

УДК 621.01:632.981.2

**М. Дмитриченко¹, докт. техн. наук; І. Вікович², докт. техн. наук;
Б. Дівесв², канд. техн. наук; І. Бутитер³**

¹Національний транспортний університет

²Національний університет “Львівська політехніка”

³Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С.Підстригача НАН України

ДИНАМІКА НАЧІПНИХ ШТАНГ МАШИН ДЛЯ ХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ РОСЛИН

На основі комплексного підходу з використанням загальних механічних принципів і сучасних методів обчислень розроблено ефективні аналітичні і числові методи розрахунку вібраційних процесів в штангових обприскувачах з начіпними функціональними елементами. Проведено розрахунок і оптимізацію основних елементів мобільних машин для хімічного захисту рослин.

Головним засобом хімічного захисту рослин є обприскування, яке здійснюється переважно штанговими обприскувачами. Коливання начіпної штанги обприскувача в процесі експлуатації значно погіршує якість і знижує точність обприскування рослин. Тому актуальною проблемою є зменшення амплітуди коливань начіпних штанг обприскувачів як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах. Крім того, розробка високопродуктивних штангових обприскувачів потребує уточненого аналізу динамічних процесів у таких машинах, оптимізації конструкцій, оцінки міцності та надійності й стабілізації утримувальних шарнірно-з'єднаних широкоохоплювальних штанг, подальшого удосконалення ефективних інженерних методів розрахунку тощо [1].

Для аналізу динамічних процесів у штангових обприскувачах з рідиною в ємності та начіпними функціональними елементами, встановленими на маятникових підвісках, важливим є як врахування коливань начіпної штанги, так і врахування впливу руху рідини в ємності та трубопроводах, а також податливості ґрунту [2, 3, 4].

Нами розроблені розрахункові схеми, математичні моделі та ефективний аналітично–числовий метод розрахунку динамічних процесів у штангових обприскувачах у поздовжньо– і поперечно–вертикальних площинах з рідиною в ємності, з урахуванням податливості ґрунту і коливань начіпної штанги (рис. 1, 2).

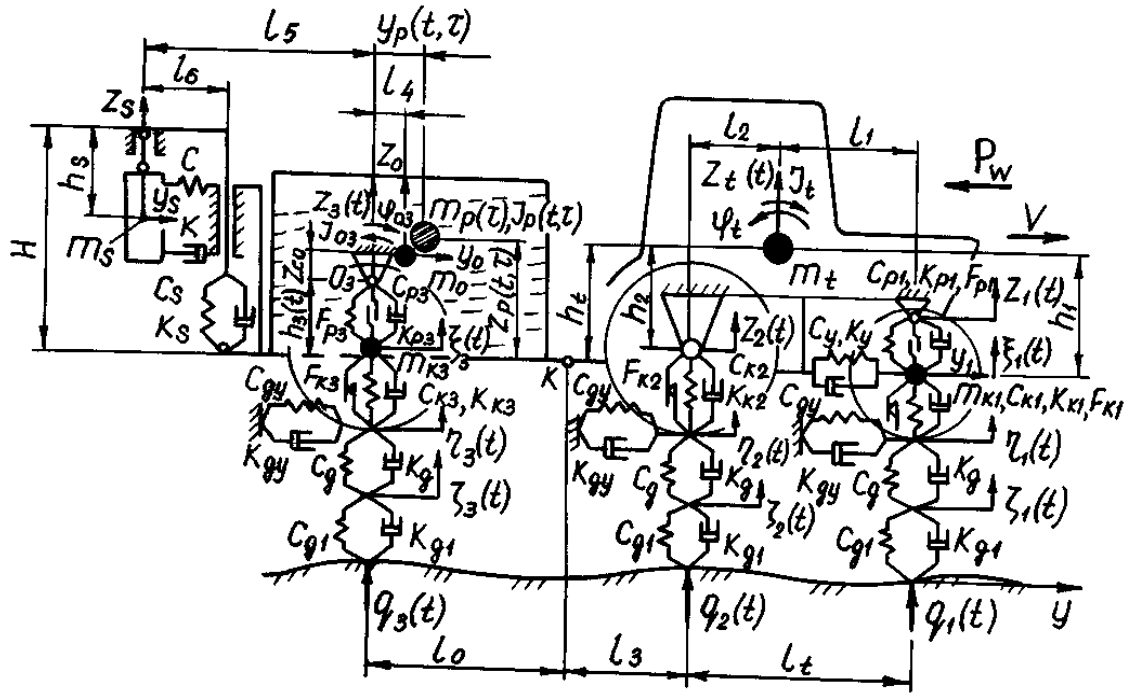


Рис.1. Розрахункова схема коливань колісного тракторного причіпного штангового обприскувача з рідиною в ємності під час його руху по деформівному ґрунті

