

Гірничі та піднімально-транспортні машини

УДК 621.875

Д.А. Паламарчук, асистент;
В.В. Іщук студентка (КНУБА, Київ)

СПОСІБ МІНІМІЗАЦІЇ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ ПІД ЧАС ЗМІНИ ВІЛЬОТУ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЇ СТІЛОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА

АНОТАЦІЯ. В статті розглянуто метод мінімізації коливань вантажу в шарнірно-зчленованій врівноваженій стріловій системі крана, який дозволяє звести до мінімуму розгойдування вантажу в процесі зміни вильоту.

Ключові слова: оптимізація, виліт, стрілова система, привід, кран.

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрен метод минимизации колебаний груза в шарнирно-сочлененной уравновешенной стреловой системе крана, который позволяет свести к минимуму раскачивания груза в процессе изменения вылета.

Ключевые слова: оптимизация, вылет, стреловая система, привод, кран.

SUMMARY. In the article the method of minimizing vibration load in the hinge-jointed counterbalanced jib system that minimizes the buildup of cargo in the process of changing speed.

Key words: optimization, start, jib system, drive, crane.

Вступ

При зміні вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи на ділянках перехідних процесів виникають значні коливання вантажу на гнучкому підвісі. Ці коливання спричиняють виникнення динамічних навантажень на елементи стрілової системи: стрілу, хобот, відтяжку, механізми привіду та врівноваження. Що призводить до швидкого виходу з ладу елементів кінематичних пар та ланок стрілової системи, а також зменшення продуктивності перевантажувальних операцій.

Однією з причин виникнення розгойдування вантажу є нелінійна залежність між кутом повороту стріли та горизонтальним переміщенням кінцевої точки хобота, тобто, при рівномірному обертанні стріли навколо її нижнього шарніру ($\dot{\alpha} = const$) кінцева точка хобота рухається нерівномірно [1, 2]. Також важливою причиною виникнення коливань вантажу є режим руху привідного механізму зміни вильоту стрілової системи [3, 4].

Постановка задачі

Аналізуючи взаємне переміщення кінцевої точки хобота та підвішеного до неї вантажу, можна зробити висновок, що нерівномірність руху кінця хобота по горизонталі можна розглядати як деякий рух, що

складається із кількох процесів розгону та гальмування [5]. Причому тривалість цих процесів залежить від інерційних і геометричних характеристик стрілової системи.

Тому постає задача знаходження такого режиму руху механізму зміни вильоту, що забезпечував би мінімальне відхилення вантажу від вертикалі.

Виклад основного матеріалу

За основу для динамічної моделі приймемо таку стрілову систему, в якій кінцева точка хобота рухається в межах встановленої точності по лінії, яка проходить горизонтально на відстані H від нижнього шарніру стріли, а вантажний канат 7 проходить паралельно до повздовжньої вісі відтяжки 3 (рис. 1).

При розгляді цієї стрілової системи прийнято такі припущення [6]: ланки стрілової системи вважати абсолютно жорсткими, в яких не виникають внутрішні пружні коливання; рух стрілової системи та вантажу відбувається лише у вертикальній площині; вся стрілова система та вантаж повністю врівноважені триланковою системою врівноваження.

Для цієї динамічної моделі за узагальнені координати прийнято кут повороту стріли α та лінійне переміщення вантажу x вздовж вісі X .

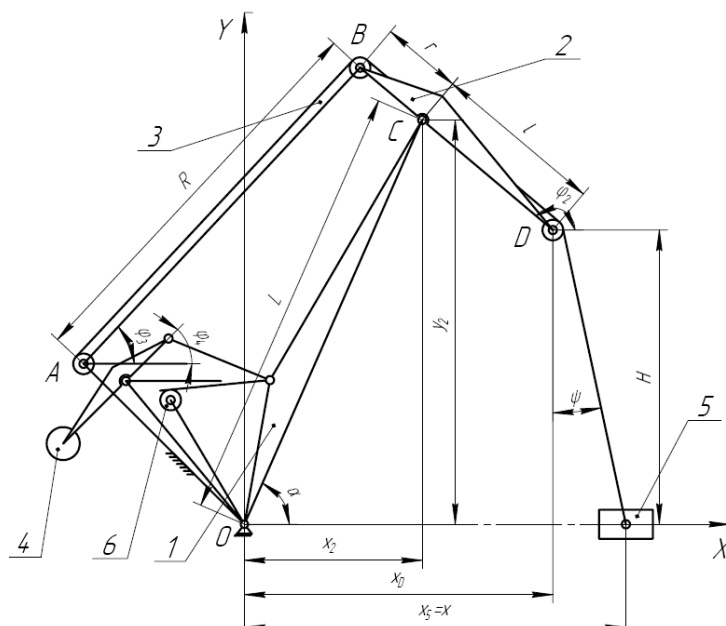


Рис.1. Динамічна модель стрілової системи крана

Для прийнятої динамічної моделі запишемо диференціальні рівняння руху стрілової системи, основою яких є рівняння Лагранжа другого роду [7]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_{\alpha}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x, \end{cases} \quad (1)$$

