

Determined experimental depending on influence of constructive and operating parameters mixer-cattle-feeder of stream type to process mixing and deliveries of forage mixtures. The analysis of influence of co-operations of factors is conducted on criterion of estimation of process.

Analysis, mixer-kormorazdavach, data-flow blending, experimental associations, fodder mixtures, constructive-regime parametres, criteria of marking.

УДК 631.520.2

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ СТРІЛОВОГО КРАНА ЗА КРИТЕРІЄМ СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ РУШІЙНОГО МОМЕНТУ

***В.С. Ловеїкін, доктор технічних наук
В.В. Мельніченко, аспірант****

В статті розглянуто спосіб усунення коливань вантажу під час роботи механізму повороту стрілових кранів. Оптимізація режиму пуску механізму повороту крана проводиться за допомогою методів варіаційного числення. В роботі використано критерій середньоквадратичного значення рушійного моменту приводу, котрий підлягає мінімізації. За керуючий параметр обрано зусилля, яке діє на механізм повороту зі сторони приводного механізму.

Колівання вантажу, оптимізація, перехідний режим руху.

Постановка проблеми. Відомо [5], що при роботі стрілових кранів спостерігаються маятникові коливання вантажу, котрі викликають нерівномірний рух ланок механізмів, створюють додаткові навантаження на силові елементи, що знижує їхню надійність і приводить до незручностей при їх експлуатації, а також збільшують ризик виникнення аварійних ситуацій.

Вирішення проблеми зменшення коливань вантажу на гнучкому підвісі забезпечить більш ефективну експлуатацію кранового обладнання.

Аналіз останніх досліджень. Проблемі усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі вже декілька десятків років. Останні дослідження, присвячені даній проблемі, ґрунтуються на

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

використанні математичних теорій оптимальних процесів (принцип максимуму, варіаційне числення). Зауважимо, що сучасні способи усунення коливань вантажу пропонується реалізовувати з допомогою певної керуючої дії на механізм повороту під час перехідних режимів руху (розгін, гальмування).

В роботах [1, 2, 8] за керуючий параметр обрано силову дію на привідний механізм: для усунення коливань вантажу необхідно керувати моментом на валу електродвигуна механізму повороту. Керуюча дія має релейний характер, що призводить до додаткових динамічних навантажень на кран. Цей підхід є неприйнятним з точки зору оптимальності.

За допомогою використання теорії варіаційного числення, як це зроблено в роботі [6], можна забезпечити плавну зміну кінематичних характеристик механізму повороту і усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі.

Мета досліджень. Метою дослідження є оптимізація режиму руху механізму повороту стрілового крана з вантажем під час перехідних процесів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- 1) обрати динамічну модель механізму повороту стрілового крана і на її основі побудувати математичну модель;
- 2) обрати критерій оптимізації режиму повороту крана встановити умови його мінімуму;
- 3) визначити оптимальний режим розгону механізму повороту і провести аналіз отриманих результатів.

Методика досліджень. Для проведення досліджень приймемо двомасову модель механізму повороту крана (рис. 1), побудова якої передбачає наступні припущення [3]:

- 1) підвішений вантаж подібний до вільно висячого маятника;
- 2) вагою тягового елемента нехтуємо;
- 3) припускаємо, що відцентрові коливання вантажу в порівнянні з радіальними є незначними і їх дію не враховуємо.

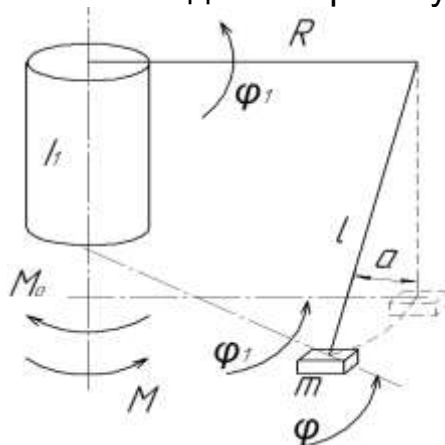


Рис. 1. Розрахункова модель системи «колона-вантаж».