На рис. 1 за узагальнені координати вибрано: y , y_1 , y_0 , і y_s – позовжні переміщення трактора, переднього моста трактора, обприскувача і націпної штанги; z , z_3 , z_s – вертикальні переміщення підресорених частин трактора, обприскувача, націпної штанги; ξ_1 , ξ_3 , η_1 , ζ_1 – вертикальні переміщення непідресорених мас переднього моста трактора, моста обприскувача, верхнього та нижнього шарів ґрунту; φ_t і φ_{03} – кутові відхилення трактора і обприскувача у позовжньо-вертикальній площині; φ_{ki} – кути поворотів коліс тракторного агрегату.

На основі рівнянь Лагранжа другого роду одержано систему нелінійних диференціальних рівнянь руху причіпного обприскувача в позовжньо-вертикальній площині у вигляді:

$$m_t \ddot{x} + 2k_{p1}(\dot{x} + l_1 \dot{\varphi}_t - \dot{\xi}_1) + 2F_{p1} \text{sign}(\dot{x} + l_1 \dot{\varphi}_t - \dot{\xi}_1) + 2c_{p1}(\dot{x} + l_1 \dot{\varphi}_t - \dot{\xi}_1) = 0;$$

$$M_0 \ddot{x}_3 + (M_0 l_4 + m_s l_5) \ddot{\varphi}_{03} + 2k_{p3}(\dot{x}_3 - \dot{\xi}_3) + 2c_{p3}(\dot{x}_3 - \dot{\xi}_3) + 2F_{p3} \text{sign}(\dot{x}_3 - \dot{\xi}_3) - k_s [\dot{x}_3 - (l_5 - l_6) \dot{\varphi}_{03}] + N_z = 0;$$

$$J_t \ddot{\varphi}_t + k_{p1}(\dot{x} + l_1 \dot{\varphi}_t - \dot{\xi}_1) l_1 + c_{p1}(z_t + l_1 \dot{\varphi}_t - \dot{\xi}_1) l_1 + 2F_{p1} \text{sign}(\dot{x} + l_1 \dot{\varphi}_t - \dot{\xi}_1) l_1 = 0;$$

$$(J_{00} + J_p(t, \tau)) \ddot{\varphi}_{03} + \dot{x}_p(t, \tau) \dot{\varphi}_{03} + (M_0 l_4 + m_s l_5) \ddot{x}_3 - k_s [\dot{x}_3 - (\dot{x}_3 + (l_5 - l_6) \dot{\varphi}_{03})] \times (l_5 - l_6) - c_s [z_s - (z_3 + (l_5 - l_6) \dot{\varphi}_{03})] \cdot (l_5 - l_6) = N_y \dot{z}_p(t, \tau) + N_z \dot{y}_p(t, \tau);$$

$$m_s \ddot{x}_s + k_s [z_s - (\dot{x}_3 + (l_5 - l_6) \dot{\varphi}_{03})] + c_s [z_s - (z_3 + (l_5 - l_6) \dot{\varphi}_{03})] = 0;$$

$$m_{t0} \ddot{x} + k(\dot{x} - \dot{x}_s) + c_y(y - y_1) + c(y - y_s) + m_{t0} g \sin \alpha_g + k_w F_l V^2 +$$

$$+ f_{gki} \sum_{i=1}^{2n} [c_{ki}(\xi_i - \eta_i) + c_{ki} z_{cm}] + f_{gki} \sum_{i=1}^{2n} [k_{ki}(\xi_i - \eta_i) + k_{ki} \dot{x}_{cm}] +$$

$$+ \sum_{i=1}^{2n} k_{gy} \sqrt{\dot{x}_{di}^2 - (\dot{x}_{di} - \dot{x}_g)^2} + \sum_{i=1}^{2n} c_{gy} \sqrt{r_{di}^2 - (r_{di} - h_g)^2} + P_{kp} = 2P_{k2};$$