де t – час; α, x – узагальнені координати стрілової системи; $\dot{\alpha}, \dot{x}$ – швидкості зміни узагальнених координат; Q_{α}, Q_x – узагальнені сили, що відповідають узагальненим координатам відповідно α та x ; T – кінетична енергія стрілової системи.

Кінетичну енергію стрілової системи знайдемо за виразом

$$T = \frac{1}{2} J_1 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} J_2 \dot{\phi}_2^2 + \frac{1}{2} J_3 \dot{\phi}_3^2 + \frac{1}{2} J_4 \dot{\phi}_4^2 + \frac{1}{2} J_5 \dot{\phi}_5^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2, \quad (2)$$

де J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 – моменти інерції відносно вісей обертання відповідно стріли, хобота, відтяжки, рухомої противаги та ротора електродвигуна, при цьому вважаємо, що центр мас хобота співпадає з кінематичною парою C ; m, m_2 – маси відповідно вантажу і хобота; $\dot{\alpha}, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3, \dot{\phi}_4, \dot{\phi}_5$ – кутові швидкості відповідно стріли, хобота, відтяжки, коромисла рухомої противаги і ро-

тора електродвигуна; $\dot{x}, \dot{x}_2, \dot{y}_2$ – лінійні складові швидкостей центрів мас вздовж вісей X і Y відповідно вантажу та хобота.

Узагальнені сили визначаються за принципом можливих переміщень і для розглянутої динамічної моделі, з урахуванням вищенаведених припущень мають вигляд:

$$\begin{cases} Q_{\alpha} = M \frac{\partial \phi_5}{\partial \alpha} + mg \frac{x - x_D}{H} \frac{\partial x_D}{\partial \alpha}; \\ Q_x = -mg \frac{x - x_D}{H}, \end{cases} \quad (3)$$

де M – рушійний момент на валу електродвигуна; $\frac{\partial \phi_5}{\partial \alpha}, \frac{\partial x_D}{\partial \alpha}$ – оператори передачі

руху першого порядку [8], відповідно для ротора електродвигуна та кінцевої точки хобота; x, x_D – горизонтальні координати відповідно вантажу та кінцевої точки хобота; H – відстань, на якій розміщена горизонтальна лінія руху кінцевої точки хобота відносно нижнього шарніру стріли.

Підставивши вирази (2) та (3) у рівняння Лагранжа другого роду (1), та провівши з ними деякі алгебраїчні перетворення, отримаємо диференціальні рівняння руху стрілової системи під час зміни вильоту вантажу:

$$\begin{cases} J_0 \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_0}{\partial \alpha} \dot{\alpha}^2 = M \frac{\partial \varphi_5}{\partial \alpha} + mg \frac{x - x_D}{H} \frac{\partial x_D}{\partial \alpha}; \\ m \ddot{x} = -mg \frac{x - x_D}{H}, \end{cases} \quad (4)$$

де J_0 – момент інерції всієї стрілової системи без вантажу, приведений до вісі повороту стріли.

До систем (3) і (4) входить складова $x - x_D$, яка відображає різницю між горизонтальними координатами вантажу та точки D хобота.

Використовуючи систему рівнянь (4) знайдемо такий режим руху вантажу, при якому на всій ділянці зміни вильоту стрілової системи забезпечується найменша різниця між горизонтальним ривком вантажу та ривком кінцевої точки хобота D , тобто:

$$\sum_{i=1}^n |\ddot{x} - \ddot{x}_D| \rightarrow \min. \quad (5)$$

Оскільки значення виразу (5) можуть бути як менші від нуля так і більші, то знайдемо суму квадратів відхилення ривків \ddot{x} і \ddot{x}_D .

Вказану суму знайдемо, проінтегрувавши квадрат різниці ривків на всій ділянці зміни вильоту:

$$\Delta \ddot{x}^2 = \int_0^{t_1} (\ddot{x} - \ddot{x}_D)^2 dt = \frac{H^2}{g^2} \int_0^{t_1} x^2 dt, \quad (6)$$

де t_1 – тривалість руху стрілової системи.