Перераховані припущення при дослідженнях дають досить малу похибку, що підтверджується практичними дослідженнями [4].

Приведена розрахункова схема (рис. 1) описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 + \frac{mR^2}{l} g (\varphi_1 - \varphi) = M - M_0; \\ \ddot{\varphi} - \frac{g}{l} (\varphi_1 - \varphi) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де I_1 – момент інерції колони зведений до вісі повороту крана і приводного механізму; φ і φ_1 – узагальнені кутові координати зведених мас відповідно вантажу та колони; m – маса вантажу; R – виліт стріли; l – довжина гнучкого підвісу вантажу; g – прискорення вільного падіння; M_0 – статичний момент сил опору, зведений до осі повороту колони; M – рушійний момент на валу електродвигуна, зведений до осі повороту колони; α – кут відхилення вантажного каната від вертикалі. З другого рівняння системи (1) знаходимо:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi + \frac{l}{g} \ddot{\varphi}; \\ \dot{\varphi}_1 &= \dot{\varphi} + \frac{l}{g} \ddot{\varphi}; \\ \ddot{\varphi}_1 &= \ddot{\varphi} + \frac{l}{g} \ddot{\varphi}. \end{aligned} \quad (2)$$

За критерій оптимізації процесу пуску приймемо середньоквадратичне значення рушійного моменту [6]:

$$I_M = \left(\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} M^2 dt \right)^{1/2} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $M = I_1 \ddot{\varphi}_1 + \frac{mR^2}{l} g (\varphi_1 - \varphi) + M_0 = I_1 \left(\ddot{\varphi} + \frac{l}{g} \ddot{\varphi} \right) + \frac{mR^2}{l} g \cdot \frac{l}{g} \ddot{\varphi} + M_0$;

$$M^2 = \left[I_1 \frac{l}{g} \ddot{\varphi} + \ddot{\varphi} (I_1 + mR^2) + M_0 \right]^2. \quad (4)$$

Умова мінімуму критерію (3) визначається із рівняння Ейлера-Пуассона[9]:

$$\frac{dM^2}{d\varphi} - \frac{d}{dt^2} \frac{dM^2}{d\dot{\varphi}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{dM^2}{d\ddot{\varphi}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{dM^2}{d\ddot{\varphi}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{dM^2}{d\varphi} = 0, \quad (5)$$

яке в даному випадку запишеться таким чином:

$$\frac{d^4}{d\varphi^4} \varphi + 2 \frac{I_1 + mR^2}{I_1 \frac{l}{g}} \frac{d^2}{d\varphi^2} \varphi + \left(\frac{I_1 + mR^2}{I_1 \frac{l}{g}} \right)^2 \varphi = 0. \quad (6)$$

Введемо наступну заміну для частоти власних коливань прийнятої моделі механізму повороту крана:

$$k = \sqrt{\frac{I_1 + mR^2}{I_1 \frac{l}{g}}}. \quad (7)$$

В результаті чого отримаємо диференціальне рівняння, яке відповідає мінімуму критерію (3) з урахуванням виразу (4):

$$\overset{VIII}{\varphi} + 2k^2 \overset{VI}{\varphi} + k \overset{IV}{\varphi} = 0. \quad (8)$$

Для розв'язування отриманого диференціального рівняння зручно використати програму Wolfram Mathematica v.8, яка дозволяє шукати символічні розв'язки диференціальних рівнянь [3].

