

МАШИНИ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ

УДК 624.87

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РУХУ МЕХАНІЗМА ПОВОРОТУ СТРІЛОВОГО КРАНА ЗА КРИТЕРІЄМ СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗМІНИ ПРУЖНОГО МОМЕНТУ В ПРИВОДІ

*В. С. Ловейкін, доктор технічних наук
Національний університет біоресурсів і
природокористування України*

*Ю. В. Ловейкін, кандидат фізико-математичних наук
Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

І. О. Кадикало, аспірант
Національний університет біоресурсів і
природокористування України
e-mail: lovvs@ukr.net*

Анотація. *Стаття присвячена одному із способів вирішення проблеми з усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі при роботі механізму повороту стрілового крана. Розв'язана задача оптимізації режиму пуску механізму повороту стрілового крана за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводному механізмі. Поставлена задача розв'язана шляхом використання методів варіаційного числення. Критерій оптимізації представлено у вигляді інтегрального функціоналу, який відображає небажані властивості системи, тому значення його зведене до мінімуму. Розв'язком задачі є функціональні залежності режимів руху окремих ланок стрілової системи на ділянці пуску, які представлені в графічному вигляді. Отримані режими повороту стрілової системи дозволили усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі після процесу пуску, а також зменшити до мінімуму динамічні навантаження в приводному механізмі та металоконструкції крана. Крім того, оптимальні режими пуску дають можливість підвищити продуктивність та надійність роботи крана. Для заданих конструктивних, кінематичних та динамічних параметрів стрілової системи обґрунтовано найбільш доцільну тривалість процесу пуску.*

Отримані у даному дослідженні результати можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення існуючих

**Науковий керівник – доктор технічних наук В. С. Ловейкін*

© В. С. Ловейкін, Ю. В. Ловейкін, І. О. Кадикало, 2017

інженерних методів розрахунку механізмів повороту кранів з вантажем на гнучкому підвісі (канаті) як на стадіях їх проектування/конструювання, так і у режимах реальної експлуатації.

Ключові слова: *стріловий/баштовий кран, механізм повороту, вантаж, динамічні навантаження, мінімізація, критерій, оптимізація, коливання, пружний момент, швидкість*

Постановка проблеми. При роботі механізму повороту баштових кранів виникають значні коливання вантажу [1, 2]. Вони за характером дії схожі на маятникові коливання. Ці коливання призводять до нерівномірного руху частин привода механізму повороту крана та його конструкції. Вони є небажаними, оскільки викликають додаткові динамічні навантаження, які знижують надійність привода механізму повороту та конструкції крана в цілому і приводять до зменшення продуктивності, незручностей при експлуатації, а також збільшують імовірність виникнення аварійної ситуацій під час роботи крана.

Вирішення даної проблеми допоможе зменшити динамічні навантаження. Що можливо зробити за рахунок зменшення коливань вантажу на гнучкому підвісі під час перехідних процесів. Це дасть можливість підвищити надійність, продуктивність та ефективність експлуатації баштових кранів в цілому.

Аналіз останніх досліджень. Відомо, що під час роботи механізму повороту баштових кранів виникає проблема коливань вантажу на гнучкому підвісі, а також динамічних навантажень у приводі та конструкції. Оскільки продуктивність кранів значно збільшилась за останні роки, то ці проблеми набули особливої ваги. Проблемою аналізу та усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі та зменшенням динамічних навантажень займалася велика кількість вчених [1–7]. Більшість досліджень, присвячених даній проблемі, ґрунтуються на використанні математичних теорій оптимальних процесів таких як: принципу максимуму та варіаційного числення [8–12]. Аналізуючи роботи присвячені даній темі [3, 4, 13, 14] виявлено, що авторами за керуючий параметр було обрано силову дію на приводні механізми. Тобто щоб усунути коливання вантажу потрібно керувати моментом на валу електродвигуна механізму повороту крана, а при цьому керуюча дія має, як правило, релейний характер, що призводить до додаткових динамічних навантажень в приводі і конструкції. Що є неприйнятним з точки зору виникнення динамічних навантажень.

Проте, за допомогою використання теорії варіаційного числення, як це показано в роботах [8, 14–18], можна забезпечити

плавну зміну кінематичних характеристик механізму повороту і звести коливання вантажу на гнучкому підвісі до мінімуму.

Мета досліджень – оптимізація режиму руху механізму повороту стрілового крана під час переміщення вантажу на гнучкому підвісі за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводі під час перехідних процесів при різній тривалості розгону приводу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: 1) обрати динамічну та математичну модель механізму повороту стрілового крана [7]; 2) обрати критерій оптимізації режиму повороту крана та встановити умови його мінімуму; 3) визначити оптимальний режим розгону механізму повороту; 4) провести аналіз отриманих результатів.

Результати досліджень. Для проведення досліджень прийнято тримасову динамічну модель механізму повороту крана (рис. 1), побудова якої передбачає наступні припущення:

- 1) підвішений вантаж подібний до вільно висячого маятника;
- 2) припускаємо відцентрові коливання вантажу в порівнянні з радіальними незначними і їх дію не враховуємо;
- 3) усі елементи механізму повороту вважаємо абсолютно твердими тілами, окрім передавального механізму приводу.

