

В.С. ЛОВЕЙКІН, докт. техн. наук.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Д.А. ПАЛАМАРЧУК, ас.

Київський національний університет будівництва та архітектури

ВИЗНАЧЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ РУХУ ВРІВНОВАЖЕНОЇ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЇ СТІЛОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА

Постановка проблеми. Дослідження динаміки зміни вильоту займає значне місце при проектуванні вантажопідйомних кранів із шарнірно-зчленованою стріловою системою. При зміні вильоту стрілової виникають значні коливання вантажу. Ці коливання спричиняють виникнення значних динамічних навантажень на елементи стрілової системи, що призводить до швидкого виходу з ладу елементів кінематичних пар та ланок стрілової системи – стрілу, хобот, відтяжку, механізми приводу та врівноваження.

Аналіз публікацій. Врівноважені шарнірно-зчленовані стрілові системи знайшли значне поширення в конструкціях порталних кранів, які працюють в інтенсивному режимі та стіснених умовах простору. В цих кранах зміна вильоту вантажу є робочою технологічною операцією, яка має значний вплив на ефективність роботи крана в цілому. Тому дослідженню динаміки зміни вильоту врівноважених шарнірно-зчленованих стрілових систем кранів присвячено значну увагу [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Ці праці присвячені в основному моделюванню динаміки зміни вильоту врівноважених стрілових систем та визначенню динамічних навантажень, що діють на елементи стрілових систем під час перехідних процесів (пуск, гальмування). Питанням визначення нерівномірності руху врівноважених стрілових систем кранів при реальних характеристиках приводних механізмів протягом усього циклу вильоту не приділялось необхідної уваги.

Мета роботи. Тому метою цієї роботи є визначення нерівномірності руху при зміні вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи крана з урахуванням неповної врівноваженості стрілової системи та не строго горизонтального переміщення вантажу.

Основний зміст роботи. Стрілова система являє собою механічну систему з абсолютно жорсткими ланками (рис. 1) і одним ступенем вільності. При розгляді цієї стрілової системи прийнято такі припущення [9]: ланки стрілової системи вважати абсолютно жорст-

кими, в яких не виникають внутрішні пружні коливання; рух стрілової системи та вантажу відбувається лише у вертикальній площині.

За узагальнену координату прийнято кутову координату стріли α . До складу стрілової системи входять стріла 1, прямолінійний хобот 2, жорстка відтяжка 3, рухома противага 4, вантаж 5 та приводний механізм 6. В такій стріловій системі вантажний канат проходить вздовж хобота 2 та відтяжки 3, що забезпечує незмінність положення вантажу 5 по вертикалі відносно кінцевого блока хобота при зміні вильоту стрілової системи.

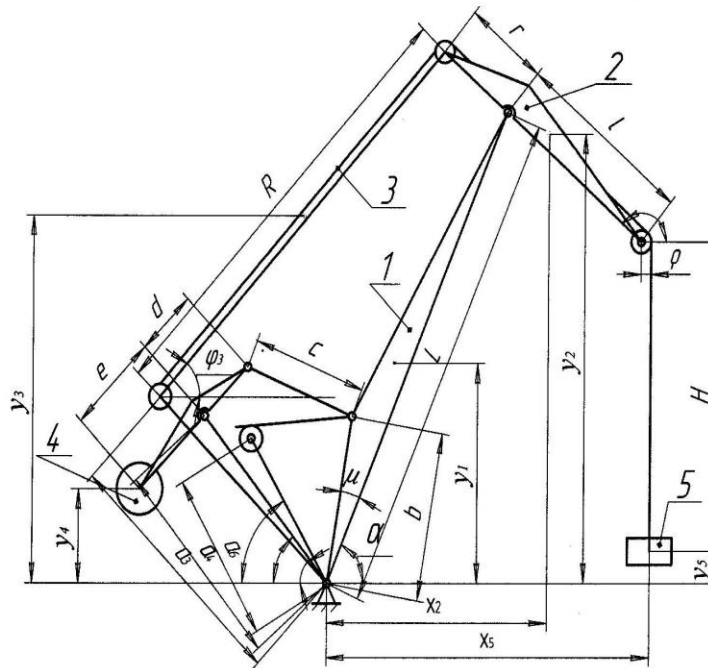


Рис. 1. Динамічна модель стрілової системи із одним ступенем вільності.

