) \sin \varphi_2 = H h_2 \alpha_{h2} v^2 \Theta_0 [\cos vt \cdot \cos(\Theta_0 \cos vt + \varphi_2) + \\ & + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \sin(\Theta_0 \cos vt + \varphi_2)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\text{де } \alpha_{h2} = \frac{12}{12h_2^2 + l^2}.$$

Покладемо

$$\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \approx 1; \quad \cos(\theta + \varphi_1) \approx 1; \quad \cos(\theta + \varphi_2) \approx 1; \quad \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \approx \varphi_1 - \varphi_2;$$

$$\sin(\theta + \varphi_1) \approx \theta + \varphi_1; \quad \sin(\theta + \varphi_2) \approx \theta + \varphi_2; \quad \dot{\varphi}_1^2 \approx 0; \quad \dot{\theta}^2 \approx 0.$$

Тоді система рівнянь (7) значно спроститься і стане системою лінійних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами

$$\left. \begin{aligned} h_1^2 \ddot{\varphi}_1 + h_1 h_2 \ddot{\varphi} + \frac{\alpha_{r1}}{m} \dot{\varphi}_1 + h_1 (g + \ddot{z}_0) \varphi_1 + H h_1 \ddot{\theta} &= 0, \\ \left(h_2^2 + \frac{l^2}{12} \right) \ddot{\varphi}_2 + h_1 h_2 \ddot{\varphi}_1 + \frac{\alpha_{r2}}{m} \dot{\varphi}_2 + h_2 (g + \ddot{z}_0) \varphi_2 + H h_2 \ddot{\theta} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Враховуючи, що $\theta(t) = \Theta_0 \cos vt$; $z_0(t) = Z_0 \cos vt$, систему (9) подамо у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\varphi}_1 + \frac{h_2}{h_1} \ddot{\varphi}_2 + \frac{\alpha_{r1}}{m h_1^2} \dot{\varphi}_1 + \frac{1}{h_1} (g - Z_0 v^2 \cos vt) \varphi_1 &= \frac{H}{h_1} \Theta_0 v^2 \cos vt, \\ \ddot{\varphi}_2 + h_1 h_2 \alpha_{h2} \ddot{\varphi}_1 + \frac{\alpha_{r2} \alpha_{h2}}{m} \dot{\varphi}_2 + h_2 \alpha_{h2} (g - Z_0 v^2 \cos vt) \varphi_2 &= \\ = H h_2 \alpha_{h2} \Theta_0 v^2 \cos vt. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Введемо безрозмірний час $\tau = \frac{vt}{2}$. Тоді $\dot{\varphi}_i$ та $\ddot{\varphi}_i$, $i=(1,2)$ подамо у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_i &= \frac{d\varphi_i}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} = \frac{d\varphi_i}{d\tau} \cdot \frac{v}{2}; \\ \ddot{\varphi}_i &= \frac{d^2\varphi_i}{d\tau^2} \cdot \left(\frac{d\tau}{dt} \right)^2 + \frac{d\varphi_i}{d\tau} \cdot \frac{d^2\tau}{dt^2} = \frac{d^2\varphi_i}{d\tau^2} \cdot \left(\frac{v}{2} \right)^2. \end{aligned}$$

Зробимо заміну для узагальнених координат $\varphi_1 = q_1$, $\varphi_2 = q_2$ і систему (10) після

перетворень зведемо до системи рівнянь Матьє [2], які відрізняються від канонічної форми тільки наявністю правої частини:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 q_1}{d\tau^2} + h_{21} \frac{d^2 q_2}{d\tau^2} + 2b_1 \frac{dq_1}{d\tau} + (a_1 - 2\varepsilon_1 \cos 2\tau) q_1 &= d_1 \cos 2\tau; \\ \frac{d^2 q_2}{d\tau^2} + h_{12} \frac{d^2 q_1}{d\tau^2} + 2b_2 \frac{dq_2}{d\tau} + (a_2 - 2\varepsilon_2 \cos 2\tau) q_2 &= d_2 \cos 2\tau; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$h_{21} = \frac{h_2}{h_1}; \quad b_1 = \frac{\alpha_{r1}}{m h_1^2 v}; \quad a_1 = \frac{4g}{v^2 h_1}; \quad \varepsilon_1 = \frac{2Z_0}{h_1}; \quad d_1 = \frac{4H\Theta_0}{h_1};$$