Умовою мінімуму функціоналу (6) є рівняння Ейлера-Пуассона [8], яке з урахуванням підінтегральної функції виразу (6) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial x^2}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial x^2}{\partial \dot{x}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial x^2}{\partial \ddot{x}} - \\ & - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial x^2}{\partial \ddot{x}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial x^2}{\partial x} - \frac{d^5}{dt^5} \frac{\partial x^2}{\partial x} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Продиференціювавши складові вирази рівняння (7), отримаємо диференціальне рівняння: $x = 0$. (8)

Проінтегрувавши рівняння (8) за часом, отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} & \text{IX} \quad \text{VIII} \\ & x = A_1; \quad \dot{x} = A_1 t + A_2; \end{aligned}$$

$$\text{VII} \quad x = \frac{1}{2} A_1 t^2 + A_2 t + A_3;$$

$$\text{VI} \quad x = \frac{1}{6} A_1 t^3 + \frac{1}{2} A_2 t^2 + A_3 t + A_4;$$

$$\text{V} \quad x = \frac{1}{24} A_1 t^4 + \frac{1}{6} A_2 t^3 + \frac{1}{2} A_3 t^2 + A_4 t + A_5;$$

$$\text{IV} \quad x = \frac{1}{120} A_1 t^5 + \frac{1}{24} A_2 t^4 + \frac{1}{6} A_3 t^3 +$$

$$+ \frac{1}{2} A_4 t^2 + A_5 t + A_6;$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{720} A_1 t^6 + \frac{1}{120} A_2 t^5 + \frac{1}{24} A_3 t^4 +$$

$$+ \frac{1}{6} A_4 t^3 + \frac{1}{2} A_5 t^2 + A_6 t + A_7;$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{5040} A_1 t^7 + \frac{1}{720} A_2 t^6 + \frac{1}{120} A_3 t^5 +$$

$$+ \frac{1}{24} A_4 t^4 + \frac{1}{6} A_5 t^3 + \frac{1}{2} A_6 t^2 + A_7 t + A_8;$$

$$\dot{x} = \frac{1}{40320} A_1 t^8 + \frac{1}{5040} A_2 t^7 + \frac{1}{720} A_3 t^6 +$$

$$+ \frac{1}{120} A_4 t^5 + \frac{1}{24} A_5 t^4 + \frac{1}{6} A_6 t^3 + \frac{1}{2} A_7 t^2 +$$

$$+ A_8 t + A_9;$$

$$x = \frac{1}{362880} A_1 t^9 + \frac{1}{40320} A_2 t^8 +$$

$$+ \frac{1}{5040} A_3 t^7 + \frac{1}{720} A_4 t^6 + \frac{1}{120} A_5 t^5 +$$

$$+ \frac{1}{24} A_6 t^4 + \frac{1}{6} A_7 t^3 + \frac{1}{2} A_8 t^2 + A_9 t + A_{10}, \quad (9)$$

де $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}$ – постійні інтегрування, які визначаються із крайових умов руху.

При переміщенні вантажу стріловою системою із одного положення із координатою $x = x_0$ в інше положення із координатою $x = x_1$, крайові умови мають вигляд:

$$t = 0, x = x_0, \dot{x} = \ddot{x} = \ddot{x} = x = 0;$$

$$t = t_1, x = x_1, \dot{x} = \ddot{x} = \ddot{x} = x = 0. \quad (10)$$

Визначимо постійні інтегрування при вказаних крайових умовах:

$$\begin{aligned}
 A_{10} &= x_0; A_9 = A_8 = A_7 = A_6 = 0; \\
 A_5 &= 15120 \frac{x_1 - x_0}{t_1^5}; A_4 = -302400 \frac{x_1 - x_0}{t_1^6}; \\
 A_3 &= 2721600 \frac{x_1 - x_0}{t_1^7}; \\
 A_2 &= -12700800 \frac{x_1 - x_0}{t_1^8}; \\
 A_1 &= 25401600 \frac{x_1 - x_0}{t_1^9}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Після підстановки цих постійних інтегрування в залежності (9) знайдемо такий режим руху вантажу, що забезпечує мінімальне середньоквадратичне відхилення між ривком вантажу та ривком кінцевої точки хобота на всій ділянці руху:

$$\begin{aligned}
 x &= (x_1 - x_0)(70\bar{t}^9 - 315\bar{t}^8 + 540\bar{t}^7 - \\
 &- 420\bar{t}^6 + 126\bar{t}^5) + x_0; \\
 \dot{x} &= 630 \frac{(x_1 - x_0)}{t_1} (\bar{t}^8 - 4\bar{t}^7 + 6\bar{t}^6 - 4\bar{t}^5 + \bar{t}^4); \\
 \ddot{x} &= 2520 \frac{(x_1 - x_0)}{t_1^2} (2\bar{t}^7 - 7\bar{t}^6 + 9\bar{t}^5 - 5\bar{t}^4 + \bar{t}^3); \\
 \ddot{\ddot{x}} &= 2520 \frac{(x_1 - x_0)}{t_1^3} (14\bar{t}^6 - 42\bar{t}^5 + 45\bar{t}^4 - \\
 &- 20\bar{t}^3 + 3\bar{t}^2); \\
 \overset{IV}{x} &= 15120 \frac{(x_1 - x_0)}{t_1^4} (14\bar{t}^5 - 35\bar{t}^4 + 30\bar{t}^3 - \\
 &- 10\bar{t}^2 + \bar{t}); \\
 \overset{V}{x} &= 15120 \frac{(x_1 - x_0)}{t_1^5} (70\bar{t}^4 - 140\bar{t}^3 + \\
 &+ 90\bar{t}^2 - 20\bar{t} + 1); \\
 \overset{VI}{x} &= 302400 \frac{(x_1 - x_0)}{t_1^6} (14\bar{t}^3 - 21\bar{t}^2 + 9\bar{t} - 1), \quad (12)
 \end{aligned}$$

де t_1 – час руху вантажу; \bar{t} – відносний час руху стрілової системи $0 \leq \bar{t} \leq 1$.

$$\text{Причому: } \bar{t} = \frac{t}{t_1}, \quad (13)$$

де t – значення часу в дану мить $0 \leq t \leq t_1$.

За допомогою другого рівняння системи (4) встановимо взаємозв'язок між знайденим режимом руху вантажу (12) та механізмом зміни вильоту стрілової системи:

$$x_D = x + \frac{H}{g} \ddot{x}. \quad (14)$$

Тричі продиференціювавши вираз (14) за часом, знайдемо ривок кінцевої точки хобота D .

Використовуючи систему рівнянь, яка враховує кінематичні співвідношення між ланками стрілової системи, можна знайти горизонтальну координату точки D :

$$\begin{cases} x_D = L \cos \alpha + l \cos \varphi_2; \\ H = L \sin \alpha - l \sin \varphi_2, \end{cases} \quad (15)$$

де L, l – довжина відповідно стріли і хобота; φ_2 – кут нахилу хобота до горизонту в даному положенні стрілової системи.

Із першого рівняння системи (15) знайдемо:

$$\begin{aligned}
 \cos \varphi_2 &= \frac{x_D - L \cos \alpha}{l}; \\
 \sin \varphi_2 &= \sqrt{1 - \left(\frac{x_D - L \cos \alpha}{l} \right)^2}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

Підставивши отримані вирази (15) у друге рівняння системи (15), отримаємо:

$$H = L \sin \alpha - l \sqrt{1 - \left(\frac{x + \frac{H\ddot{x}}{g} - L \cos \alpha}{l} \right)^2}. \quad (17)$$

Згрупуємо подібні члени та піднесемо обидві сторони рівняння до квадрату:

$$(L \sin \alpha - H)^2 = l^2 \left[1 - \left(\frac{x + \frac{H\ddot{x}}{g} - L \cos \alpha}{l} \right)^2 \right]. \quad (18)$$

Розкладемо ліву та праву частини виразу (18), як квадрат різниці двох складових:

$$\begin{aligned}
 L^2 (1 - \cos^2 \alpha) - 2HL \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} + H^2 &= \\
 = l^2 - \left(x + \frac{H\ddot{x}}{g} \right)^2 + 2L \cos \alpha \left(x + \frac{H\ddot{x}}{g} \right) - L^2 \cos^2 \alpha. \quad (19)
 \end{aligned}$$

Замінімо в останньому рівнянні $\cos \alpha$ на z та $\left(x + \frac{H\dot{x}}{g}\right)$ на x_D , провівши деякі алгебраїчні перетворення отримаємо квадратне рівняння із невідомим z :

$$H^2 + x_D^2 - l^2 + L^2 - 2x_D L z - 2HL\sqrt{1-z^2} = 0. \quad (20)$$

Розв'язавши рівняння (20), отримаємо:

$$z_{1,2} = \frac{x_D L (H^2 + x_D^2 - l^2 + L^2)}{2(H^2 + x_D^2) L^2} \pm \frac{\sqrt{H^2 L^2 \left[-(H^2 + x_D^2 - l^2)^2 + 2(H^2 + x_D^2 + l^2) L^2 - L^4 \right]}}{2(H^2 + x_D^2) L^2} \quad (21)$$