Розглянемо процес пуску механізму повороту крана і задамо крайові умови для цього процесу:

$$\begin{cases} t = 0; \varphi_1 = \varphi = 0; \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi} = 0; \\ t = t_1; \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi} = \omega_y; \ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Виразимо крайові умови φ_1 , $\dot{\varphi}_1$, $\ddot{\varphi}_1$ через координату φ та її похідні. Для цього скористаємось залежностями (2). Після перетворень отримуємо кінцеві крайові умови пуску, виражені через координату φ та її похідні:

$$\begin{aligned} t = 0; \varphi = 0; \dot{\varphi} = 0; \ddot{\varphi} = 0; \overset{IV}{\ddot{\varphi}} = 0; \\ t = t_1; \dot{\varphi} = \omega_y; \ddot{\varphi} = 0; \overset{IV}{\ddot{\varphi}} = 0; \varphi = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

В результаті розв'язку диференціального рівняння (8) для крайових умов пуску механізму повороту (10) і його конструктивних, кінематичних і динамічних параметрів: $J_1=7200 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $m=600\text{кг}$; $R=2,5\text{м}$; $l=4\text{м}$; $g=9,8 \text{ м/с}^2$; $M_0=47 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\omega_{\dot{\varphi}_1} = 0.32\text{рад/с}$; $t_1=1,9 \text{ с}$.- час розгону, який відповідає часу розгону на природній механічній характеристиці, побудовані графіки кінематичних характеристик пуску колони і вантажу (рис. 2 – рис. 5).

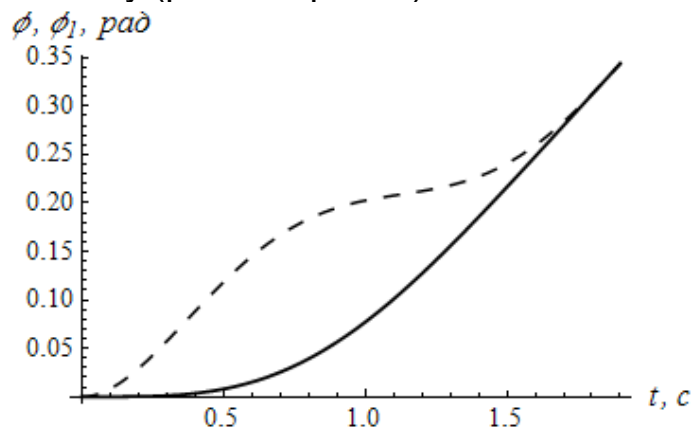


Рис. 2. Графіки функцій переміщення колони φ_1 і вантажу φ .

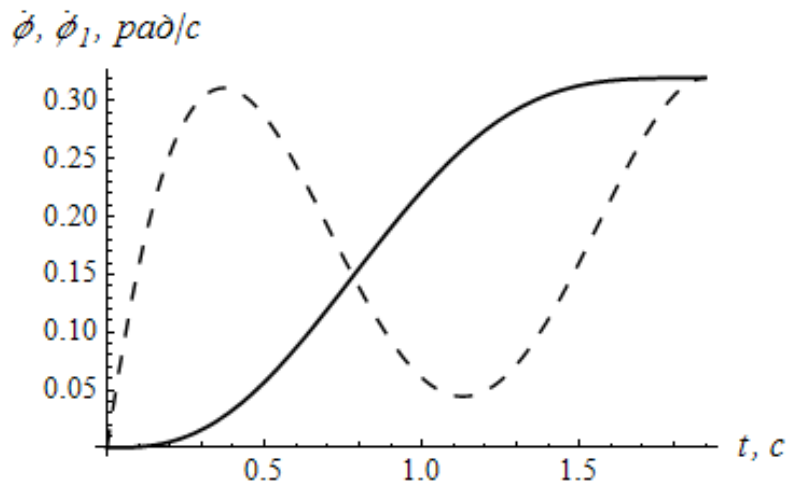


Рис. 3. Графіки функцій швидкості колони ϕ_1 і вантажу ϕ .