де

$$\begin{aligned} h_{12} &= h_1 h_2 \alpha_{h2}; \quad b_2 = \frac{\alpha_{r2} \alpha_{h2}}{m v}; \quad a_2 = \frac{4\alpha_{h2} g h_2}{v^2}; \quad \varepsilon_2 = 2h_2 \alpha_{h2} Z_0; \\ d_2 &= 4H h_2 \alpha_{h2} \Theta_0; \end{aligned}$$

Розв'язуючи систему (11) відносно $\frac{d^2 q_1}{d\tau^2}$ і $\frac{d^2 q_2}{d\tau^2}$, одержимо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 q_1}{d\tau^2} &= \frac{1}{H_{12}} \left\{ h_{12} \left[2b_2 \frac{dq_2}{d\tau} + (a_2 - 2\varepsilon_2 \cos 2\tau) q_2 - d_2 \cos 2\tau \right] - 2b_1 \frac{dq_1}{d\tau} - \right. \\ &\quad \left. - (a_1 - 2\varepsilon_1 \cos 2\tau) q_1 + d_1 \cos 2\tau \right\}; \\ \frac{d^2 q_2}{d\tau^2} &= \frac{1}{H_{12}} \left\{ h_{12} \left[2b_1 \frac{dq_1}{d\tau} + (a_1 - 2\varepsilon_1 \cos 2\tau) q_1 - d_1 \cos 2\tau \right] - 2b_2 \frac{dq_2}{d\tau} - \right. \\ &\quad \left. - (a_2 - 2\varepsilon_2 \cos 2\tau) q_2 + d_2 \cos 2\tau \right\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де $H_{12} = 1 - h_{12} h_{21}$.

Система диференціальних рівнянь (12) вимагає побудови розв'язків з використанням спеціальних функцій Мат'є [3].

Доцільніше систему рівнянь (12) розв'язати числовим методом. Для цього зробимо заміну:

$$\frac{d^2 q_1}{d\tau^2} = \psi_{01}; \quad \frac{dq_1}{d\tau} = \psi_{01}; \quad \frac{d^2 q_2}{d\tau^2} = \psi_{02}; \quad \frac{dq_2}{d\tau} = \psi_{02}$$

і систему лінійних диференціальних рівнянь другого порядку зі змінними коефіцієнтами (12) подамо у вигляді системи чотирьох лінійних диференціальних рівнянь першого порядку

$$\left. \begin{aligned} \psi_{01} &= \frac{1}{H_{12}} \{h_{21} [2b_2 \psi_{02} + (a_2 - 2\varepsilon_2 \cos 2\tau) q_2 - d_2 \cos 2\tau] - 2b_1 \psi_{01} - \\ &- (a_1 - 2\varepsilon_1 \cos 2\tau) q_1 + d_1 \cos 2\tau\}; \\ \frac{dq_1}{d\tau} &= \psi_{01}; \\ \psi_{02} &= \frac{1}{H_{12}} \{h_{12} [2b_1 \psi_{01} + (a_1 - 2\varepsilon_1 \cos 2\tau) q_1 - d_1 \cos 2\tau] - 2b_2 \psi_{02} - \\ &- (a_2 - 2\varepsilon_2 \cos 2\tau) q_2 + d_2 \cos 2\tau\}; \\ \frac{dq_2}{d\tau} &= \psi_{02}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Система нелінійних диференціальних рівнянь (8) також може бути розв'язана найефективніше тільки числовим методом. Розв'язуючи систему рівнянь (8) відносно $\ddot{\varphi}_1$ і $\ddot{\varphi}_2$,