$$\begin{aligned}
 & m_{k1} \ddot{\xi}_1 - 2k_{p1} (\xi_1 + l_1 \varphi_1 - \xi_1) - 2c_{p1} (\dot{z}_t + l_1 \dot{\varphi}_1 - \dot{\xi}_1) - 2F_{p1} \text{sign}(\xi_1 + l_1 \varphi_1 - \xi_1) + \\
 & + 2K_{k1} (\xi_1 - \eta_1) + 2c_{k1} (\xi_1 - \eta_1) + 2H_k \varepsilon_{1\max}^{nk} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1\max}}} + 2c_{k1} f_{gk1} y = 0; \\
 & m_{k3} \ddot{\xi}_3 - 2k_{p3} (\xi_3 - \xi_3) - 2c_{p3} (\dot{z}_3 - \dot{\xi}_3) + 2k_{k3} (\xi_3 - \xi_3) + 2c_{k3} (\xi_3 - \xi_3) + \\
 & + 2f_{gk3} k_{k3} \xi_3 - 2F_{p3} \text{sign}(\xi_3 - \xi_3) + 2H_k \varepsilon_{3\max}^{nk} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_{3\max}}} + 2f_{gk3} c_{k3} y = 0; \\
 & \sum_{i=1}^{2n} J_{ki} \ddot{\varphi}_{ki} + \sum_{i=1}^{2n} c_{k\varphi i} \left(\varphi_{ki} - \frac{y_{ki}}{r_{di}} \right) + \sum_{i=1}^{2n} K_{k\varphi i} \left(\varphi_{ki} - \frac{y_{ki}}{r_{di}} \right) = 2P_{k2}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Тут m_t , m_{t0} , M_0 , m_s , m_{kl} і m_{k3} та J_b , J_{00} , $J_p(t, \tau)$ – маси трактора, всього тракторного агрегату, обприскувача, штанги, переднього моста трактора, моста обприскувача та моменти інерції трактора відносно його центра мас і зведені моменти інерції обприскувача і рідини в ємності відносно осі причіпа; t – час; τ – повільний час; c_{pj} і c_{ki} та k_{ki} і k_{pj} – коефіцієнти жорсткості та демпфірування підвіски трактора й обприскувача та їх коліс, F_{pj} – сили тертя у підвісках, J_d , J_b , J_{trk} – зведені моменти інерції коліс тракторного агрегату; $z_p(t, \tau)$, $y_p(t, \tau)$ – координати центра мас рідини; V , F – швидкість руху і лобова площа агрегату; k_w – коефіцієнт опору повітря; f_{gki} – коефіцієнт опору кочення на деформованій поверхні ґрунту; z_{cm} – статична деформація шин, c_{gy} , k_{gy} – коефіцієнти жорсткості та демпфірування ґрунту вздовж горизонтальної осі y ; r_{di} – динамічний радіус коліс; h_g – глибина осадки ґрунту при коліютворенні; P_{kp} – зусилля на крюці трактора; H_k – коефіцієнт пропорційності між силою непружного опору та радіальною деформацією шин; $\varepsilon_i = \xi_i - \eta_i$ – відносна деформація шин; n_k – показник степені, який виражає нелінійний зв'язок даних величин; l_1 , l_4 , l_5 і l_6 – геометричні розміри.

Узагальненими силами є крутний момент двигуна, сила опору повітря P_w і колова сила ведучих коліс трактора P_{k2} . До узагальнених сил умовно віднесено гідродинамічні сили тиску рідини $N_{x'}$, $N_{z'}$ на стінки ємності, які визначаються на засадах розробленого методу розрахунку та розрахункової схеми (рис. 3).

Рівняння коливань рідини в рухомій ємності обприскувача, згідно із запропонованою моделлю відповідно до рис. 3, одержано у вигляді

$$\begin{aligned}
 & \frac{a^2}{12h_0^2} K_{\varphi 0} \text{tg} \varphi_0 \left(h_{01}^2 + \frac{a^2}{4} \right) \ddot{\varphi}_1 - \frac{a^2}{12h_0^2} h_{01} K_{\varphi 0} \text{tg} \varphi_0 \ddot{\varphi}_1 - \frac{\mu}{3h_0 m_p} \left(2h_{01}^2 + \frac{a^2}{2} \right) \ddot{\varphi}_1 + \\
 & + \frac{1}{6h_0} (ah_{02} - 2h_{01} h_{0a}) \ddot{\varphi}_0 - \frac{1}{6h_0} (ah_{0a} + 2h_{01} h_{02}) \ddot{\varphi}_0 + \\
 & + (2h_{01} \cos \varphi_0 - a \sin \varphi_0) (g + \ddot{a}) + \frac{m}{m_p} (2h_{01} \sin \varphi_0 + a \cos \varphi_0) a(t) = 0, \quad (2)
 \end{aligned}$$

де $k_{\varphi 0}$ – коефіцієнт, який враховує масу рухомої частини рідини; μ – коефіцієнт демпфірування рідини; $h_1(t)$ – параметр, пов'язаний з кутом φ_{03} кінематичного збурення ємності $h_{01} = h_0 - h_1(t)$; $h_{02} = h_1^2(t) - 2h_0 h_1(t) + 4h_0^2$; $h_{0a} = \frac{4ah_0 - ah_1(t) - 6h_0 a_1}{6h_0}$;

$a(t)$ – пришвидшення ємності, що змінюється за довільним законом, причому зв'язки між висотами $h_1(t)$ і $h_2(t)$ визначаються з умови рівності об'єму рідини, незмінності форми ємності та лінійної теорії.