Аналізуючи обидва значення z видно, що дійсним розв'язком рівняння (20) буде:

$$z = \frac{x_D L (H^2 + x_D^2 - l^2 + L^2)}{2(H^2 + x_D^2) L^2} - \frac{\sqrt{H^2 L^2 \left[-(H^2 + x_D^2 - l^2)^2 + 2(H^2 + x_D^2 + l^2) L^2 - L^4 \right]}}{2(H^2 + x_D^2) L^2} \quad (22)$$

оскільки лише цей розв'язок забезпечує корінь z , що відповідає поставленим умовам задачі.

Кутова координата стріли α , що відповідає оптимальному режиму руху вантажу, визначається як

$$\alpha = \arccos z. \quad (23)$$

Проведемо дослідження оптимального руху вантажу для стрілової системи крана МАРК 40 [10] з такими характеристиками:

- мінімальний виліт $S_{min} = 7,4\text{м}$;
- максимальний виліт $S_{max} = 30\text{м}$;
- середня швидкість зміни вильоту $V = 1,05\text{м/с}$;
- час зміни вильоту від мінімального до максимального $t = 22\text{с}$;
- довжина стріли $L = 25,76\text{м}$;
- довжина хобота $l = 10,16\text{м}$;
- довжина підвісу вантажу $H = 14,7\text{м}$;
- маса стріли $m_1 = 12650\text{кг}$;
- маса хобота (в зборі з контрхоботом) $m_2 = 5423\text{кг}$;
- маса відтяжки $m_3 = 3114\text{кг}$;
- маса противаги $m_4 = 13525\text{кг}$;
- середня вантажопідйомність крана на основному гаку $m = 20000\text{кг}$.

Для дослідження руху вантажу під час зміни вильоту, побудуємо графіки залежності горизонтальних координат вантажу x та кінця хобота x_D від відносного часу (рис. 2).

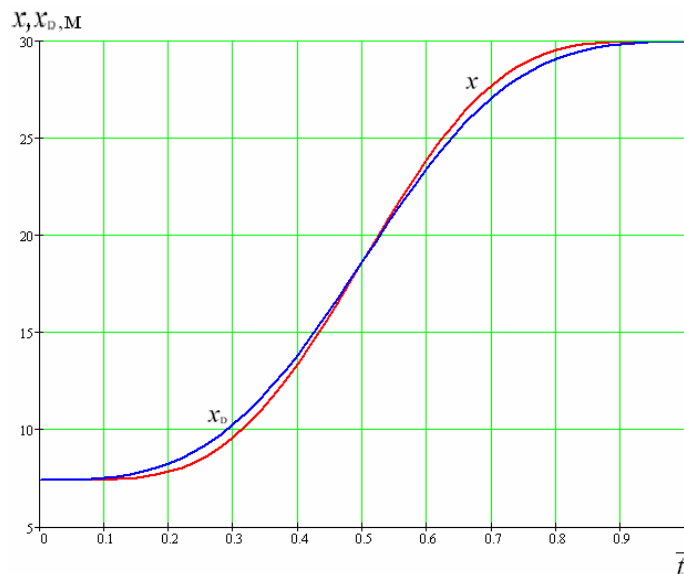


Рис. 2. Графіки зміни горизонтальних координат вантажу та кінцевої точки хобота

Крім того, побудуємо графіки зміни швидкостей вантажу \dot{x} та кінцевої точки хобота \dot{x}_D залежно від відносного часу (рис. 3).

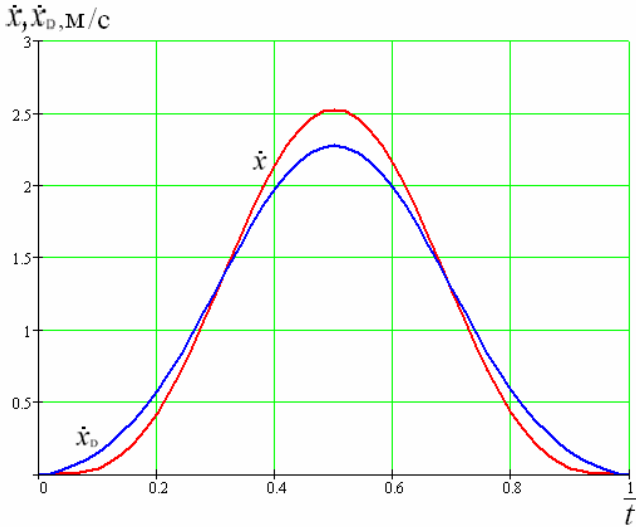


Рис. 3. Графіки зміни швидкостей вантажу та кінцевої точки хобота

Також побудуємо графіки зміни прискорень вантажу \ddot{x} та кінцевої точки хобота \ddot{x}_D (рис. 4).

