

УДК: 681.508

Ловейкін В.С., д.т.н.; Лимар П.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування
України

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РУХУ ТРИМАСОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА ЗА КОМПЛЕКСНИМ КРИТЕРІЄМ

***Анотація.** В статті розглянуто тримасову розрахункову модель крана з захватом і вантажем, у вигляді рухомого подвійного математичного маятника. Для даної моделі розв'язана оптимізаційна задача за комплексним критерієм, який мінімізує динамічне зусилля, що діє на візок і усуває коливання вантажу відносно вертикалі візка. Для оптимізації режиму руху тримасової системи за обраним комплексним критерієм використовуємо прямий варіаційний метод. Побудовані графіки кінематичних характеристик узагальнених координат та динамічного зусилля на візку.*

***Аннотация.** В статье рассмотрена трёхмассовая расчётная модель крана с захватом и грузом, в виде подвижного двойного математического маятника. Для данной модели решена оптимизационная задача по комплексному критерию, который минимизирует динамическое усилие, действующее на тележку, и устраняет колебания груза относительно вертикали тележки. Для оптимизации режима движения трёхмассовой системы по выбранному комплексному критерию используем прямой вариационный метод. Построены графики кинематических характеристик обобщённых координат и динамического усилия на тележке.*

***Abstrakt.** Der Artikel beschreibt Dreimassen Berechnungsmodell des Krans mit der Erfassung und Last in Form von Rolldoppel mathematischen Pendels. Für dieses Modell wird das Optimierungsproblem durch einem komplexen Kriterium, das die dynamischen Kräfte, die auf die Laufkatze minimiert wird, und hat die vertikale Oszillation der Ladung relativ Laufkatze abgestellt. Für Optimierung den Bewegungszustand des Dreimassensystem, mit ausgewählten komplexe Kriterien hat direkten Variationsmethode genutzt. Die Graphen der kinematischen Eigenschaften in generalisierten Koordinaten und dynamische Kraft, die auf die Laufkatze beeinflussen haben geplottet.*

Постановка проблеми.

Експлуатацію вантажопідійомних кранів можна розділити на п'ять кроків: захоплення, підйом, переміщення вантажу з однієї точки в іншу, опускання, і розвантаження.

Горизонтальне переміщення вантажу з однієї точки в іншу є найбільш трудомісткою операцією і вимагає вмілої роботи оператора для її виконання.

В процесі роботи крана, візок з підвішеним на гнучкому підвісі вантажем здійснює постійні переміщення вздовж несучої ферми та консолей. Процес переміщення візка включає в себе розгін, переміщення з номінальною швидкістю та гальмування. Такі перехідні режими викликають значні динамічні навантаження в механізмі приводу візка і крана в цілому, що впливає на надійність і довговічність, а розгойдування вантажу на продуктивність і ергономічність роботи.

Особливості роботи кранів, наприклад, на складах лісоматеріалів характеризуються тим, що пачки хлестів або дерев не симетричні і відрізняються один від одного довжиною, збіжністю стовбурів, густотою крони і т. д. Внаслідок цього центр ваги у різних пачок розташований не однаково, тому при роботі крана може виникнути перекоє пачки у вертикальній площині [1].

Такі перекоє вантажу негативно впливають на процес перевантаження, оскільки викликають додаткові коливання, вантаж розгойдується та ускладнюється його переміщення. В такому випадку робота кранівника ускладнюється і вимагає великого досвіду керування крановим візком, щоб згасити або компенсувати ці коливання. Також при нерівномірному русі кранів і вантажних візків спостерігаються маятникові коливання вантажу, які викликають додаткові навантаження на силові елементи кранів та створюють значні незручності при їх роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблеми керування кранами спонукали багатьох дослідників розвивати алгоритми управління для автоматизації їх роботи. Тим не менш, більшість існуючих схем не придатні для практичної реалізації. Таким чином, більшість промислових кранів не автоматизовані і досі залежать від роботи операторів, які іноді не можуть компенсувати коливання вантажу. Алгоритми управління повинні задовольняти існуючим умовам роботи. В роботі [2] представлено детальний огляд управління краном.