Система рівнянь (1) доповнена диференціальними рівняннями, які враховують в'язкопружні властивості ґрунту під час руху причіпного обприскувача по його поверхні

$$\begin{aligned} & \xi_i^{IV} + b_1 \xi_i^{III} + b_2 \xi_i^{II} + b_3 \xi_i + b_4 \xi_i - b_5 z_i^{III} - b_6 \xi_i - b_7 \xi_i - b_8 z_i \pm b_9 f_{ki}(\varepsilon) - \\ & \pm b_{10} f_{ki}(\varepsilon) \pm b_{11} F_{ki}(\varepsilon) - b_{12} [f_{pj} \operatorname{sign}(\xi_i - \xi_j) + 4 f_{pj} \delta(\xi_i - \xi_j) + 2 F_{pj} \delta'(\xi_i - \xi_j)] - \\ & - b_{13} [f_{pj} \operatorname{sign}(\xi_i - \xi_j) + 2 F_{pj} \delta(\xi_i - \xi_j)] - b_{14} F_{pj} \operatorname{sign}(\xi_i - \xi_j) = \\ & = b_{15} q_i^{III} + b_{16} \xi_i + b_{17} \xi_i + b_{18} q_i \quad (i=1,2,3; j=1,3), \end{aligned} \quad (3)$$

де b_1 - b_{18} – коефіцієнти, одержані при перетворенні рівняння (3), які враховують в'язкопружні характеристики верхнього і нижнього шарів ґрунту [4].

Періодичні нерівності ґрунтового профілю взяті у вигляді

$$q_i = \sum_{n=1}^{\infty} (q_{1n} \cos v_n t + q_{2n} \sin v_n t), \quad n=1,2,3 \dots \infty,$$

де $v_n = 2\pi V / s_n$ – частота збурення; V – швидкість руху агрегату; s_n – довжина хвилі ґрунтового профілю.

Під час виконання технологічного процесу обприскування начіпна штанга, яка є основним робочим елементом обприскувача, прикріплена на маятниковій підвісці до рами обприскувача і здійснює вертикальні та кутові коливання у поперечно-вертикальній площині внаслідок кінематичного збурення, зумовленого агрофоном ґрунту.

Коливання штанги обприскувача погіршує не тільки якість обприскування, але разом з коливанням рідини в ємності погіршує стійкість руху обприскувача під час експлуатації.

Тому при розрахунку динамічних характеристик штангових обприскувачів необхідно враховувати як коливання начіпної штанги, так і рух рідини в ємності.

Спочатку розглянемо коливання начіпної штанги обприскувача на одношарнірній маятниковій підвісці у вертикально-поперечній площині, розрахункова схема якої подана на рис. 2.

Тут m – зведена маса начіпного елемента; m_m – підресорна маса машини; I_m – момент інерції відносно поздовжньої осі машини; h – довжина маятника; h_0 – половина висоти нерівностей ґрунтового профілю; $q_n(t)$, $q_n(t)$ – збурення під лівими і правими колесами; c_3 , c_k , k_p , k_k – коефіцієнти жорсткості й демпфірування підвіски та коліс машини; I_θ – сумарний зведений момент інерції підресореної маси машини разом з рідиною в ємності.

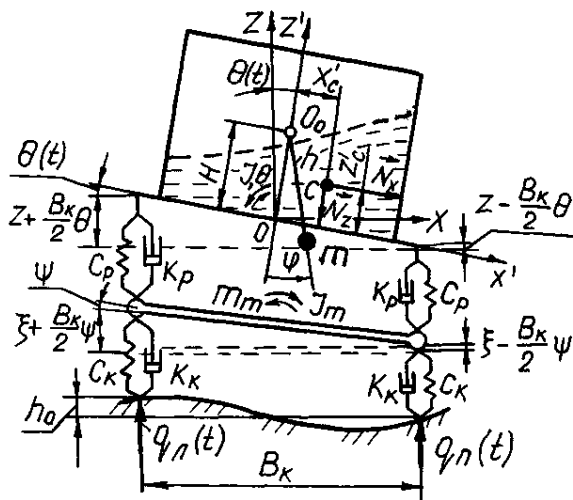


Рис.2. Розрахункова схема коливань мобільної машини з рідиною в ємності та з начіпним функціональним елементом на маятниковій підвісці у поперечно-вертикальній площині