Однак в такій стріловій системі вантаж в процесі зміни вильоту не рухається строго по горизонталі, оскільки існуючі методи оптимального кінематичного синтезу чотириланкових механізмів, якими є шарнірно-зчленовані стрілові системи з прямолінійним хоботом та жорсткою відтяжкою, не дозволяють цього досягнути [3].

Існуючі методи оптимального синтезу врівноважувачих механізмів [3, 4, 5, 6, 7, 8] також не дозволяють повністю врівноважити стрілову систему в процесі зміни вильоту вантажу. Тому в прийнятій динамічній моделі стрілової системи в процесі зміни її вильоту вважаємо, що вантаж рухається не строго по горизонталі, а стрілова система не повністю врівноважена рухомою противагою. Для такої динамічної моделі стрілової системи за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду складено рівняння руху в процесі зміни вильоту

$$J_{\alpha} \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_{\alpha}}{\partial \alpha} \dot{\alpha}^2 = M \frac{\partial \varphi_6}{\partial \alpha} - \sum_{j=1}^5 m_j g \frac{\partial y_j}{\partial \alpha}, \quad (1)$$

де J_{α} , $\partial J_{\alpha} / \partial \alpha$ – зведений до осі повороту стріли момент інерції стрілової системи та

його похідна по узагальненій координаті α ; α , $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$ – кутові координата, швидкість та прискорення стріли; M – рушійний момент на валу приводного двигуна.

J_α , $\partial J_\alpha / \partial \alpha$ визначаються залежностями:

$$J_\alpha = J_O + m_2 \left[\left(\frac{\partial x_2}{\partial \alpha} \right)^2 + \left(\frac{\partial y_2}{\partial \alpha} \right)^2 \right] + J_C \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \right)^2 + J_B \left(\frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha} \right)^2 + J_D \left(\frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha} \right)^2 + m_5 \left[\left(\frac{\partial x_5}{\partial \alpha} \right)^2 + \left(\frac{\partial y_5}{\partial \alpha} \right)^2 \right] + J_P \left(\frac{\partial \varphi_6}{\partial \alpha} \right)^2; \quad (2)$$

$$\frac{\partial J_\alpha}{\partial \alpha} = 2 \left[m_2 \left(\frac{\partial x_2}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 x_2}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial y_2}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 y_2}{\partial \alpha^2} \right) + J_C \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial \alpha^2} + J_B \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial \alpha^2} + J_D \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 \varphi_4}{\partial \alpha^2} + m_5 \left(\frac{\partial x_5}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 x_5}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial y_5}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 y_5}{\partial \alpha^2} \right) + J_P \frac{\partial \varphi_6}{\partial \alpha} \frac{\partial^2 \varphi_6}{\partial \alpha^2} \right], \quad (3)$$

де $\partial^2 x_2 / \partial \alpha^2$, $\partial^2 y_2 / \partial \alpha^2$, $\partial^2 x_5 / \partial \alpha^2$, $\partial^2 y_5 / \partial \alpha^2$, $\partial^2 \varphi_2 / \partial \alpha^2$, $\partial^2 \varphi_3 / \partial \alpha^2$, $\partial^2 \varphi_4 / \partial \alpha^2$, $\partial^2 \varphi_6 / \partial \alpha^2$ – передаточні функції другого порядку, що зв’язують лінійні та кутові координати ланок з координатою стріли.

В рівнянні (1) зробимо заміну $\dot{\alpha} = \omega$ і $d\omega / dt = \omega d\omega / d\alpha$, в результаті чого будемо мати:

$$J_\alpha \frac{d\omega}{d\alpha} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_\alpha}{\partial \alpha} \omega = \left(M \frac{\partial \varphi_6}{\partial \alpha} - \sum_{j=1}^5 m_j g \frac{\partial y_j}{\partial \alpha} \right) / \omega. \quad (4)$$

Рівняння (4) розв’яжемо методом кінцевих різниць, для цього його приведемо до такого вигляду:

$$J_\alpha \frac{\Delta \omega}{\Delta \alpha} + \frac{1}{2} \frac{\Delta J_\alpha}{\Delta \alpha} \omega = \left(M \frac{\Delta \varphi_6}{\Delta \alpha} - \sum_{j=1}^5 m_j g \frac{\Delta y_j}{\Delta \alpha} \right) / \omega. \quad (5)$$