В роботах Смахова А.О. і Єрофєєва М.І. [3] обґрунтовано параметри управління та критерії оптимальності, розглянуто способи побудови і зміст математичних моделей і принципи оптимізації параметрів підйомно-транспортних машин. Для усунення коливань вантажу ними запропоновано використати принцип максимуму Л.С. Понтрягіна.

Місюра В.П. та Васильченко І.Н. [4] отримали закон зміни рушійного зусилля, при якому коливання вантажу усуваються.

Оскільки коливання вантажу викликані прискоренням руху візка тому, багато дослідників зосередились на створенні траєкторій, які переміщують вантаж в найкоротший час і зводять коливання до мінімуму. Отримані траєкторії одержані як правило, з використанням методів оптимізації.

Цільова функція може містити час переміщення [5], вплив керування [6] або кут відхилення [7]. Ще один важливий метод використовуються для зменшення траєкторій, який складається з послідовності імпульсів прискорення і гальмування. Ці імпульси генеруються таким чином, що усуваються залишкові коливання в кінці операції переміщення [8, 9]. В роботах [10, 11], досліджувалось оптимальне управління через зворотній зв'язок.

Разом з тим в задачах оптимізації роботи кранів не було приділено уваги кранам, що перевантажують вантажі зі зміщеним центром мас відносно захвата.

Постановка мети та задач дослідження.

Виходячи з аналізу останніх публікацій, для вирішення існуючої проблеми, постає завдання розв'язання оптимізаційної задачі руху тримасової системи крана, яка складається з візка, захватного пристрою і вантажу. Для вирішення даної оптимізаційної задачі доцільно використати комплексний критерій, який містить динамічну і кінематичну складову.

Виклад основного матеріалу.

В якості розрахункової моделі крана для довгомірних вантажів [12] обрано модель рухомого подвійного математичного маятника (Рис. 1). В ньому за узагальнені координати обрані лінійні координати x_1 (візка), x_2 (захватного пристрою), x_3 (центра мас вантажу), їх маси m_1, m_2, m_3 відповідно, L і S – довжини ланок, F_p – рушійне зусилля, F_o – сила опору переміщення візка.

У відповідності до розрахункової моделі опишемо рух представленого подвійного маятника (1) за допомогою методу Даламбера та запишемо відомі диференціальні рівняння руху мас. Оскільки захватний пристрій з вантажем має пружний зв'язок, то при записі їх рівняння руху необхідно врахувати жорсткість c .

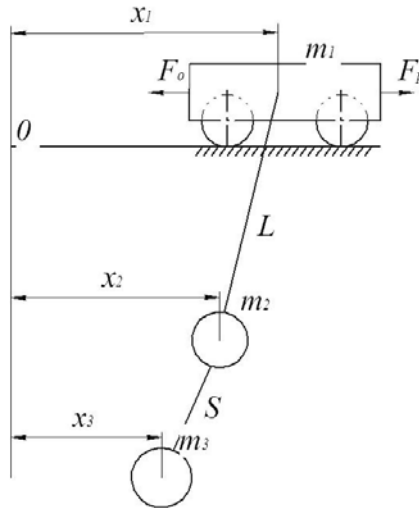


Рисунок 1 – Розрахункова динамічна модель подвійного маятника

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \frac{g}{L} (x_1 - x_2) = F_p - F_o; \\ m_2 \ddot{x}_2 - m_2 \frac{g}{L} (x_1 - x_2) + \left(m_3 \frac{g}{S} + c \right) (x_2 - (x_3 - x_0)) = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 - \left(m_3 \frac{g}{S} + c \right) (x_2 - (x_3 - x_0)) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

Для оптимізації режимів руху за кількома критеріями одночасно використовується комплексний критерій, який містить окремі критерії [3]. В даних дослідженнях використаємо інтегральний критерій, в якому динамічна складова дасть змогу мінімізувати динамічні навантаження у механізмі приводу візка, а кінематична – відхилення зосередженої маси колод від вертикалі візка:

$$I = \int_0^T \left(\frac{(m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \frac{g}{L} (x_1 - x_2))^2}{F_m} \sigma_1 + \frac{(x_1 - x_3)^2}{x_m} \sigma_2 \right) dt \rightarrow \min \quad (2)$$

де σ_1 і σ_2 – безрозмірні вагові коефіцієнти, які враховують частку того чи іншого критерію; F_m – мінімальне можливе значення зусилля; x_m – мінімальне можливе значення відхилення вантажу.