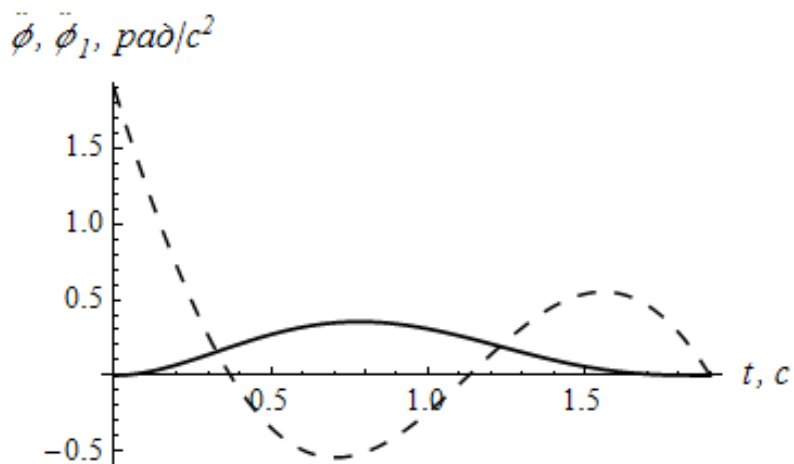


Рис. 4. Графіки функцій прискорення колони ϕ_1 і вантажу ϕ .

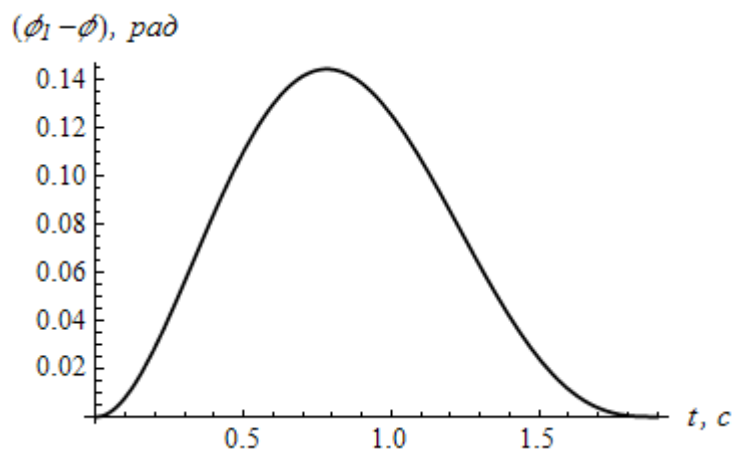


Рис. 5. Графік функції кута відхилення гнучкого підвісу вантажу від вертикалі.

Суцільними лініями зображені кінематичні характеристики руху вантажу, а штриховими лініями зображені кінематичні характеристики руху колони крана.

На рис. 6 – рис. 9 зображені графіки отриманих кінематичних характеристик колони і вантажу за час t_1 ($t_1 = \frac{2\pi}{k} = 3,25$ с. – час пуску, який дорівнює періоду власних коливань вантажу на гнучкому підвісі). Суцільними лініями зображені кінематичні характеристики руху вантажу, а штриховими лініями зображені кінематичні характеристики руху колони крана.

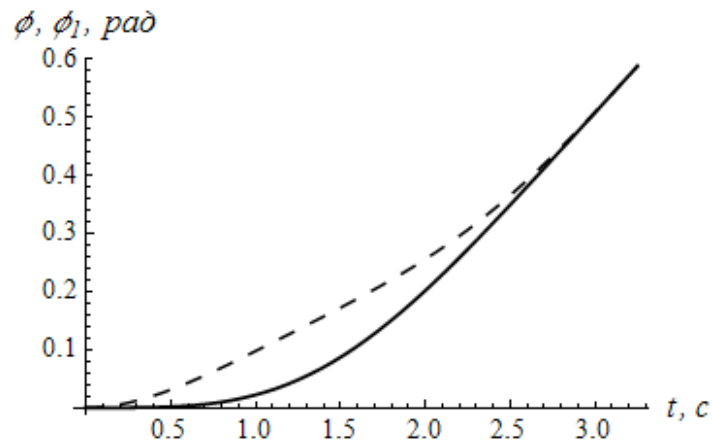


Рис. 6. Графіки функцій переміщення колони ϕ_1 і вантажу ϕ .