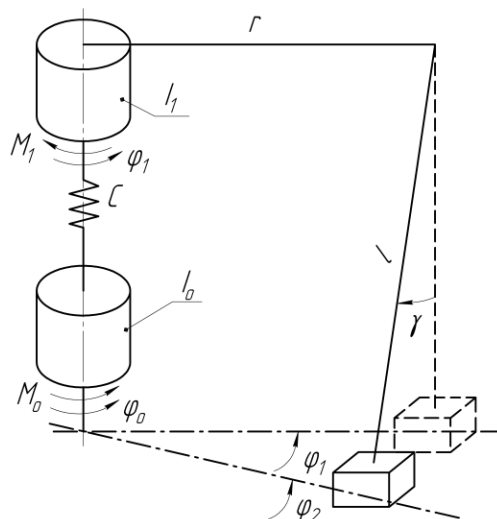


Рис. 1. Динамічна модель механізму повороту крана.

Перераховані припущення при дослідженнях дають досить малу похибку, що підтверджується практичними дослідженнями конструкцій механізму повороту реальних кранів [2, 7].

За узагальнені координати динамічної моделі прийняті кутові координати повороту зведеної до осі поворота крана маси елементів приводу φ_0 , поворотної башти зі стрілою відносно власної осі обертання φ_1 та вантажу φ_2 .

Динамічна модель (рис. 1) описується системою наступних диференціальних рівнянь руху другого порядку:

$$\begin{cases} I_o \ddot{\varphi}_o = M_o - C \cdot (\varphi_o - \varphi_1) \\ I_1 \ddot{\varphi}_1 = C \cdot (\varphi_o - \varphi_1) - mr^2 \frac{g}{l} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - M_1; \\ \ddot{\varphi}_2 = \frac{g}{l} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \end{cases} \quad (1)$$

де: I_o – момент інерції приводного механізму, зведений до осі повороту крана; I_1 – момент інерції башти та стріли, зведений до осі повороту крана; m – маса вантажу; M_o – рушійний момент на валу приводного електродвигуна, зведений до осі повороту крана; M_1 – момент сил статичного опору, зведений до осі повороту крана; l – довжина гнучкого підвісу вантажу; r – виліт вантажу; C – коефіцієнт жорсткості приводного механізму, зведений до осі повороту крана; g – прискорення вільного падіння.

З рівнянь системи (1) знаходимо кінематичні характеристики башти, виражені через характеристики вантажу:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 + \frac{l}{g} \ddot{\varphi}_2; \\ \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 + \frac{l}{g} \dot{\ddot{\varphi}}_2; \\ \ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}_2 + \frac{l}{g} \cdot \overset{IV}{\varphi}_2. \end{cases} \quad (2)$$

Пружний момент в приводному механізмі виражається залежностями:

$$\begin{aligned} M_{o1} &= C \cdot (\varphi_o - \varphi_1) = I_1 \ddot{\varphi}_1 + mr^2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + M_1; \\ M_{o1} &= I_1 \cdot \frac{l}{g} \cdot \overset{IV}{\varphi}_2 + (I_1 + mr^2) \cdot \ddot{\varphi}_2 + M_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Швидкість зміни пружного моменту в приводному механізмі

$$\dot{M}_{o1} = I_1 \cdot \frac{l}{g} \cdot \overset{V}{\varphi}_2 + (I_1 + mr^2) \cdot \ddot{\varphi}_2. \quad (4)$$

За критерій оптимізації процесу пуску механізму повороту баштового крана прийнято середньоквадратичне значення швидкості зміни пружного моменту в приводі, оскільки саме цей момент в значній мірі визначає динамічні навантаження:

$$\dot{M}_{o1ck} = \left[\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \dot{M}_{o1}^2 dt \right]^{1/2} \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$f = \dot{M}_{o1}^2 = \left[I_1 \frac{l}{g} \cdot \overset{V}{\varphi}_2 + (I_1 + mr^2) \cdot \ddot{\varphi}_2 \right]^2. \quad (6)$$

Умова мінімуму критерію (5) з урахуванням виразу(6) є рівняння Ейлера-Пуассона:

$$\sum_{i=3}^5 (-1)^i \frac{d^i}{dt^i} \frac{df}{d\varphi_2} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{df}{d\ddot{\varphi}_2} = 2 \cdot \left[I_1 \frac{l}{g} \cdot \overset{V}{\varphi}_2 + (I_1 + mr^2) \cdot \ddot{\varphi}_2 \right] \cdot (I_1 + mr^2);$$

$$\frac{df}{d\varphi_2} = 0;$$

$$\frac{df}{d\varphi_2} = 2 \cdot I_1 \cdot \frac{l}{g} \left[I_1 \frac{l}{g} \cdot \overset{V}{\varphi}_2 + (I_1 + mr^2) \cdot \ddot{\varphi}_2 \right];$$

$$\frac{d^3}{dt^3} \frac{df}{d\ddot{\varphi}_2} = 2 \cdot \left[I_1 \frac{l}{g} \cdot \overset{VIII}{\varphi}_2 + (I_1 + mr^2) \cdot \overset{VI}{\varphi}_2 \right] \cdot (I_1 + mr^2);$$

$$\frac{d^5}{dt^5} \frac{df}{d\varphi_2} = 2 \cdot I_1 \frac{l}{g} \cdot \left[I_1 \frac{l}{g} \cdot \overset{X}{\varphi}_2 + (I_1 + mr^2)^2 \cdot \overset{VIII}{\varphi}_2 \right]. \quad (8)$$

Після підстановки виразів (8) в рівняння (7) маємо:

$$\left(I_1 \frac{l}{g} \right)^2 \cdot \overset{X}{\varphi}_2 + 2 \cdot I_1 \frac{l}{g} \cdot (I_1 + mr^2) \cdot \overset{VIII}{\varphi}_2 + (I_1 + mr^2)^2 \cdot \overset{VI}{\varphi}_2 = 0. \quad (9)$$

Розділяємо всі члени рівняння (9) на коефіцієнт біля найвищої похідної, в результаті чого отримаємо:

$$\overset{X}{\varphi}_2 + 2 \cdot k^2 \cdot \overset{VIII}{\varphi}_2 + k^4 \cdot \overset{VI}{\varphi}_2 = 0, \quad (10)$$

де: $k = \sqrt{\left(1 + \frac{mr^2}{I_1}\right) \frac{g}{l}}$ – частота власних коливань системи.