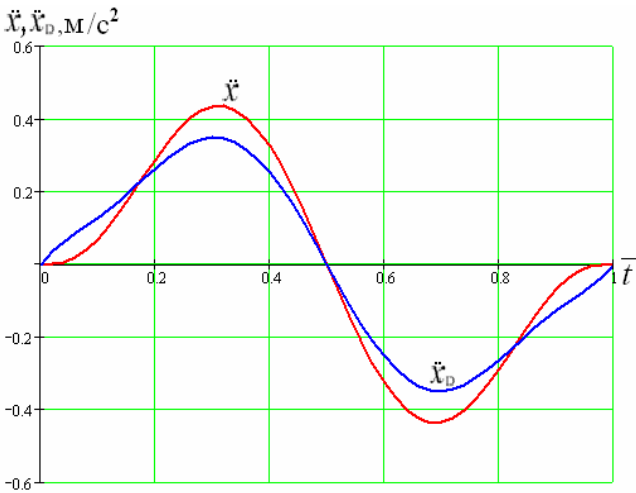


Рис. 4. Графіки зміни прискорень вантажу та кінцевої точки хобота

Для повного дослідження руху вантажу під час зміни вильоту побудуємо ще й графіки зміни ривків для вантажу \dddot{x} та кінцевої точки хобота \dddot{x}_D (рис. 5).

Для того, щоб проаналізувати на скільки відхиляється вантаж від заданого положення, побудуємо графік $\Delta x = f(t)$, який відображає зміну різниці $\Delta x = x - x_D$ між горизонтальною координатою вантажу

x та горизонтальною координатою точки D залежно від часу. Проаналізуємо також різницю між швидкостями $\Delta \dot{x} = \dot{x} - \dot{x}_D$ вантажу та кінцевої точки хобота D . Для цього побудуємо графік $\Delta \dot{x} = f(t)$. Проаналізуємо ще й різницю $\Delta \ddot{x} = \ddot{x} - \ddot{x}_D$ між прискоренням вантажу та горизонтальним прискоренням точки D , і побудуємо графік $\Delta \ddot{x} = f(t)$. Також побудуємо графік $\Delta \ddot{x} = f(t)$, який є відображенням різниці $\Delta \ddot{x} = \ddot{x} - \ddot{x}_D$. Графічні залежності величин Δx , $\Delta \dot{x}$, $\Delta \ddot{x}$, $\Delta \ddot{x}$ від часу наведені на рис. 6, причому Δx вимірюється в м, $\Delta \dot{x}$ в м/с, $\Delta \ddot{x}$ в м/с² і $\Delta \ddot{x}$ в м/с³.