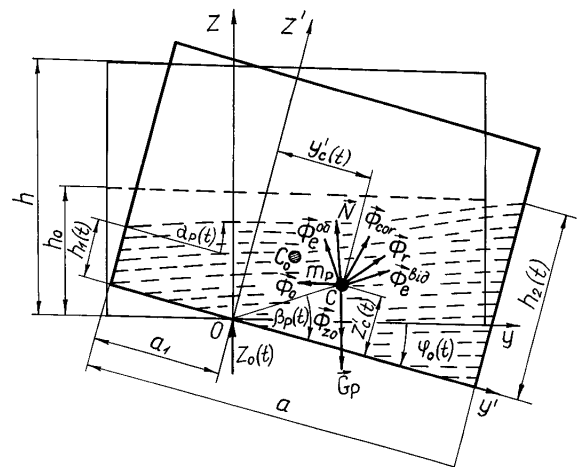


Рис.3. Основні позначення і система координат у частково заповненій рухомій прямокутній ємності обприскувача у поздовжньо-вертикальній площині

На основі рівнянь Лагранжа другого роду одержано нелінійне диференціальне рівняння руху маятникової штанги обприскувача, точка підвісу якої рухається в площині, а сама штанга здійснює плоский рух

$$\frac{\alpha_r h_l}{mh} \ddot{\varphi} + h_l (\ddot{\varphi} + g) \sin \varphi + h_l H [\ddot{\theta} \cos(\theta + \varphi) - \dot{\theta} \sin(\theta + \varphi)] = 0, \quad (4)$$

$$\text{де } h_l = \frac{12h}{12h^2 + l^2}.$$

Для врахування впливу дії начіпної штанги на маятниковій підвісці при її коливанні на обприскувач використано метод кінетостатики і визначено складові динамічної реакції N в напрямі вісі x і z

$$N \sin \varphi = -m [H (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta} \sin \theta) + h (\ddot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi} \sin \varphi)]. \quad (5)$$

Зауважимо, що складові динамічної реакції N пов'язані з розв'язком нелінійного диференціального рівняння (4).

Диференціальні рівняння поперечних коливань обприскувача і начіпної штанги на одношарнірній маятниковій підвісці з урахуванням впливу рухомості рідини в ємності можна записати у такому вигляді:

$$\begin{aligned} M \ddot{\theta} + k \left(z + \frac{B_k}{2} \theta - q_n \right) + c \left(z + \frac{B_k}{2} \theta - q_n \right) + k \left(z - \frac{B_k}{2} \theta - q_n \right) + \\ + c \left(z - \frac{B_k}{2} \theta - q_n \right) + N_{x'_c} \sin \theta + N_{z'_c} \cos \theta = 0; \\ J \ddot{\theta} + k \left(z - \frac{B_k}{2} \theta - q_n \right) \frac{B_k}{2} + c \left(z + \frac{B_k}{2} \theta - q_n \right) \frac{B_k}{2} - k \left(z - \frac{B_k}{2} \theta - q_n \right) \frac{B_k}{2} - \\ - c \left(z - \frac{B_k}{2} \theta - q_n \right) \frac{B_k}{2} - N_{x'_c} z'_c - N_{z'_c} x'_c + \frac{NH \sin \varphi}{\cos \theta} + NH \cos \varphi \sin \theta = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{де } M = m + m_0 + m_p;$$

$$J = J_0 + J_p + J_z = J_0 + m_p \frac{b^2 h_{01}^2 + h_{02}^2}{36 h_0^2} + m \left[\frac{l^2}{12} + h^2 + H^2 - 2hH \cos(\theta + \varphi) \right]; \quad m_0, m_p, m \text{ і}$$

J_0, J_p, J_z – відповідно маси і моменти інерцій обприскувача, рідини в ємності, штанги.

Система диференціальних рівнянь поперечних коливань обприскувача, крім рівнянь (6), включає і рівняння (2), що враховує вплив рухомості рідини в ємності на коливальний процес. Дана система нелінійних диференціальних рівнянь розв'язана числовим методом, результати яких подано у вигляді графічних залежностей для вертикальних і кутових відхилень начіпної штанги обприскувача (рис. 4, 5).