Для розв'язку диференціального рівняння (10) складемо характеристичне рівняння:

$$r^{10} + 2 \cdot k^2 \cdot r^8 + k^4 \cdot r^6 = 0;$$

$$r^6 \cdot (r^4 + 2 \cdot k^2 \cdot r^2 + k^4) = 0. \quad (11)$$

З рівняння (11) маємо:

$$r^6 = 0 \rightarrow r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 0; \quad (12)$$

$$r^4 + 2 \cdot k^2 \cdot r^2 + k^4 = 0. \quad (13)$$

З рівняння (13) зробимо заміну $r^2 = p$.

Тоді отримаємо квадратне рівняння:

$$p^2 + 2 \cdot k^2 \cdot p + k^4 = 0,$$

розв'язок якого дає:

$$p_1 = r_{7,8} = \sqrt{-k^2} = \pm k_i, \quad (14)$$

$$p_2 = r_{9,10} = \sqrt{-k^2} = \pm k_i. \quad (15)$$

Відповідно до розв'язків (12), (14) і (15) характеристичного рівняння (11) розв'язок диференціального рівняння (10) має вигляд:

$$\varphi_2 = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 + C_5 t^4 + C_6 t^5 + (C_7 + C_8 t) \cdot \sin kt + (C_9 + C_{10} t) \cdot \cos kt, \quad (16)$$

де: C_1, C_2, \dots, C_{10} – постійні, які визначаються з крайових умов руху. Для процесу пуску ці умови мають вигляд:

$$\begin{cases} t=0: \varphi_2 = \varphi_1 = 0; \dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_1 = 0; \ddot{\varphi}_2 = \ddot{\varphi}_1; \\ t=t_1: \varphi_2 = \varphi_1 = \omega_y t_1 / 2; \dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_1 = \omega_y; \ddot{\varphi}_2 = \ddot{\varphi}_1. \end{cases} \quad (17)$$

Виразимо крайові умови φ_1 , $\dot{\varphi}_1$ та $\ddot{\varphi}_1$ через координату φ_2 та її похідні за часом. Для цього скористаємось залежностями (2), які дають:

$$\begin{cases} t=0: \varphi_2 = 0, \dot{\varphi}_2 = 0, \ddot{\varphi}_2 = 0, \overset{IV}{\ddot{\varphi}_2} = 0, \overset{IV}{\varphi_2} = 0; \\ t=t_1: \varphi_2 = \omega_y t_1 / 2; \dot{\varphi}_2 = \omega_y, \ddot{\varphi}_2 = 0, \overset{IV}{\ddot{\varphi}_2} = 0, \overset{IV}{\varphi_2} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Для визначення постійних C_1, C_2, \dots, C_{10} візьмемо похідні за часом від залежності (16) включно до четвертого порядку:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_2 &= C_2 + 2 \cdot C_3 t + 3 \cdot C_4 t^2 + 4 \cdot C_5 t^3 + 5 \cdot C_6 t^4 + (C_8 - C_9 k - C_{10} k t) \cdot \sin kt + \left(\begin{matrix} C_{10} + \\ + C_7 k + C_8 k t \end{matrix} \right) \cdot \cos kt, \\ \ddot{\varphi}_2 &= 2 \cdot C_3 + 6 \cdot C_4 t + 12 \cdot C_5 t^2 + 20 \cdot C_6 t^3 - (2C_{10} + C_7 k + C_8 k t) / \sin kt + \left(\begin{matrix} 2C_8 - C_9 k - \\ - C_{10} k t \end{matrix} \right) k \cdot \cos kt, \\ \overset{IV}{\varphi}_2 &= 6 \cdot C_4 + 24 \cdot C_5 t + 60 \cdot C_6 t^2 - (3C_8 - C_9 k - C_{10} k t) k^2 \sin kt - (3C_{10} + C_7 k + C_8 k t) k^2 \cdot \cos kt, \\ \overset{IV}{\varphi}_2 &= 24 \cdot C_5 + 120 \cdot C_6 t + (4C_{10} + C_7 k + C_8 k t) k^3 \sin kt - (4C_8 - C_9 k - C_{10} k t) k^3 \cdot \cos kt. \end{aligned} \quad (19)$$