З системи (1) виразимо x_1 , x_2 , знайдемо \ddot{x}_1 через x_3 та отримаємо:

$$x_1 = \frac{1}{g^2 m_1} (-g^2 m_1 x_0 + g^2 m_1 x_3 + g S m_1 \ddot{x}_3 + g L m_2 \ddot{x}_3 + L S m_1 x_3) \quad (3)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{g^2 m_1} (g^2 m_1 \ddot{x}_3 + g S m_1 x_3 + g L m_1 x_3 + g L m_2 x_3 + S L m_1 x_3) \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{-g x_0 + g x_3 + S \ddot{x}_3}{g} \quad (5)$$

Підставивши вирази (3), (4) і (5) в інтегральний функціонал (2) отримаємо:

$$I = \int_0^{t_1} (m_1 (\frac{1}{g^2 m_1} (g^2 m_1 \ddot{x}_3 + g S m_1 x_3 + g L m_1 x_3 + g L m_2 x_3 + S L m_1 x_3)) + m_2 \frac{g}{L} (\frac{1}{g^2 m_1} (-g^2 m_1 x_0 + g^2 m_1 x_3 + g S m_1 \ddot{x}_3 + g L m_2 \ddot{x}_3 + L S m_1 x) - \frac{-g x_0 + g x_3 + S \ddot{x}_3}{g}))^2 \sigma_1 + (\frac{1}{g^2 m_1} (-g^2 m_1 x_0 + g^2 m_1 x_3 + g S m_1 \ddot{x}_3 + g L m_2 \ddot{x}_3 + L S m_1 x) - x_3)^2 \sigma_2 dt \rightarrow \min . \quad (6)$$

Для оптимізації режиму руху тримасової системи за обраним комплексним критерієм використаємо прямий варіаційний метод. Для цього розв'яжемо диференціальне рівняння п'ятнадцятого порядку:

$$x_3^{(15)} = 0, \quad (7)$$

Для знаходження потрібної функції з сімейства інтегральних кривих задамо крайові умови (8) у вигляді системи:

$$\begin{cases} x_3(0) = x_0, \dot{x}_3(0) = \dot{x}_3(0) = \ddot{x}_3(0) = \ddot{x}_3(0) = x_3^{(IV)}(0) = x_3^{(V)}(0) = x_3^{(VI)}(0) = 0; \\ x_3\left(\frac{T}{2}\right) = q_1; \\ x_3(T) = q_2, \dot{x}_3(T) = v, \ddot{x}_3(T) = \ddot{x}_3(T) = x_3^{(IV)}(T) = x_3^{(V)}(T) = x_3^{(VI)}(T) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Початкові умови задаються з таких міркувань, щоб на початку руху координата x_3 знаходилась у положенні x_0 , її швидкості і прискорення дорівнювали нулю. Кінцеві умови задамо такі, щоб при виході на усталений режим руху $\dot{x}_3(T) = v$ коливання вантажу усувались, кінцеве прискорення, а значить і динамічне зусилля дорівнювали нулю. Введемо ще додаткову умову в положенні $x_3(\frac{T}{2})$, де параметр q_1 використовується для мінімізації функціоналу.

Розв'язавши крайову задачу отримаємо функцію, яка є розв'язком рівняння (7) при крайових умовах (8) – функцію переміщення вантажу протягом процесу пуску візка та її вищі похідні за часом.

$$x_3 = \frac{1}{T^{14}}(-16384q_1t^7(t-T)^7 + (2t-T)(t^7(q_2(4096t^6 - 26162t^5T + 69932t^4T^2 - 100204t^3T^3 + 81246t^2T^4 - 35383tT^5 + 6476T^6) - (t-T)T \times (1586t^5 - 8492t^4T + 18284t^3T^2 - 19806t^2T^3 + 10807tT^4 - 2380T^5)v) + (t-T)^7(4096t^6 + 1586t^5T + 562t^4T^2 + 176t^3T^3 + 46t^2T^4 + 9tT^5 + T^6)x_0)). \tag{9}$$

Вищі похідні даної функції в описі не будемо приводити оскільки вони досить складні і громіздкі.