одержимо:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\varphi}_1 &= \frac{\alpha_{r2} \alpha_{h2} h_2}{h_1 h_\varphi m} \ddot{\varphi}_2 - \frac{h_2^2}{2h_\varphi} \sin 2(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 + \frac{h_2^2 \alpha_{h2}}{h_1 h_\varphi} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \cdot (g - Z_0 v^2 \cos vt) \cdot \\ &\cdot \sin \varphi_2 - \frac{h_2^2}{h_1 h_\varphi} \alpha_{h2} v^2 \Theta_0 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \cdot [\cos vt \cdot \cos(\Theta_0 \cos vt + \varphi_2) + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \\ &\cdot \sin(\Theta_0 \cos vt + \varphi_2)] - \frac{h_2}{h_1 h_\varphi} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 - \frac{\alpha_{r1}}{mh_2^2} \dot{\varphi}_1 - \frac{1}{h_1 h_\varphi} (g - Z_0 v^2 \cos vt) \cdot \\ &\cdot \sin \varphi_1 + \frac{H}{h_1 h_\varphi} v^2 \Theta_0 [\cos vt \cdot \cos(\Theta_0 \cos vt + \varphi_1) + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \sin(\Theta_0 \cos vt + \varphi_1)]; \\ \ddot{\varphi}_2 &= \frac{h_2^2}{2h_\varphi} \alpha_{h2} \sin 2(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 + \frac{h_2}{mh_1 h_\varphi} \alpha_{r1} \alpha_{h2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1 + \frac{h_2}{h_\varphi} \alpha_{h2} \cdot \\ &\cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) (g - Z_0 v^2 \cos vt) \sin \varphi_1 - \frac{Hh_2}{h_\varphi} \alpha_{h2} v^2 \Theta_0 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \cdot [\cos vt \cdot \\ &\cdot \cos(\Theta_0 \cos vt + \varphi_1) + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \sin(\Theta_0 \cos vt + \varphi_1)] + \frac{h_1 h_2}{h_\varphi} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 - \\ &- \frac{\alpha_{r2} \alpha_{h2}}{mh_\varphi} \ddot{\varphi}_2 - \frac{h_2}{h_\varphi} \alpha_{h2} (g - Z_0 v^2 \cos vt) \cdot \sin \varphi_2 + \frac{Hh_2 \alpha_{h2}}{h_\varphi} v^2 \Theta_0 \cdot \\ &\cdot [\cos vt \cdot \cos(\Theta_0 \cos vt + \varphi_2) + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \sin(\Theta_0 \cos vt + \varphi_2)], \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де $h_\varphi = 1 - h_2^2 \alpha_{h2} \cos^2(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Для застосування числового методу необхідно зробити заміну:

$\ddot{\varphi}_1 = \dot{\psi}_1$; $\dot{\varphi}_1 = \psi_1$; $\ddot{\varphi}_2 = \dot{\psi}_2$; $\dot{\varphi}_2 = \psi_2$ і подати систему рівнянь (14) у вигляді чотирьох

нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_1 &= a_{01}(t, \varphi_1, \varphi_2) \psi_2 - a_{02}(t, \varphi_1, \varphi_2) \sin 2(\varphi_1 - \varphi_2) \psi_1^2 + a_{03}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \cdot \\ &\cdot \sin \varphi_2 - a_{04}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + a_{05}(t, \varphi_1, \varphi_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \psi_2^2 - a_{06}(t, \varphi_1, \varphi_2) \cdot \\ &\cdot \psi_1 - a_{07}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) \sin \varphi_1 + a_{08}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt); \\ \dot{\varphi}_1 &= \psi_1, \\ \dot{\psi}_2 &= b_{01}(t, \varphi_1, \varphi_2) \sin 2(\varphi_1 - \varphi_2) \psi_2^2 - b_{02}(t, \varphi_1, \varphi_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \psi_1 + b_{03}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) \cdot \\ &\cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - b_{04}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + b_{05}(t, \varphi_1, \varphi_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \psi_2^2 - \\ &- b_{06}(t, \varphi_1, \varphi_2) \cdot \psi_2 - b_{07}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) \sin \varphi_2 + b_{08}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt); \\ \dot{\varphi}_2 &= \psi_2, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де