Після підстановки крайових умов (18) в залежності (16) і (19) отримаємо:

$$\begin{aligned} C_1 + C_9 &= 0; \quad C_2 + C_{10} + C_7 k = 0; \quad 2 \cdot C_3 + 2C_8 k - C_9 k^2 = 0; \\ 6 \cdot C_4 - 3C_{10} k^2 - C_7 k^3 &= 0; \quad 24 \cdot C_5 - 4C_8 k^3 + C_9 k^4 = 0; \\ C_1 + C_2 t_1 + C_3 t_1^2 + C_4 t_1^3 + C_5 t_1^4 + C_6 t_1^5 (C_7 + C_8 t_1) \cdot \sin kt_1 + (C_9 + C_{10} t_1) \cdot \cos kt_1 &= \frac{\omega_y t_1}{2}; \\ C_2 + 2 \cdot C_3 t_1 + 3 \cdot C_4 t_1^2 + 4C_5 t_1^3 + 5C_6 t_1^4 + (C_8 - C_9 k - C_{10} k t_1) \cdot \sin kt_1 + (C_{10} + C_7 k + C_8 k t_1) \cdot \cos kt_1 &= \omega_y; \\ 2 \cdot C_3 + 6 \cdot C_4 t_1 + 12C_5 t_1^2 + 20C_6 t_1^3 - (2 \cdot C_{10} + C_7 k + C_8 k t_1) \cdot k \cdot \sin kt_1 + (2 \cdot C_8 - C_9 k - C_{10} k t_1) \cdot k \cdot \cos kt_1 &= 0; \\ 6 \cdot C_4 + 24 \cdot C_5 t_1 + 60C_6 t_1^2 - (3 \cdot C_8 - C_9 k - C_{10} k t_1) \cdot k^2 \cdot \sin kt_1 - (3 \cdot C_{10} + C_7 k + C_8 k t_1) \cdot k^2 \cdot \cos kt_1 &= 0; \\ 24 \cdot C_5 + 120 \cdot C_6 t_1 + (4 \cdot C_{10} + C_7 k + C_8 k t_1) \cdot k^3 \cdot \sin kt_1 - (4 \cdot C_8 - C_9 k - C_{10} k t_1) \cdot k^3 \cdot \cos kt_1 &= 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Розв'язавши систему (20), знайдемо постійні C_1, C_2, \dots, C_8 , підставивши які в (16) та (19), отримаємо оптимальний режим повороту вантажу. Після чого за допомогою залежності (2) визначаємо оптимальний режим повороту крана.

З системи (1) визначаємо режим руху приводного механізму, який відповідає оптимальному режиму повороту крана:

$$\begin{cases} \varphi_o = \varphi_1 + \frac{I_1}{C} \dot{\varphi}_1 + \frac{mr^2}{C} \dot{\varphi}_2 + \frac{M_1}{C}; \\ \dot{\varphi}_o = \dot{\varphi}_1 + \frac{I_1}{C} \ddot{\varphi}_1 + \frac{mr^2}{C} \ddot{\varphi}_2; \\ \ddot{\varphi}_o = \ddot{\varphi}_1 + \frac{I_1}{C} \varphi_1 + \frac{mr^2}{C} \varphi_2. \end{cases} \quad (21)$$

Для механізму повороту стрілової системи крана QTZ–80 з параметрами:

$$I_o = 71626,115 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; I_1 = 4920738,85 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; C = 6626669,045 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}; m = 2000 \text{ кг};$$

$$r = 40 \text{ м}; l = 30 \text{ м}; M_{кр} = 85 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_H = 36,8 \text{ Н} \cdot \text{м}; u = 1355,2; \eta = 0,86;$$

$$\omega_o = 104,67 \text{ рад/с}; \omega_H = 95,04 \text{ рад/с}; \lambda = 2,8; g = 9,81 \text{ м/с}^2,$$

на основі залежностей (2), (19), (21) побудовано графіки зміни кінематичних характеристик приводного механізму: графіки зміни кутових швидкостей поворотної башти (рис. 2) та вантажу (рис. 3); графіки зміни кутових прискорень поворотної башти (рис. 4) та вантажу (рис. 5). Крім того, побудовано графіки зміни пружного моменту передавального механізму (рис. 6) та потужності приводу при оптимальному режимі пуску (рис. 7).

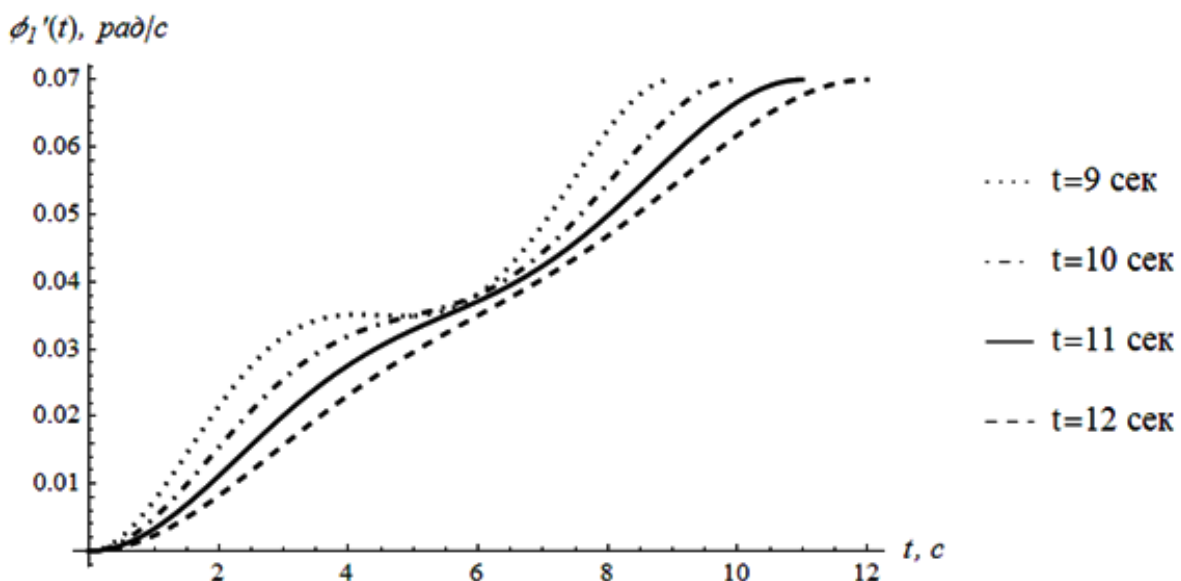


Рис. 2. Графіки зміни кутових швидкостей поворотної башти.