Дослідимо як буде змінюватись динамічне приводне зусилля (зусилля необхідне для приведення у рух мас візка, захвата і вантажу) при керуванні рухом візка за приведеним вище законом:

$$F = (m_1(\frac{I}{g^2m_1}(g^2m_1\ddot{x}_3 + gSm_1^{IV}x_3 + gLm_1^{IV}x_3 + gLm_2^{IV}x_3 + S^{VI}Lm_1x_3)) + m_2\frac{g}{L}(\frac{I}{g^2m_1}(-g^2m_1x_0 + g^2m_1x_3 + gSm_1\ddot{x}_3 + gLm_2\ddot{x}_3 + LSm_1^{IV}x) - \frac{-gx_0 + gx_3 + S\ddot{x}_3}{g}))^2 \tag{10}$$

Підставимо закон руху (10) та його відповідні похідні у підінтегральний вираз функціоналу (2) та знайдемо інтеграл. Функціонал перетворюється у складну функцію параметрів q_1 і q_2 . Для того, щоб мінімізувати значення інтегралу необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial q_1} = 0 \\ \frac{\partial I}{\partial q_2} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Розв'язавши цю систему рівнянь та підставивши знайдені q_1 і q_2 у функцію (10), отримаємо наближений розв'язок варіаційної задачі. Для знайдених значень критерію побудуємо графіки функції переміщення, швидкості та прискорення візка, захвата і вантажу (рис. 2) для наступних параметрів: $T=5\text{с}$, $v=1\text{м/с}$, $l=8\text{м}$, $s=1\text{ м}$, $\sigma_1=0,6$, $\sigma_2=0,4$, $x_0=0,98\text{м}$, $m_1=1600\text{кг}$, $m_2=4000$, $m_3=6000$, $J_{BC}=213333\text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_c=13906\text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

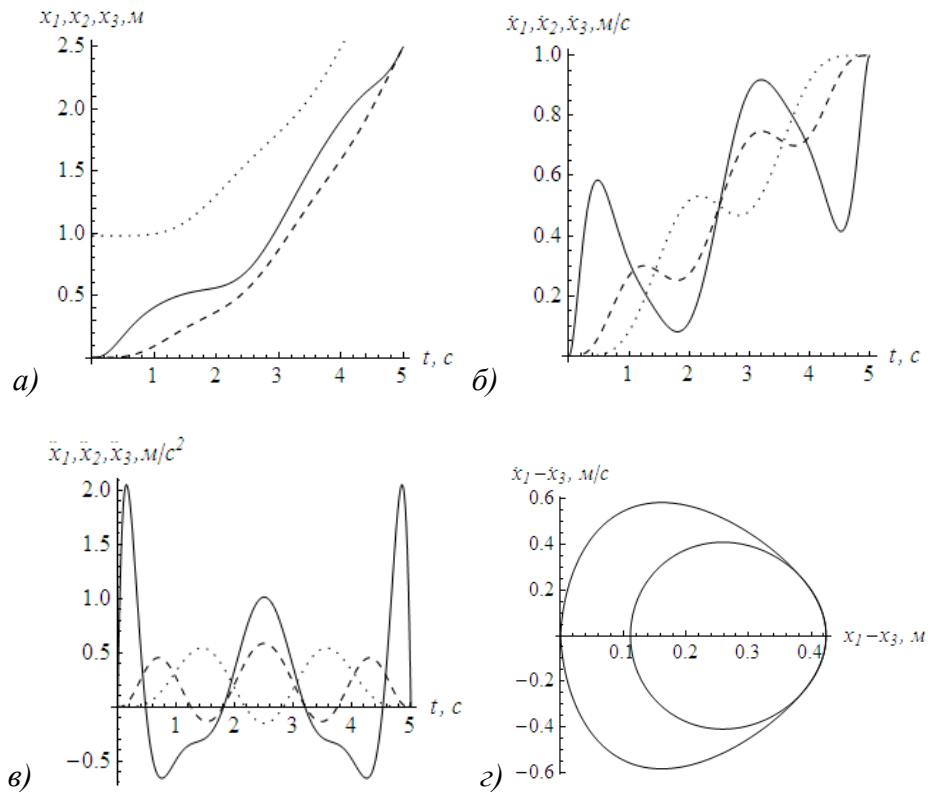


Рисунок – 2 Графіки функцій а) переміщення, б) швидкості, в) прискорення візка – —, захвата – ---, вантажу – і г) фазовий портрет руху візка