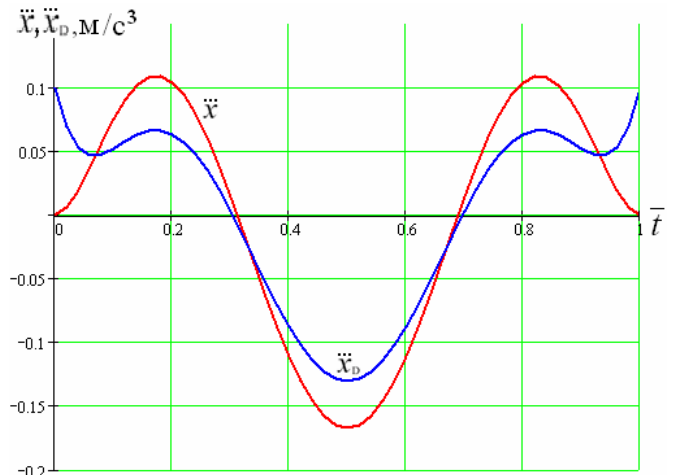


Рис. 5. Графіки зміни ривків вантажу та кінцевої точки хобота

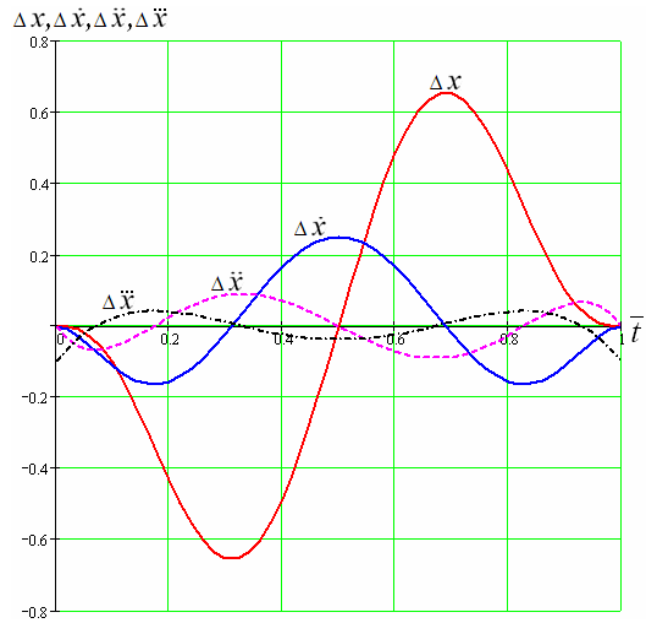


Рис. 6. Графіки зміни відхилень Δx , $\Delta \dot{x}$, $\Delta \ddot{x}$, $\Delta \ddot{x}$

За допомогою рівності (23) побудуємо графік зміни кута нахилу стріли α залежно від часу, тобто $\alpha = f(t)$ (рис. 7).

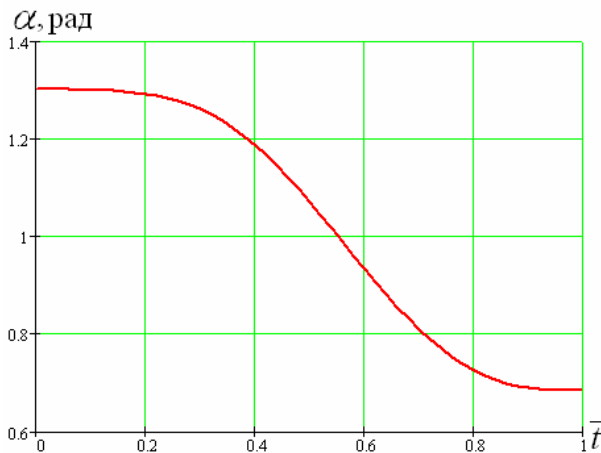


Рис. 7. Графік залежності кута нахилу стріли α від часу

Графіки (рис. 2-7) побудовані при зміні вильоту від мінімального значення S_{min} до максимального S_{max} .

Продиференціювавши вираз (23) за часом, отримаємо залежність для визначення кутової швидкості руху стріли в кожен момент часу

$$\dot{\alpha} = -\frac{\dot{z}}{\sqrt{1-z^2}}, \quad (24)$$

де \dot{z} – вираз (22) продиференційований за часом.

Використовуючи вираз (24) побудуємо графік зміни кутової швидкості стріли при зміні вильоту вантажу від мінімального значення до максимального (рис.8).

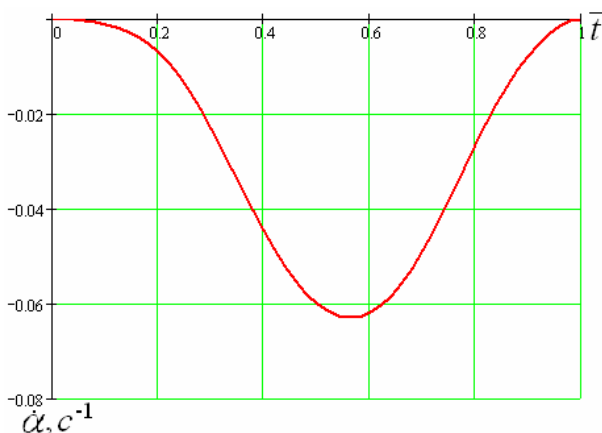


Рис. 8. Графік залежності кутової швидкості стріли $\dot{\alpha}$ від часу

Для більш повного дослідження руху стрілової системи також знайдемо кутове

прискорення стріли при збільшенні вильоту.

Для цього продиференціюємо вираз (24) за часом:

$$\ddot{\alpha} = -\frac{\ddot{z}}{\sqrt{1-z^2}} - \frac{\dot{z}^2 z}{(1-z^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (25)$$

де \ddot{z} – друга похідна від виразу (22) за часом.