В рівнянні (5) прийняті такі заміни:

$$\partial \omega \approx \Delta \omega = \omega_{i+1} - \omega_i; \quad \partial \alpha \approx \Delta \alpha = \alpha_{i+1} - \alpha_i.$$

$$\partial J_\alpha \approx \Delta J_\alpha = J_{\alpha_{i+1}} - J_{\alpha_i}; \quad \partial \varphi_6 \approx \Delta \varphi_6 = \varphi_{6_{i+1}} - \varphi_{6_i}.$$

$$\partial y_j \approx \Delta y_j = y_{j_{i+1}} - y_{j_i}; \quad J_\alpha = J_{\alpha_i}; \quad \omega = \omega_i; \quad M = M_i.$$

Після підстановки цих заміन в рівняння (5) отримаємо:

$$\omega_{i+1} = \frac{\left| M_i (\varphi_{6_{i+1}} - \varphi_i) - \sum_{j=1}^5 m_j g (y_{j_{i+1}} - y_{j_i}) - M_O \right|}{J_{\alpha(i)} \cdot \omega_i} \cdot \Delta \alpha + \frac{(3 \cdot J_{\alpha(i)} - J_{\alpha(i+1)})}{2 J_{\alpha(i)}} \cdot \omega_i. \quad (6)$$

За допомогою залежності (6) для різних положень стрілової системи можна визначити кутову швидкість стріли в залежності від її положення. Використання залежності (6) можливе тільки при наявності функцій положення ланок, їхніх перших передаточних функцій та механічної характеристики двигуна приводу механізму зміни вильоту стрілової системи.

Визначені функції положення ланок та їхні перші передаточні функції:

1) стріла –

$$y_1 = L\lambda_1 \sin \alpha; \quad \frac{\partial y_1}{\partial \alpha} = L\lambda_1 \cos \alpha; \quad (7)$$

2) хобот –

$$\varphi_2 = \pi - \arccos \frac{S^2 + r^2 - R^2}{2Sr} - \arccos \frac{S^2 + L^2 - a_3^2}{2SL} + \alpha;$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} = 2 \frac{\frac{\partial S}{\partial \alpha} \frac{(S^2 + r^2 - R^2)}{2S^2 r}}{\sqrt{4 - \frac{(S^2 + r^2 - R^2)^2}{S^2 r^2}}} + 2 \frac{\frac{\partial S}{\partial \alpha} \frac{(S^2 + L^2 - a_3^2)}{2S^2 L}}{\sqrt{4 - \frac{(S^2 + L^2 - a_3^2)^2}{S^2 L^2}}} + 1; \quad (8)$$

$$S = \sqrt{a_3^2 + L^2 + 2a_3L \cos(\Theta_3 + \alpha)}; \quad \frac{\partial S}{\partial \alpha} = -\frac{a_3L}{S} \sin(\Theta_3 + \alpha);$$

$$x_2 = L \cos \alpha - \lambda_2 l \cos \varphi_2; \quad y_2 = L \sin \alpha - \lambda_2 l \sin \varphi_2; \quad (9)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial \alpha} = -L \sin \alpha + \lambda_2 l \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \sin \varphi_2; \quad \frac{\partial y_2}{\partial \alpha} = L \cos \alpha - \lambda_2 l \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \cos \varphi_2.$$

3) відтяжка –

$$\varphi_3 = \arccos \frac{a_3^2 - L^2 + S^2}{2a_3S} + \arccos \frac{R^2 - r^2 + S^2}{2RS} - \Theta_3; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha} = -2 \frac{\frac{\partial S}{\partial \alpha} \frac{(a_3^2 - L^2 + S^2)}{2a_3S^2}}{\sqrt{4 - \frac{(a_3^2 - L^2 + S^2)^2}{a_3^2 S^2}}} - 2 \frac{\frac{\partial S}{\partial \alpha} \frac{(R^2 - r^2 + S^2)}{2RS^2}}{\sqrt{4 - \frac{(R^2 - r^2 + S^2)^2}{R^2 S^2}}};$$

$$y_3 = \lambda_3 R \sin \varphi_3 + a_3 \sin \Theta_3; \quad \frac{\partial y_3}{\partial \alpha} = \lambda_3 R \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha} \cos \varphi_3. \quad (11)$$