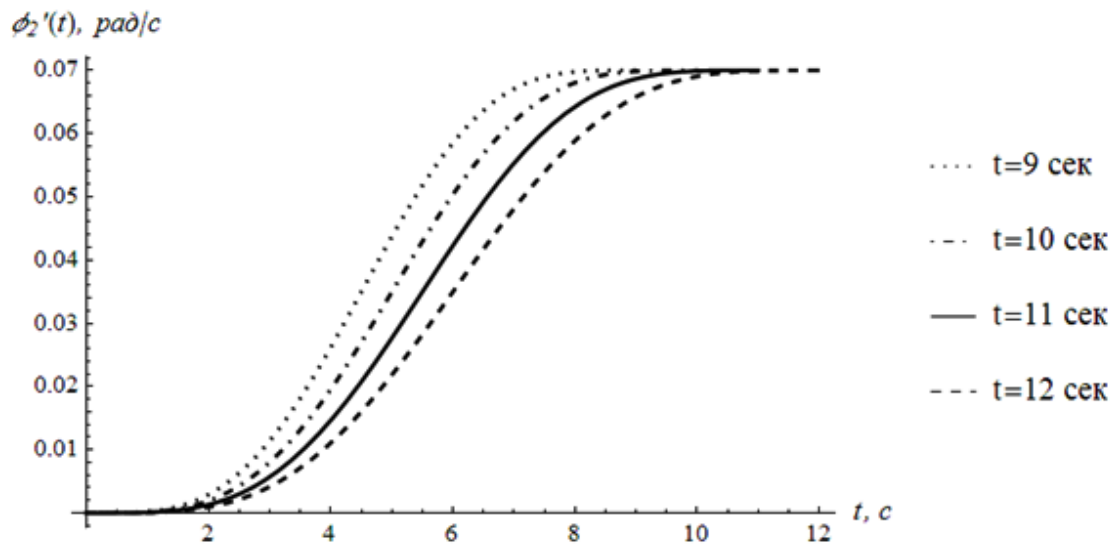


Рис. 3. Графіки зміни кутових швидкостей вантажа.

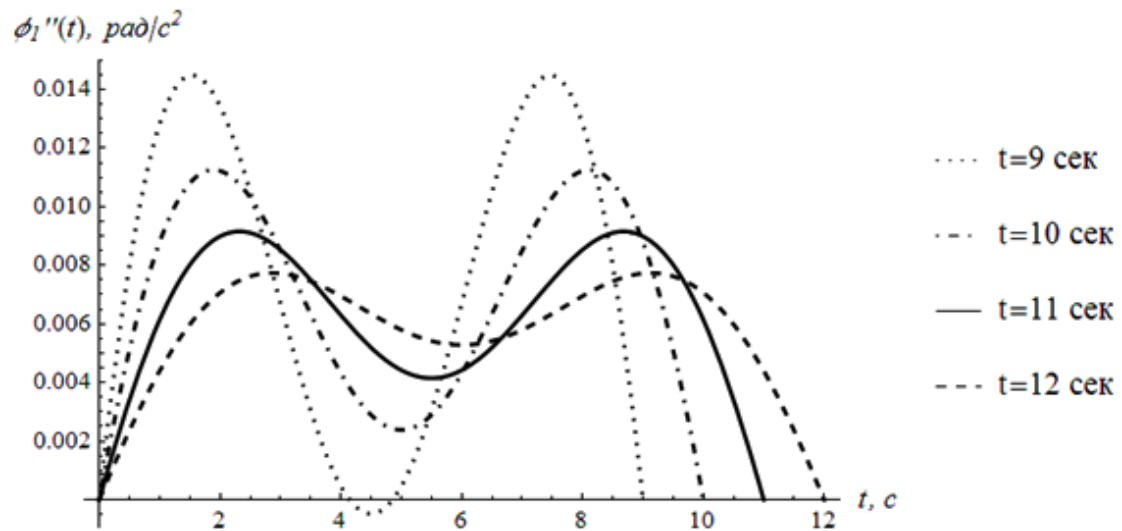


Рис. 4. Графіки зміни кутових прискорень поворотної башти.