$$\begin{aligned} a_{01}(t, \varphi_1, \varphi_2) &= \frac{\alpha_{r2} \alpha_{h2} h_2}{h_1 h_\varphi m}; \quad a_{02}(t, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{h_2^2}{2 h_\varphi}; \quad a_{03}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) = \frac{h_2^2 \alpha_{h2} g_v}{h_1 h_\varphi}; \\ g_v &= g - Z_0 v^2 \cos vt; \quad a_{04}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) = \frac{h_2^2}{h_1 h_\varphi} \alpha_{h2} v^2 \Theta_0 (\cos vt \cdot \cos v_{2\varphi} + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \sin v_{2\varphi}); \\ a_{05}(t, \varphi_1, \varphi_2) &= \frac{h_2}{h_1 h_\varphi}; \quad a_{06}(t, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{\alpha_{r1}}{m h_1^2 h_\varphi}; \quad a_{07}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) = \frac{g_v}{h_1 h_\gamma}; \\ a_{08}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) &= \frac{H}{h_1 h_\varphi} v^2 \Theta_0 (\cos vt \cdot \cos v_{1\varphi} + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \sin v_{1\varphi}); \\ b_{01}(t, \varphi_1, \varphi_2) &= \frac{h_2^2 \alpha_{h2}}{2 h_\varphi}; \quad b_{02}(t, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{h_2 \alpha_{r1} \alpha_{h2}}{m h_1 h_\varphi}; \quad b_{03}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) = \frac{h_2 \alpha_{h2} g_v}{h_\varphi}; \\ b_{04}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) &= \frac{H h_2}{h_\varphi} \alpha_{h2} v^2 \Theta_0 (\cos vt \cdot \cos v_{1\varphi} + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \sin v_{1\varphi}); \\ b_{05}(t, \varphi_1, \varphi_2) &= \frac{h_1 h_2}{h_\varphi}; \quad b_{06}(t, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{\alpha_{r2} \alpha_{h2}}{m h_\varphi}; \quad b_{07}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) = \frac{h_2 \alpha_{h2} g_v}{h_\gamma}; \\ b_{08}(t, \varphi_1, \varphi_2, vt) &= \frac{H h_2 \alpha_{h2}}{h_\varphi} v^2 \Theta_0 (\cos vt \cdot \cos v_{2\varphi} + \Theta_0 \sin^2 vt \cdot \sin v_{2\varphi}) \end{aligned}$$

Результати числового розв'язку систем нелінійних диференціальних рівнянь (15) подані у вигляді графіків на рис. 2 – 7.

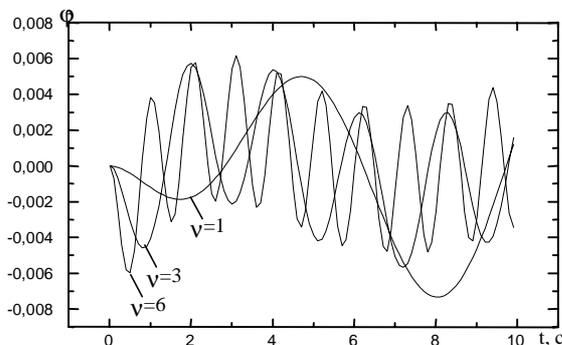


Рис. 2. Кутові відхилення маятникових штанг обприскувача при різних частотах кінематичного гармонічного збурення

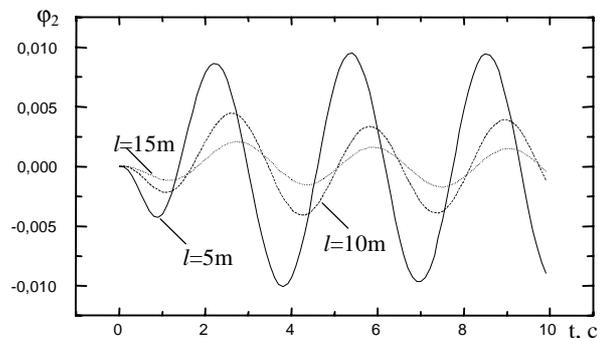


Рис. 3. Амплітуди кутових відхилень штанги при різних її довжинах під час експлуатації

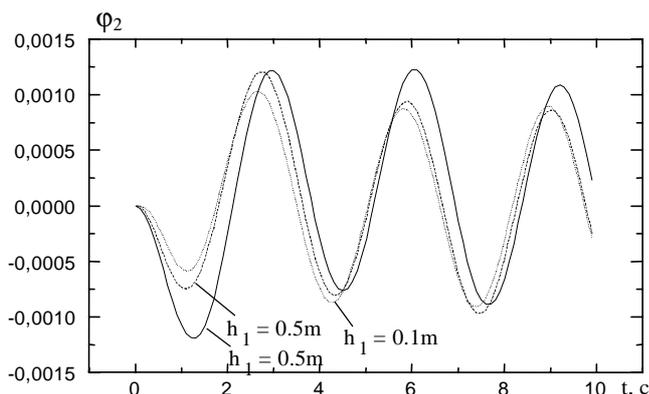


Рис. 4. Куткові відхилення двошарнірної маятникової штанги при різних довжинах першого маятника h_1