Використовуючи вираз (25) побудуємо графік зміни кутового прискорення стріли залежно від відносного часу (рис. 9).

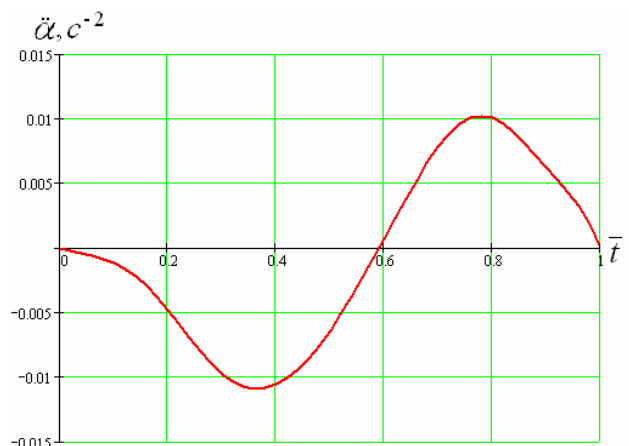


Рис. 9. Графік залежності кутового прискорення стріли $\ddot{\alpha}$ від часу

Висновки. Результатом проведених досліджень було знаходження такого режиму руху шарнірно-зчленованої стрілової системи, який забезпечує мінімальні коливання вантажу на всій ділянці руху від мінімального значення вильоту до максимального.

Якщо порівняти оптимальні режими руху стрілової системи, які були знайдені при мінімізації різниці швидкостей вантажу та кінцевої точки хобота [11], при мінімізації різниці прискорень вантажу та кінцевої точки хобота [12] та наведений оптимальний режим, що знайдений при мінімізації ривків вантажу та кінцевої точки хобота, видно, що цей режим забезпечує найменші коливання вантажу при його переміщенні. Крім того, аналізуючи графіки руху самої стріли (рис. 8-9), видно що вказаний режим є найбільш сприятливим з точки зору динаміки руху всієї стрілової системи.

Література

1. *Ланг А.Г.* Портальные краны / А.Г.Ланг, В.С.Майзель. – Москва, Ленинград : Машгиз, 1953. – 208 с.
2. *Ланг А.Г.* Портальные краны / А.Г.Ланг, И.С.Мазовер, В.С.Майзель. – Москва, Ленинград : Машгиз, 1962. – 284с.
3. *Ловейкин В.С.* Динамический анализ стреловых систем кранов с горизонтальным перемещением груза при изменении вылета: дис. кандидата тех. наук : 05.05.05 / Ловейкин Вячеслав Сергеевич. – К., 1982. – 268 с.
4. *Ловейкин В.С.* Оптимізація режиму зміни вильоту шарнірно-зчленованої стрілової системи крана / В.С.Ловейкін, Д.А.Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2008. – №72. С. 21...27.
5. *Комаров М.С.* Динамика грузоподъемных машин / М.С.Комаров. – Москва, Киев : Машгиз, 1962. – 268 с.
6. *Ловейкин В.С.* Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин : [учеб. пособие] / В.С.Ловейкин. – К. : УМК ВО, 1990. – 168 с.
7. *Яблонский А.А.* Курс теоретической механики. В 2 ч. Ч. 2. Динамика : [учеб. пособие] / А.А.Яблонский, В.М.Никифорова. – М. : Высшая школа, 1977. – 430 с.
8. *Горский Б.Е.* Методика составления операторов передачи движения / Б.Е.Горский, В.С.Ловейкин // Горные, строительные и дорожные машины. – 1979. – №28. – С. 99...105.
9. *Цлаф Л.Я.* Вариационное исчисление и интегральные уравнения / Л.Я.Цлаф. – Санкт-Петербург : Лань, 2005. – 192 с.
10. *Святославский А.* Украинские «Марки» для украинских портов / А.Святославский // Транспорт. – 2004. – №22. – С. 11...15.
11. *Ловейкин В.С.* Метод мінімізації коливань вантажу в шарнірно-зчленованій стріловій системі крана під час зміни вильоту / В.С.Ловейкін, Д.А.Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2010. – №76. С. 35...40.
12. *Ловейкин В.С.* Мінімізація коливань вантажу при горизонтальному переміщенні шарнірно-зчленованою стріловою системою крана / В.С.Ловейкін, Д.А.Паламарчук // Техніка будівництва. – 2010.–№24. С. 9...16.

Рецензент: Є.В. Горбатюк, к.т.н., доцент (КНУБА, Київ)

Отримано: 8.11.2011р .