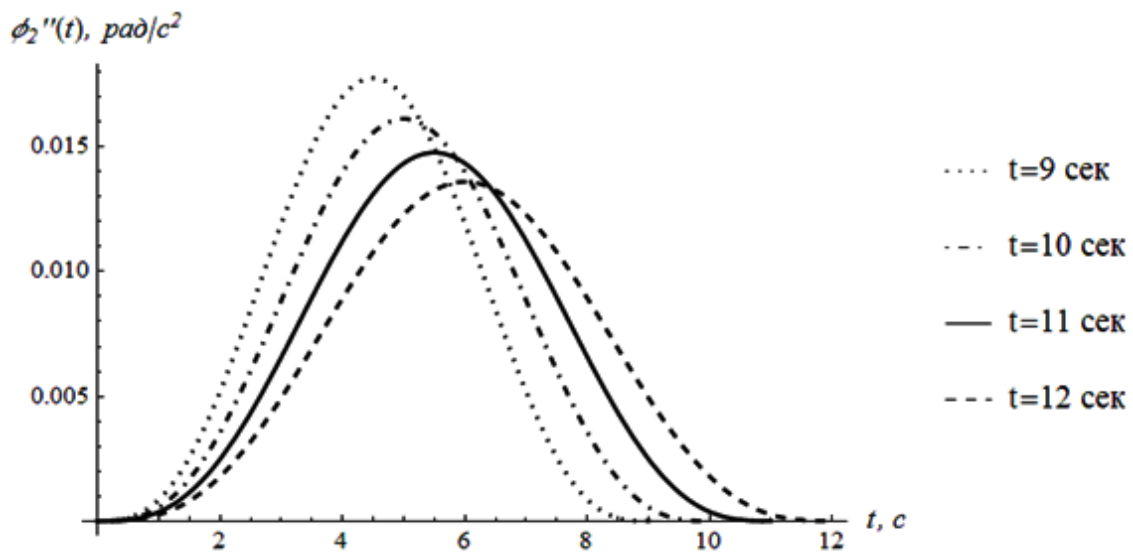


Рис. 5. Графіки зміни кутових прискорень вантажу.

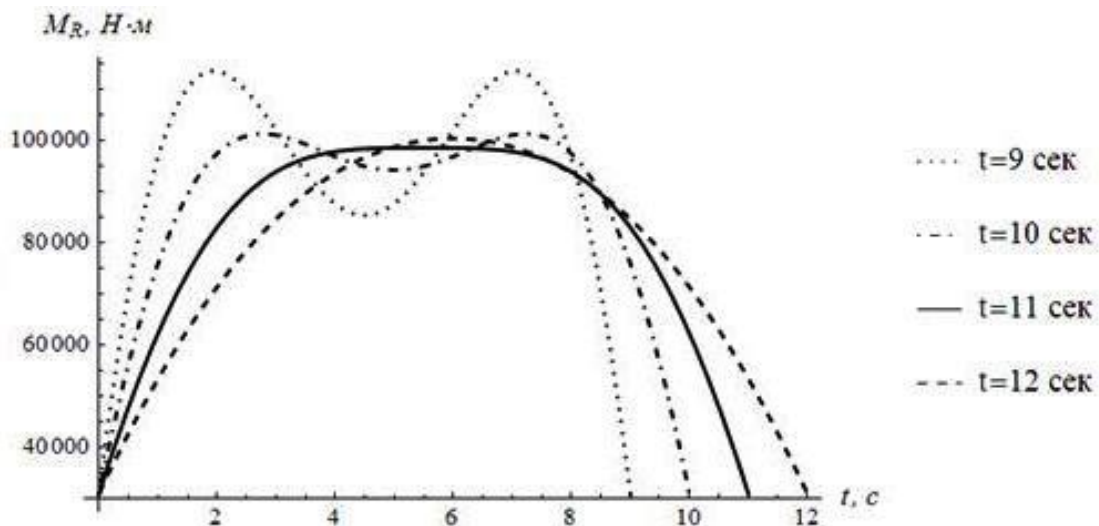


Рис. 6. Графіки зміни пружного моменту в приводі від часу при оптимальному режимі пуску.

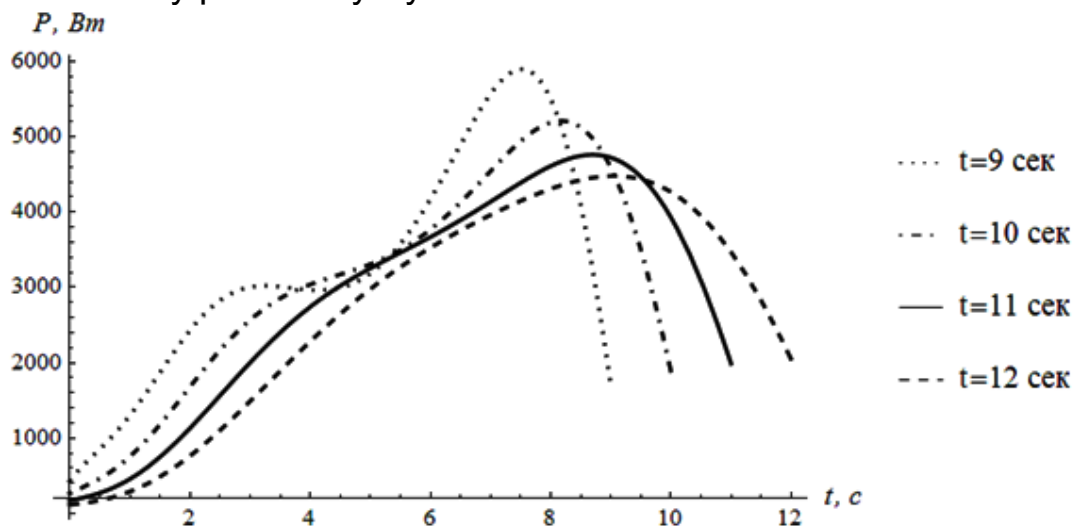


Рис. 7. Графіки зміни потужності привода від часу при оптимальному режимі пуску.