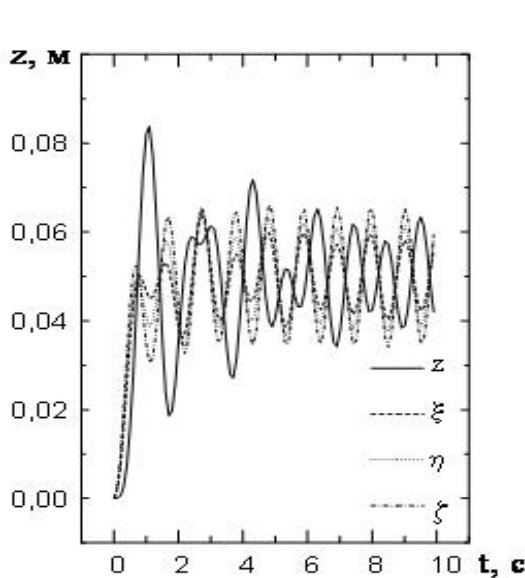


Рис.4. Вертикальні переміщення штанги z , коліс обприскувача ξ верхнього η і нижнього ζ шарів ґрунту

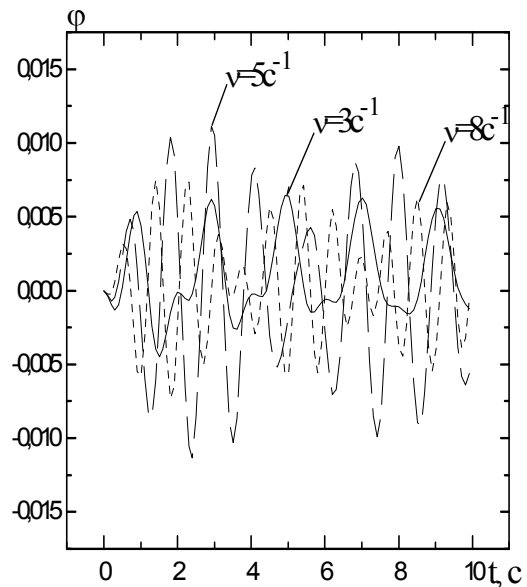


Рис.5. Кутові відхилення націпної штанги при різних частотах кінематичного збурення

Розглянуто коливання націпних штанг на маятникових одношарнірній, одношарнірній пружній, двошарнірній, двошарнірній пружній, А, V, Ж-подібних багатошарнірних підвісках й паралелограмній підвісці та підвісці, встановленій на криволінійній опорній поверхні.

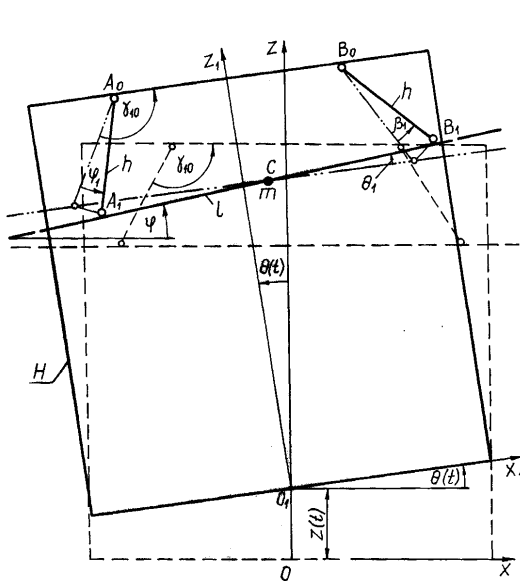


Рис.6. Розрахункова схема коливань націпної штанги обприскувача на маятниковій А і V-подібних та паралелограмній підвісках