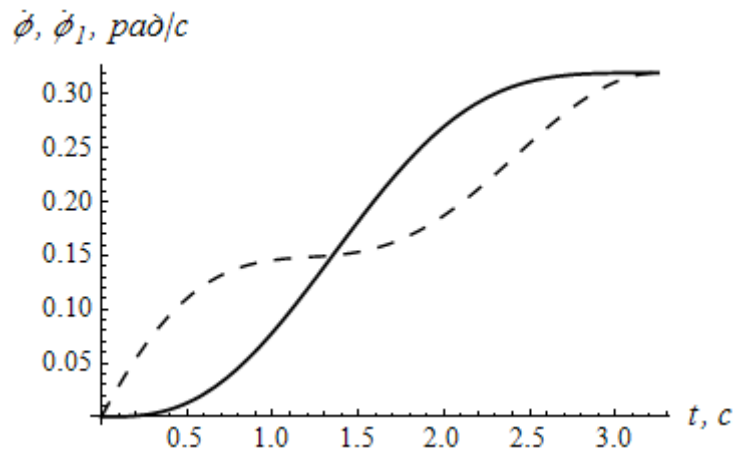


Рис. 7. Графіки функцій швидкості колони ϕ_1 і вантажу ϕ .

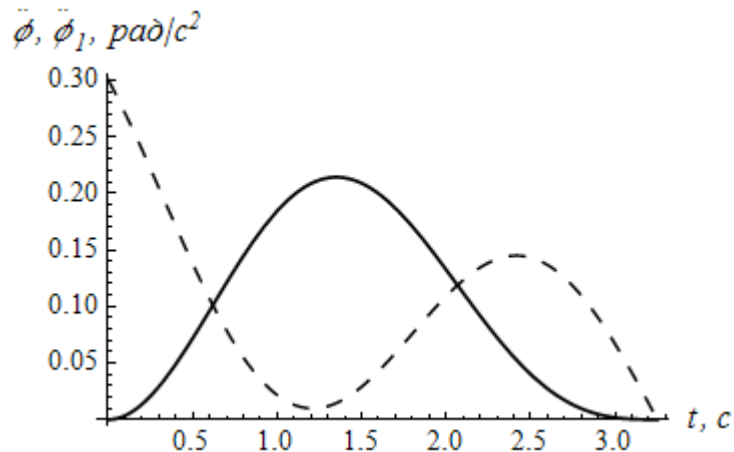


Рис. 8. Графіки функцій прискорення колони ϕ_1 і вантажу ϕ .

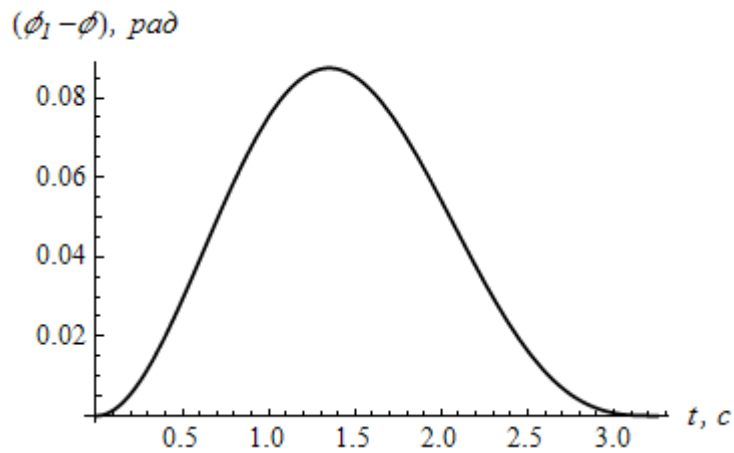


Рис. 9. Графік функції кута відхилення гнучкого підвісу вантажу від вертикалі.

Крім того, на рис. 10 зображено графіки зміни рушійного моменту при $t_1=1,9$ с. (суцільна крива) і $t_1=3,25$ с. (штрихова лінія).