4) противага –

$$\varphi_4 = \arccos \frac{a_4^2 - b_4^2 + S_4^2}{2a_4S_4} + \arccos \frac{d^2 - c^2 + S_4^2}{2dS_4} - \Theta_4; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha} = -2 \frac{\frac{\partial S_4 / \partial \alpha}{a_4} - \frac{(a_4^2 - b_4^2 + S_4^2) \partial S_4 / \partial \alpha}{2a_4 S_4^2}}{\sqrt{4 - \frac{(a_4^2 - b_4^2 + S_4^2)^2}{a_4^2 S_4^2}}} - 2 \frac{\frac{\partial S_4 / \partial \alpha}{d} - \frac{(d^2 - c^2 + S_4^2) \partial S_4 / \partial \alpha}{2d S_4^2}}{\sqrt{4 - \frac{(d^2 - c^2 + S_4^2)^2}{d^2 S_4^2}}};$$

$$y_4 = a_4 \sin \Theta_4 - e \sin(\mu_4 + \varphi_4); \quad \frac{\partial y_4}{\partial \alpha} = -e \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha} \cos(\mu_4 + \varphi_4); \quad (13)$$

$$S_4 = \sqrt{a_4^2 + b_4^2 + 2a_4 b_4 \cos(\Theta_4 + \mu_1 + \alpha)}; \quad \frac{\partial S_4}{\partial \alpha} = -\frac{a_4 b_4}{S_4} \sin(\Theta_4 + \mu_1 + \alpha).$$

5) вантаж –

$$x_5 = L \cos \alpha - l \cos(\varphi_2 + \rho); \quad y_5 = L \sin \alpha - l \sin \varphi_2 - H;$$

$$\frac{\partial x_5}{\partial \alpha} = -L \sin \alpha + l \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \sin \varphi_2; \quad \frac{\partial y_5}{\partial \alpha} = L \cos \alpha - l \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \cos \varphi_2. \quad (14)$$

6) ротор двигуна –

$$\varphi_6 = \frac{i}{R_6} (S_{6(0)} - S_6); \quad \frac{\partial \varphi_6}{\partial \alpha} = -\frac{\partial S_6}{\partial \alpha} \frac{i}{R_6};$$

$$S_6 = \sqrt{a_6^2 + b^2 + 2a_6 b \cos(\Theta_6 + \mu_6 + \alpha)}; \quad \frac{\partial S_6}{\partial \alpha} = -\frac{a_6 b}{S_6} \sin(\Theta_6 + \mu_6 + \alpha). \quad (15)$$

В залежностях (7)...(15) використано такі позначення: L – довжина стріли; l – довжина активної частини хобота; r – довжина контрхобота; R – довжина відтяжки; H – довжина звисаючої гілки поліспасти; $a_3, a_4, a_6, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_6$ – довжини стояків та кути їх нахилу до горизонту відповідно відтяжки та механізмів врівноваження і приводу; b, c, d – довжини ланок чотириланкового механізму врівноваження; e – довжина важеля противаги; μ_1, μ_2, μ_4 – кути розхилу стріли, хобота та веденого коромисла механізму врівноваження; ρ – радіус кінцевого блока хобота; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коефіцієнти поділу довжин стріли, хобота та відтяжки їхніми центрами мас; R_6 – раді-

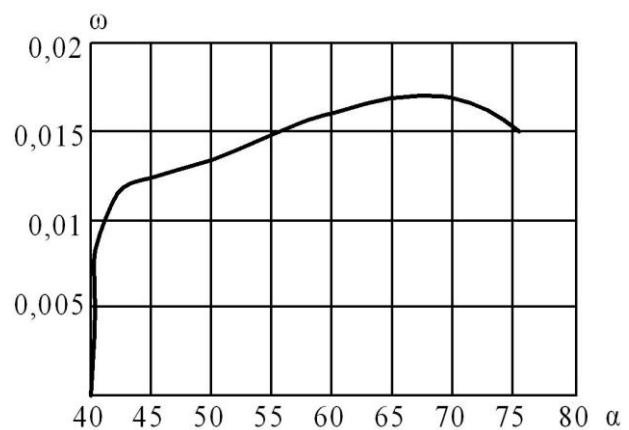


Рис.2. Графік залежності кутової швидкості стріли ω від її кута повороту α .