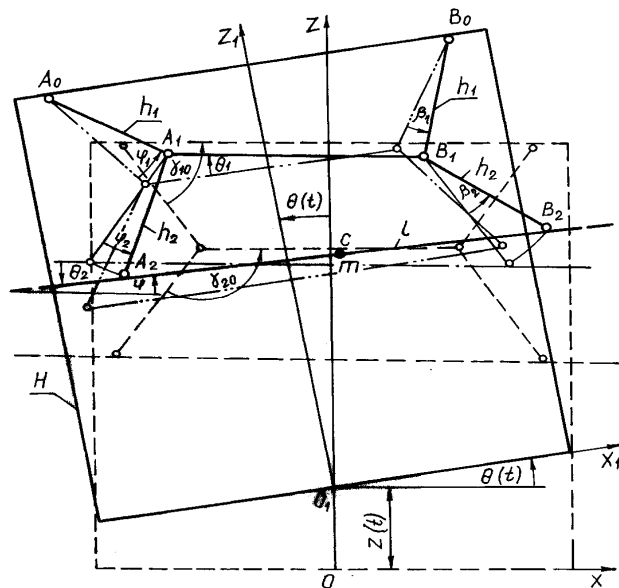


Рис.7. Розрахункова схема коливань штанги на маятниковій Ж-подібній підвісці

На цих рисунках $z(t)$ і $\theta(t)$ – закони вертикального і кутового кінематичного збурення націпної штанги, h_1 і h_2 – довжини маятників, φ_1 і φ_2 – узагальнені координати, l – довжина штанги.

Для дослідження коливань націпних штанг, встановлених на маятникових підвісках, з використанням рівнянь Лагранжа другого роду, розроблена методика, за допомогою якої одержано нелінійні диференціальні рівняння із змінними коефіцієнтами. Останні розв'язані числовим методом. Результати обчислень показують, що оптимальною щодо якості функціонування націпної штанги на одношарнірній і двошарнірній маятниковій підвісці є штанга завдовжки 10м з довжинами маятників від 0,1 до 0,25 м.

Також розглянуто двочастотний режим малих коливань $z(t) = Z_0 \sin(p_1 t + \delta_1)$ і $\theta_1(t) = \Theta_0 \sin(p_2 t + \delta_2)$ навісної штанги на маятниковій Ж-подібній підвісці, яка описується системою лінеаризованих диференціальних рівнянь із змінними коефіцієнтами:

$$\sum_{j=1}^2 a_{ij} \ddot{\varphi}_j + b_{ii} \dot{\varphi}_i + \sum_{j=1}^2 [(-c_{ij} \Theta_0 \rho_2^2 \sin(\rho_2 t + \delta_2) - d_{ij} Z_0 \rho_1^2 \sin(\rho_1 t + \delta_1) + e_{ij}] \varphi_j = (-k_{ii} \rho_2^2 + l_{ii}) \Theta_0 \sin(\rho_2 t + \delta_2); \quad (i=1,2), \quad (7)$$

де Z_0 і Θ_0 – амплітуди вертикальних і кутових відхилень; p_1 і p_2 – частоти; δ_1 і δ_2 – їх фази; a_{ij} , b_{ii} , c_{ij} , d_{ij} , e_{ij} , k_{ii} та l_{ii} – змінні коефіцієнти рівнянь.

Результати числового розв'язування одержаної системи диференціальних рівнянь руху навісних штанг на маятникових А і Ж-подібних підвісках наведені на рис.8–9.

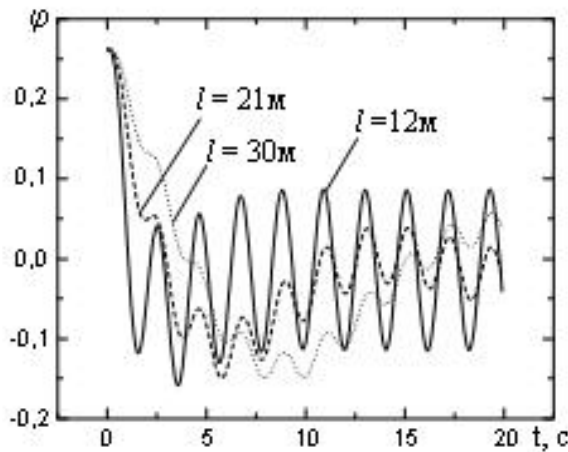


Рис.8. Кутові коливання навісної штанги на маятниковій Ж-подібній підвісці для різних довжин штанг

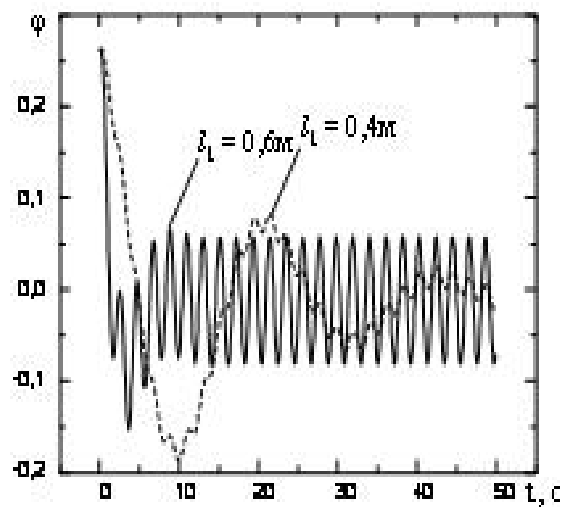


Рис.9. Характер коливального процесу навісної штанги для різних довжин з'єднувальної ланки l_1 маятниковій Ж-подібній підвісці