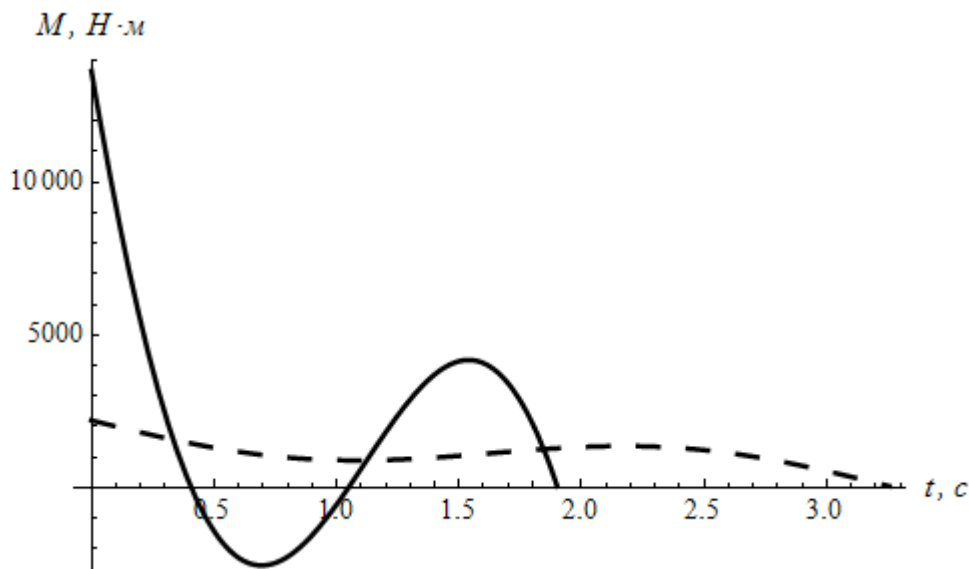


Рис.10. Графік рушійного моменту: ----- при $t_1=3.25$ сек, — при $t_1=1.9$ с.

Проаналізуємо отримані графіки кінематичних характеристик при тривалості пуску $t_1=1,9$ с (рис. 2 – рис. 5) та тривалості пуску $t_1=3,25$ с (рис. 6 – рис. 9). З графіків переміщень колони і вантажу (рис. 2 і рис. 6) видно, що в першому випадку усталений рух механізму повороту починається з координат $\varphi_1=\varphi=0,35$ рад, а в другому $\varphi_1=\varphi=0,6$ рад, що вказує на переваги першого режиму пуску в порівнянні з другим. При цьому максимальне відхилення координат $\varphi_1-\varphi$ в першому випадку становить 0,14 рад, а в другому 0,084 рад. Цей показник вказує на перевагу другого режиму пуску. З графіків кутових швидкостей (рис. 3 і рис. 7) можна побачити, що

зміна швидкості повороту колони є досить плавною як в першому, так і в другому випадках процесу пуску. Однак, швидкість повороту вантажу в першому випадку має значну амплітуду коливань (рис. 3), чого не можна сказати про другий режим пуску (рис. 9). Тут мають місце коливання вантажу, але вони незначні в порівнянні з першим режимом пуску.

Аналогічна картина спостерігається при порівнянні прискорень повороту стріли і вантажу (рис. 4 і рис. 8). З цих графіків видно, що прискорення стріли як в першому, так і в другому режимах пуску змінюються досить плавно і їхні максимальні значення не перевищують $0,3 \text{ рад/с}^2$. Разом з тим, характер зміни прискорень вантажу при першому та другому режимах пуску різний.

Якщо при першому режимі пуску прискорення вантажу приймають як додатні, так і від'ємні значення (має місце процес гальмування вантажу), то при другому режимі пуску прискорення приймають тільки додатні значення (процес пуску здійснюється без гальмування вантажу).