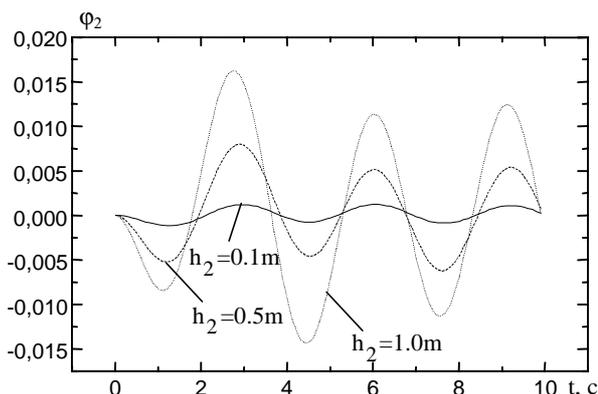


Рис. 5. Куткові відхилення двошарнірної маятникової штанги при різних довжинах другого маятника h_2

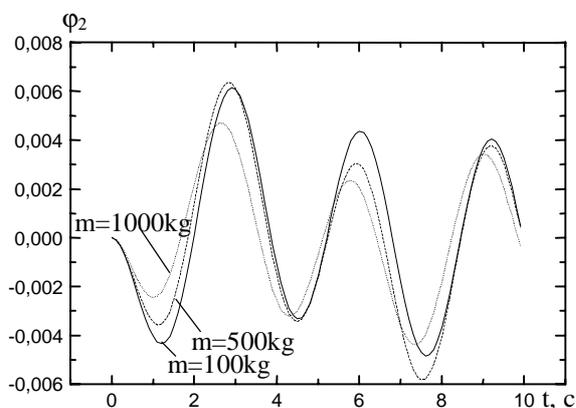


Рис. 6. Вплив демпфування в шарнірах маятникової штанги на її коливальний процес

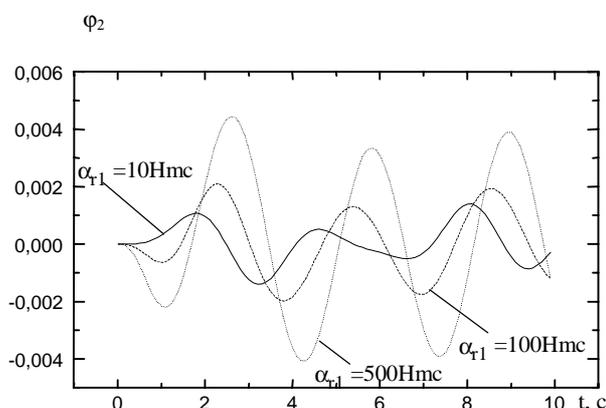


Рис. 7. Вплив маси начіпної двошарнірної маятникової штанги обприскувача на амплітуди її куткових відхилень

З рисунків видно, що амплітуди куткових відхилень маятникової двошарнірної штанги обприскувача зменшуються із збільшенням довжини начіпної штанги, частоти кінематичного збурення, маси штанги і величини в'язкого тертя в шарнірах маятників.

Отже, одержані результати досліджень дають змогу визначити зони стійкості двошарнірної маятникової штанги при коливаннях і раціонально підібрати геометричні та жорсткісні параметри конструкції обприскувача під час виконання технологічного процесу обприскування.

1. Бутенин Н.В. Введение в аналитическую механику. – М.: Наука, 1971 – 264 с.
2. Каннингхэм В. Введение в теорию нелинейных систем. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962 – 456 с.
3. Мак-Лахлан Н.В. Теория и приложения функций Матье / Пер. с. англ. – М., 1953.
4. Яблонский А.А., Норейко С.С. Курс теории колебаний. – М.: Высшая школа, 1966. – 355 с.