Також побудуємо графік приводного зусилля візка:

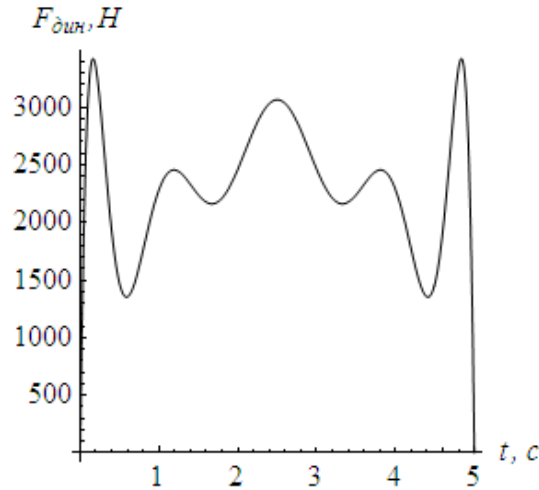


Рисунок – 3 Приводне зусилля, що діє на візок.

Аналізуючи графіки (рис. 2, 3) видно, що знайдений оптимальний закон руху тримасової системи можна реалізувати на практиці, крім того наприкінці перехідного режиму візок і вантаж будуть мати однакові швидкості. Це означає, що коливання вантажу будуть усунені. Як видно з графіку приводного зусилля візка, динамічне зусилля на початку і в кінці руху дорівнює нулю.

Висновки. Синтезовано оптимальний закон руху системи «візок – захват – вантаж» за комплексним критерієм, який дозволяє мінімізувати приводне зусилля, що діє на візок та відхилення вантажу від вертикалі візка. Застосування знайденого закону руху, при перевантаженні довгомірних вантажів, дасть змогу підвищити надійність та довговічність кранових механізмів та збільшити продуктивність роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ловейкін В. С. Динамічний аналіз переміщення візка вантажопідйомного крана зі зміщеним центром мас вантажу відносно захвату / Вячеслав Ловейкін, Петро Лимар // Науковий вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2014. – №1 (73). – с. 102 – 109.
2. Abdel-Rahman, E. M., Nayfeh, A. H., Masoud, Z. N.: Dynamics and Control of Cranes: A review, Journal of Vibration and Control, Vol. 9, No 7, pp. 863-909, 2003.
3. Смехов А.А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А. Смехов, Н.И. Ерофеев. – М.: Машиностроение, 1975. – 239 с.

4. Мисюра В. П. Уменьшение колебаний груза при автоматизированном режиме работы кранов-перегрузателей / В. П. Мисюра, И. Н. Васильченко // Механизация и автоматизация производства. – 1985. – № 11. – С. 22–24.
5. Manson G. A. Time-optimal control of an overhead crane model // Optimal Control Applications & Methods. 1982. Vol. 3. No. 2. P. 115–120.
6. Karihaloo, B. L. and Parbery, R. D., 1982, «Optimal control of dynamical system representing a gantry crane», Journal of Optimization Theory and Applications 36(3), 409–417
7. Sakawa, Y. and Shindo, Y., 1982, «Optimal control of container cranes», Automatica 18(3), 257–266.
8. Karnopp, B. H., Fisher, F. E., and Yoon, B. O., 1992, «A strategy for moving a mass from one point to another», Journal of the Franklin Institute 329(5), 881–892.
9. Singhose, W. E., Porter, L. J., and Seering, W. P., 1997, «Input shaped control of a planar crane with hoisting», in Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, NM, pp. 97–100.
10. Beeston, J. W., 1983, “Closed-loop time optimal control of a suspended load,” in Proceedings of the 4th IFAC World Congress, Warsaw, Poland, pp. 39–50
11. Ohnishi, E., Tsuboi, I., Egusa, T., and Uesugi, M., 1981, «Automatic control of an overhead crane», in Proceedings of IFAC 8th Triennial World Congress, Kyoto, Japan, pp. 1885–1890.
12. Лимар П. В. Обґрунтування динамічної моделі тримасової системи «візок-захват-вантаж» / П. В. Лимар // Збірник тез доповідей III-ї міжнародної конференції «Інноваційний розвиток аграрної сфери», 19 – 21 березня 2015р.: тези доповідей. – К., 2015. – С. 86-89.