Аналізуючи графічні залежності отримані в результаті розв'язку оптимізаційної задачі, яка проводилася за критерієм середньоквадратичного значення швидкості зміни пружного моменту в приводі, можна бачити, що одини той самий критерій оптимізації при різному часі пуску дає можливість отримати різні закони руху (рис. 6). Розглянуто різний час пуску (9 сек, 10 сек, 11 сек, 12 сек), як видно всі ці результати мають плавний характер зміни кінематичних, силових, енергетичних характеристик. Однак проаналізувавши графічні залежності за різним часом пуску механізму повороту робимо висновок, що оптимальним часом розгону, при якому навантаження на елементи привода найменші, є 11 сек.

Висновок. Виявлено в результаті розв'язку задачі, що при зміні часу розгону є можливість отримати різні оптимізаційні закони руху.

Проаналізувавши різний час пуску (9 сек – 12 сек) виявлено, що оптимальним є закон руху час розгону за яким становить 11 сек. Саме під час цього часу розгону на привод діють найменші навантаження. Таким чином обраний критерій оптимізації режиму руху механізму повороту при часі розгону 11 сек дозволяє зменшити динамічні навантаження в приводі та конструкції, за рахунок плавного прикладання пускового моменту при перехідних режимах руху. Реалізувати отримані оптимальні закони руху можна за допомогою мехатронної системи керування механізмом повороту стрілового крана.

Список літератури

1. *Лобов Н. А.* Динамика грузоподъемных кранов. Москва. Машиностроение. 1987. 160 с.
2. *Комаров М. С.* Динамика грузоподъемных машин. Москва. Машиностроение. 1953. 187 с.
3. *Герасимьяк Р. П., Параил В. А.* Электроприводы крановых механизмов. Москва. Энергия. 1970. 136 с.
4. *Григорьев О. В., Петренко О. В.* Вантажопідйомні машини. Харків. НТУ „ХПІ”. 2006. 304 с.
5. *Казак С. А.* Динамика мостовых кранов. Москва. Машиностроение. 1968. 472 с.
6. *Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Мельниченко В. В.* Аналіз коливань вантажу на гнучкому підвісі при повороті стріли вантажопідйомного крана. Підйомно-транспортна техніка. 2013. №4(40). С. 4–16.
7. *Ловейкін В. С., Пилипака С. Ф., Кадикало І. О.* Динамічний аналіз механізму повороту стрілового крана. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2017. Вип. 258. С. 192–202.
8. *Эльсгольц Л. Э.* Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. Москва. Наука. 1969. 424 с.
9. *Ловейкин В. С.* Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. Киев. УМК ВО. 1990. 168 с.
10. *Дьяконов В. П.* Mathematica 4.1/4.2/5.0 в математических и научно-технических расчетах. Москва. Солон-Пресс. 2004. 696 с.
11. *Ловейкін В. С.* Мінімізація динамічних навантажень в пружних елементах вантажопідйомних машин. Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. Київ. 1998. Вип. 52. С. 63–68.
12. *Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Діктерук М. Г., Пастушенко С. І.* Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин: монографія. Миколаїв. Вид-во РВВ МДАУ. 2004. 288 с.
13. *Зубко Н. Ф.* Прогнозирование коэффициентов динамичности в элементах крановых механизмов. Вестник Одесского национального морского университета. Одесса. ОНМУ. 2013. №2(38). С. 63–71.
14. *Смехов А. А., Ерофеев Н. И.* Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами. Москва. Машиностроение. 1975. 239 с.
15. *Ловейкін В. С., Ярошенко В. Ф., Ромасевич Ю. О.* Оптимізація перехідних режимів руху механізму пересування візка вантажопідйомних машин. Вісник

Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2007. Вип. 59. Т. 2. С. 452–460.

16. *Romasevich Yu. A., Shumilov G. V.* Optimization behavior of variation boom of hoisting crane for singular kinematical criterions. MOTROL. 2011. Vol 13b. P. 167–173.

17. *Loveykin V. S., Mel'nichenko V. A.* Optimizatsiya dinamicheskogo rezhima povorota strelovogo krana. MOTROL. 2013. Vol. 15. №3. P. 70–75.

18. *Ловеїкін В. С., Човнюк Ю. В., Кадикало І. О.* Оптимізація режимів руху механізмів обертання вантажопідйомних кранів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2017. Вип. 262. С. 177–190.

References

1. *Lobov, N. A.* (1987). Dynamics of cranes. Mashinostroenie, 160.

2. *Komarov, M. S.* (1953). Dynamics of load-lifting machines. Mashinostroenie. 187.

3. *Gerasimyak, R. P., Parail, V. A.* (1970). Electric drives of crane mechanisms. ENnergiya. 136.

4. *Grigorov, O. V., Petrenko, N. O.* (2006). Hoisting machines: navch. posibnik. NTU „HPI”. 304.

5. *Kazak, S. A.* (1968). Dynamics of bridge cranes. Mashinostroenie. 472.

6. *Lovejkin, V. S., Chovnyuk, Yu. V., Mel'nichenko, V. V.* (2013). Analysis of the fluctuations of cargo on a flexible suspension when turning the boom of a load-lifting crane. Hoisting and transport equipment. 4(40). 4–16.

7. *Loveykin, V. S., Pylypaka, S. F., Kadykalo I. O.* (2017). Dynamic analysis of the mechanism of rotation of the jib crane. Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK. Kiev. Vol. 258. 192–202.