Результати числових експериментів показують, що кутові відхилення навісної штанги на А і Ж-подібних підвісках зменшуються із збільшенням довжини штанги, причому оптимальною є штанга завдовжки 21 м, у якої довжина з'єднувальної ланки $A_1B_1 = l_1 = 0,6$ м (див. рис. 6, 7) і довжина маятника $h_1 = 0,25$ м. Із збільшенням частоти кінематичного збурення мобільної машини з рідиною в ємності зростає амплітуда вертикальних коливань підресорної частини машини і навісних функціональних елементів.

Отже, для дослідження коливань мобільної машини у поперечно-вертикальній площині особливо важливим є врахування як коливання навісної штанги, встановленої на маятниковій підвісці, так і рух рідини в ємності.

Здійснено багатокритеріальну оптимізацію навісних функціональних елементів, встановлених на маятникових підвісках. Для багатопараметричної оптимізації використано алгоритм прямого пошуку – метод Нелдера-Міда в застосуванні до цільової функції з обмеженням на геометричні параметри.

Побудовано карту значень критеріїв пружної підвіски навісної штанги обприскувача як перше наближення для її оптимізації. При цьому за цільову функцію вибрано рівномірний розподіл напружень у секціях навісної штанги.

На основі проведеного аналізу розрахунку з використанням сучасного комплексу комп'ютерних програм розроблено нові полегшені конструкції навісних штанг із зміненою забудовою їх решітчастої фермової конструкції.

Числовим моделюванням руху причіпного штангового обприскувача з рідиною в ємності на деякому рельєфі ґрунту для різних частот кінематичного збурення машини отримано закономірності коливань рідини та кутових відхилень обприскувача.

У роботі розроблено також метод, який дає змогу в аналітичній формі оцінити величину гідродинамічної сили удару рідини об стінки ємності під час нерівномірного руху машини.

Розроблені математичні моделі і методи розрахунку коливань мобільних машин з начіпними функціональними елементами з урахуванням впливу руху рідини в ємності та в'язкопружних властивостей ґрунту на якість функціонування робочих елементів (встановлених на маятникових підвісках) та на стійкість руху і плавність ходу машин дають змогу всебічно проводити аналіз динамічних процесів, які відбуваються в цих машинах.

Розроблено математичну модель процесу нанесення обприскувачами краплин препарату на оброблювальну поверхню і обґрунтовано практичні рекомендації для забезпечення рівномірного обприскування. Опрацьовано комплексний підхід до вибору критеріїв оцінки міцності та оптимізації основних конструктивних параметрів штангових обприскувачів. Обґрунтовано практичні рекомендації щодо проектування штангових обприскувачів, раціонального добору їх конструктивних параметрів та режимів їхньої роботи, спрямовані на підвищення якості та точності обприскування, а також розроблено принципово нові конструкції маятникових підвісок начіпних штанг обприскувачів з покращеними стабілізуючими характеристиками, які захищені деклараційними патентами на винахід.

An effective analytical and numerical method of calculation the oscillating processes in bar sprayer with hitched functional elements has been performed based on complex approach using general mechanics principles and up-to-date calculating methods. The calculation of strength has been carried out and the optimization of basic elements of mobile machines for chemical protection of plants has been performed.

Література

1. Вікович І.А. Конструкції і динаміка штангових обприскувачів.-Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2003.-458 с.
2. Вікович І.А., Дівесв Б.М. Розрахунок маятниково-пружинної системи віброзахисту великогабаритних навісних елементів колісних машин//Вісн. ДУ "Львівська політехніка". "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні".-Львів, 1999.-№371.-С. 86-92.
3. Вікович І.А. Математична модель коливань тракторного агрегату мобільного обприскувача з рідиною в ємності та з урахуванням в'язкопружних властивостей ґрунту. //Вісн. НУ "Львівська політехніка". "Динаміка, міцність та проектування машин і приладів".-Львів, 2003.-№483.-С. 16-29.
4. Дмитриченко М.Ф., Вікович І.А. Про реологічні моделі ґрунту в терамеханіці//Зб. наук. пр. Асоціації "Автобус" "Проектування, виробництво та експлуатація автомобільних засобів і поїздів".-Львів, 2003.-Вип. 7.-С. 87-100.

Одержано 27.05.2004 р.