ус ділительного кола шестерні приводного механізму; i – передаточне число приводного механізму.

Підставивши отримані залежності в рівняння (6) для кожної точки розрахунку, починаючи зі стану спокою ($i = 0$), побудовано графік зміни кутової швидкості стріли в залежності від кута її повороту (рис.2).

Розрахунок виконано для стрілової системи порталного крана МАРК-40, що має такі технічні характеристики:

- мінімальний виліт $S_{\min} = 7,4i$;
- максимальний виліт $S_{\max} = 30i$;
- середня швидкість зміни вильоту $V = 1,05 i / c$;
- час зміни вильоту від мінімального до максимального $t = 22c$;
- довжина стріли $L = 25,76i$;
- довжина хобота $l = 10,16i$;
- довжина підвісу вантажу $H = 14,7i$.

Висновки. Аналізуючи приведений графік видно, що кутова швидкість стріли не постійна і змінюється під час повороту стріли. Зокрема видно, що на ділянці пуску кутова швидкість стріли стрімко наростає до певної величини, а на ділянці усталеного руху залишається практично незмінною.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алейнер А.Л. Динамические нагрузки механизма изменения вылета // Тр. ЛПИ, 1960.- №211. – С. 121-124.
2. Брауде В.И. Динамика механизма изменения вылета шарнирно-сочлененной стрелы с гибкой оттяжкой // Тр. ЛИИВТ, 1963. – Вып. IV. – С. 18-26.
3. Горский Б.Е., Ловейкин В.С. Универсальная математическая модель крановой качающейся укосины по удельным действиям // Горные, строительные и дорожные машины. – К.: Техніка, 1978. – Вып. 25. – С. 74-81.
4. Жермунский Б.И., Коваленко П.А., Леснер Е.Ю. Динамика механизма изменения вылета стрелы порталного крана // Подъемно-транспортное оборудование. - К.: Техніка, 1985. – Вып. 16. – С. 49-53.

5. Ловейкін В.С., Душанін Я.С. Оптимізація енергетичного режиму при зміні вильоту стрілових систем кранів. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков, 1999. – Вып. 48. – С. 166-172.

6. Михеев В.А. Казацкий Н.Н. Динамическое совершенствование качающейся укосины порталного крана. // Тезисы докладов V региональной НПК. – Мариуполь: ПГТУ, 1998. С. 21-22.

7. Серлин Л.Г., Орлов А.Н. Оптимизация крановых конструкций и их автоматическое проектирование. Учебное пособие. – Л., 1985. – 85 с.

8. Сиротский В.Ф. Динамические нагрузки механизма изменения вылета порталного крана. // Тр. ЛИИВТ, 1958. – Т. XXV. С. 186-195.

9. Ловейкин В.С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Учебное пособие. – К. : УМК ВО, 1990. – 168 с.

УДК 621.865.8

Н.Г. МАЛИЧ, канд. техн. наук.

Национальная металлургическая академия Украины

**ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДПОСЫЛОК РАЗВИТИЯ
ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ РАССМОТРЕНИЯ
МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА**

Введение. Сегодня в связи с резким увеличением цен на образцы современной спецтехники перед эксплуатационниками возникает одна из насущных проблем – уметь правильно обосновать требования к новому, необходимому парку машин и определить возможности машин при их эксплуатации в различных (заданных) условиях ведения работ в данное время и на ближайшую перспективу (3 ÷ 5 лет). Основой обоснования таких требований к ЗТМ (землеройно-транспортными машинами) и ГУМ (грунтоуплотняющими машинами) могут служить рекомендации исследований, изложение в работах [1, 2, 3, 4, 5]. В данной статье, в качестве примера, рассмотрена модель рабочего процесса и метод определения линейных параметров копания и резания грунта, определение значений действующих сил и их взаимная связь относительно рабочего процесса фронтального одноковшового погрузчика, одного из представителей землеройно-транспортной техники.