8. *Eh'lgol'c, L. E.* (1969). Differential equations and variational calculus. Nauka. 424.

9. *Lovejkin, V. S.* (1990). Calculations of optimal modes of motion of machinery in construction machinery. UMK VO. 168.

10. *D'yakonov, V. P.* (2004). Mathematica 4.1/4.2/5.0 in mathematical and scientific-technical calculations. Solon–Press. 696.

11. *Lovejkin, V. S.* (1998). Minimization of dynamic loads in elastic elements of load-lifting machines. Mining, construction, road and land reclamation machines. Vol. 52. 63–68.

12. *Lovejkin, V. S., Chovnyuk, Yu. V., Dikteruk, M. G., Pastushenko, S. I.* (2004). Modeling of dynamics of mechanisms of load-lifting machines. Mikolaiv. RVV MDAU, 288.

13. *Zubko, N. F.* (2013). Prediction of dynamic coefficients in elements of crane mechanisms. Bulletin of Odessa National Maritime University. 2(38). 63–71.

14. *Smekhov, A. A., Yerofeev, N. I.* (1975). Optimum control of lifting and transporting machines. Mashinostroenie. 239.

15. *Lovejkin, V. S., Yaroshenko, V. F., Romasevich, Yu. O.* (2007). Optimization of transitional modes of movement of the mechanism of movement of the trolley of hoisting machines. Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasilenko. 59 (2). 452–460.

16. *Romasevich, Yu. A., Shumilov, G. V.* (2011). Optimization behavior of variation boom of hoisting crane for singular kinematical criterions. MOTROL. Vol. 13b. 167–173.

17. *Loveykin, V. S., Mel'nichenko, V. A.* (2013) Optimization of the dynamic rotation mode of boom. MOTROL. Vol. 15 (3). 70–75.

18. Loveykin, V. S., Chovnyuk, Yu. V., Kadykalo I. O. (2017). Optimization of modes of movement of rotating mechanism of cranes. Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK. Kiev. Vol. 262. 177–190.

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА
СТРЕЛОВОГО КРАНА ПО КРИТЕРИЮ
СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ СКОРОСТИ
ИЗМЕНЕНИЯ УПРУГОГО МОМЕНТА В ПРИВОДЕ**

В. С. Ловейкин, Ю. В. Ловейкин, И. А. Кадыкало

Аннотация. *Статья посвящена одному из способов решения проблемы по устранению колебаний груза на гибком подвесе при работе механизма поворота стрелового крана. Решена задача оптимизации режима пуска механизма поворота стрелового крана по критерию среднеквадратического значения скорости изменения упругого момента в приводном механизме. Поставленная задача решена путем использования методов вариационного исчисления. Критерий оптимизации представлен в виде интегрального функционала, который отражает нежелательные свойства системы, поэтому значение его сведено к минимуму. Решением задачи является функциональные зависимости режимов движения отдельных звеньев стреловой системы на участке пуска, которые представлены в графическом виде. Полученные режимы поворота стреловой системы позволили устранить колебания груза на гибком подвесе после процесса пуска, а также свести к минимуму динамические нагрузки в приводном механизме и металлоконструкции крана. Кроме того, оптимальные режимы пуска позволяют повысить производительность и надежность работы крана. Для заданных конструктивных, кинематических и динамических параметров стреловой системы обоснованно наиболее целесообразную продолжительность процесса пуска.*

Полученные в данном исследовании результаты могут быть в дальнейшем использованы для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчета механизмов поворота кранов с грузом на гибком подвесе (канате) как на стадиях их проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации.

Ключевые слова: *стреловой/башенный кран, механизм поворота, груз, динамические нагрузки, минимизация, критерий, оптимизация, колебания, упругий момент, скорость*

OPTIMIZATION OF MODE OF MOVEMENT OF ROTATION MECHANISM OF ILLICIT SMALL TAP ON CRITERION OF RMS VALUE OF RATE OF CHANGE OF ELASTIC TORQUE IN DRIVE

V. S. Loveikin, Yu. V. Loveikin, I. O. Kadikalo

Abstract. *The article is devoted to one of the ways to solve the problem of eliminating vibrations of the load on a flexible suspension during the operation of slewing gear of the jib crane. The optimization task of the mode for starting the slewing gear of the jib crane has been solved upon the criterion of the root-mean-square value of the change rate of the elastic section modulus in the driving gear. The set task has been solved by using the variational calculus methods. The optimization criterion is represented in the form of an integral-type functional, which displays undesirable properties of the system; for this reason its value is reduced to a minimum. The solution of the task lies in functional dependences of the motion modes of separate links of the jib system at the starting section, which are represented in the graphic form. The obtained modes for slewing the jib system enable the elimination of vibrations of the load on a flexible suspension after the starting process, as well as the minimization of dynamic stresses in the driving gear and the metal structure of the crane. In addition, the optimal starting modes make it possible to increase the productivity and reliability of the crane operation. The most expedient duration of the starting process has been substantiated for the desired structural, kinematic and dynamic parameters of the jib system.*

The results obtained in this research may be used in future for specifying and updating the existing engineering methods of the calculation of the slewing gear of cranes with the load on a flexible suspension (rope) both at the designing/engineering stages, and in the modes of the real operation.

Key words: *jib/tower crane, turning mechanism, load, dynamic load, minimization, criterion, optimization, oscillation, elastic moment, speed*