Більше того, при першому режимі пуску максимальне значення прискорення вантажу (рис. 4) досягає $\ddot{\varphi}_{\text{max}} = 1,9 \text{ рад/с}^2$, а при другому режимі пуску $\ddot{\varphi}_{\text{max}} = 1,9 \text{ рад/с}^2$ (рис. 8). Це дало можливість при другому режимі пуску значно зменшити максимальне значення рушійного моменту (рис. 10) $M_{\text{max}}=210 \text{ Нм}$ в порівнянні з першим режимом $M_{\text{max}}=13600 \text{ Нм}$.

Таким чином, використання оптимального за критерієм середньоквадратичного значення рушійного моменту режиму пуску механізму повороту стрілового крана при тривалості пуску рівному періоду власних коливань вантажу дає можливість значно зменшити дію динамічних навантажень і енергетичних витрат в порівнянні з іншим оптимальним режимом за цим же критерієм, але при іншій тривалості пуску.

На рис. 11 показано тривимірний фазовий портрет для оптимальних режимів пуску тривалістю 1,9 с (відповідає тривалості пуску на природній механічній характеристиці, зображено суцільною лінією) та тривалістю 3,25 с (відповідає періоду власних коливань вантажу на гнучкому підвісі, зображено штриховою лінією).

З отриманих фазових портретів видно, що в першому та другому випадках процесу пуску до початку усталеного руху коливання вантажу усуваються. Однак в першому випадку мають місце значно більші відхилення швидкостей та прискорень повороту колони та вантажу в порівнянні з другим випадком процесу пуску. Разом з тим, в першому випадку менша тривалість розгону, що дає можливість підвищити продуктивність роботи крана за рахунок зменшення тривалості всього циклу роботи механізму повороту.

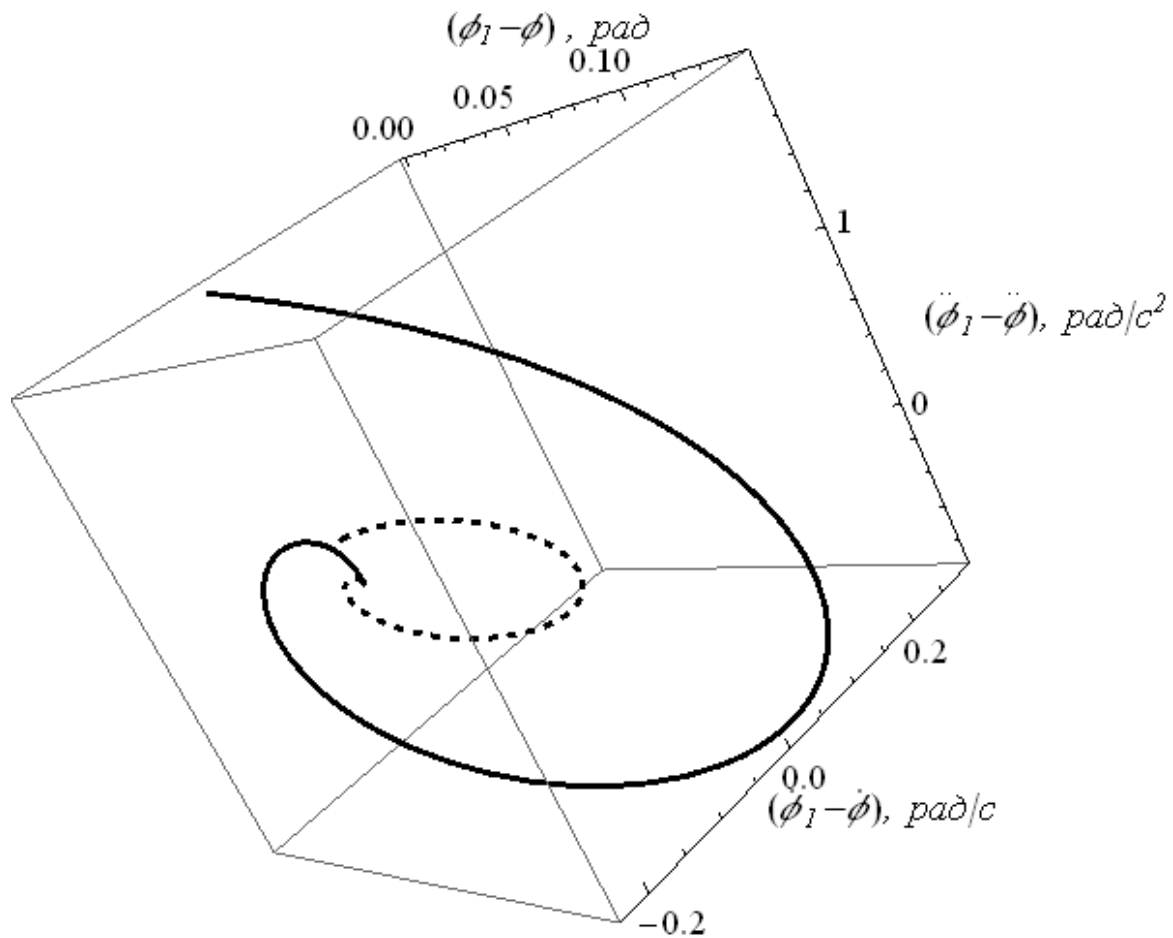


Рис. 11. Фазовий тримірний динамічний портрет системи «колона-вантаж» ----- при $T=3,25$ с, — при $T=1,9$ с.

Висновки

Результати проведених досліджень дають змогу зробити наступні висновки:

- вирішення задачі усунення коливань на гнучкому підвісі шляхом використання варіаційного числення є виправданим, оскільки знайдена керуюча дія на механізм повороту задовольняє поставлені задачі;
- використання обраного критерію оптимальності руху механізма повороту дає змогу отримати закони керування, які забезпечують усунення коливань вантажу та покращують перехідні режими його руху;
- для здійснення керування системою «колона-вантаж» необхідно обрати привідне зусилля, на яке накладаються певні обмеження;
- реалізувати отримані оптимальні закони руху можна шляхом використання автоматизованої системи керування механізмом повороту.

Список літератури

1. Герасимьяк Р.П. Электроприводы крановых механизмов / Герасимьяк Р.П., Параил В.А. – М.: Энергия, 1970. – 136 с.
2. Григоров О.В. Вантажопідйомні машини: навч. посібник / О.В. Григоров, Н.О. Петренко. – Х.: НТУ „ХПІ”, 2006. – 304 с.
3. Дьяконов В.П. Mathematica 4.1/4.2/5.0 в математических и научно-технических расчетах / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 696 с.
4. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин / М.С. Комаров. – М.: Машиностроение, 1953. – 187 с.
5. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
6. Ловейкин В.С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / В.С. Ловейкин. – К.: УМК ВО, 1990. – 168 с.
7. Ловейкін В.С. Оптимізація перехідних режимів руху механізму пересування візка вантажопідйомних машин / Ловейкін В.С., Ярошенко В.Ф., Ромасевич Ю.О. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х., 2007. – №59, т. 2. – С. 452–460.
8. Смехов А.А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А. Смехов, Н.И. Ерофеев. – М.: Машиностроение, 1975. – 239 с.
9. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1969. – 424 с.

В статье рассмотрены способы устранения колебаний груза при работе подъемно-транспортных машин. Оптимизация режима пуска механизма поворота крана производится с помощью вариационного исчисления. Использовано критерий среднеквадратического значения движущего момента, который подлежит минимизации. В качестве управляющего параметра выбрано усилие, которое действует на механизм поворота со стороны приводного механизма.

Колебания груза, оптимизация, переходный режим движения.

The paper deals with how to eliminate vibrations when working cargo handling machines. Optimization of start slewing crane is performed using variational calculus. Used criterion rms driving torque that is to be minimized. As control parameter selected force, which acts on part of mechanism turn actuator.

Fluctuations of cargo, optimization, connecting mode of motion.