

УДК 621.873

Методи оптимізації роботи вантажопідіймальних кранів

Коломієць Б.І., Неженцев О.Б.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Проаналізовано сучасні методи оптимізації роботи вантажопідіймальних кранів. Розглянуто методи оптимального керування рухом мостових кранів, що базуються на оптимальних законах регулювання, які дозволяють зменшити коливання вантажу та динамічні навантаження.

Ключові слова: вантажопідіймальні крани; методи оптимального керування; критерії оптимального керування; коливання вантажу; динамічні навантаження

Актуальність проблеми: Вантажопідіймальні крани є одними з найважливіших машин визначаючих ефективність роботи промисловості, будівництва, транспорту. Однією з ключових проблем є коливання вантажу на гнучкому підвісі, що значно знижує продуктивність, збільшує енергозатрати, створює небезпечні умови експлуатації та підвищує динамічні навантаження на конструкції крана. Для ефективного вирішення цієї проблеми запроваджуються сучасні підходи до керування рухом вантажопідіймальних кранів, що базуються на оптимальних законах регулювання, які дозволяють зменшити коливання вантажу та динамічні навантаження. Важливими інструментами для досягнення цих цілей є застосування інтелектуальних систем управління та частотнорегульованих приводів, що забезпечують точне й ефективне регулювання руху кранів, підвищують безпеку експлуатації.

Мета: Оцінити сучасні методи оптимізації роботи вантажопідіймальних кранів та визначити основні напрямки для подальших удосконалень.

У сучасних дослідженнях з оптимізації роботи вантажопідійомних кранів особливу увагу приділяють розробці систем керування, спрямованих на зменшення коливань вантажу під час пересування. Ця проблема має критичне значення для підвищення ефективності, безпеки та надійності роботи кранів. У представленому огляді розглянуто основні наукові досягнення, викладені у статтях [1 – 4], які зосереджені на методах оптимального керування рухом мостових кранів та аналізі динамічних навантажень.

В роботах [1, 2] запропоновано підхід до синтезу оптимального регулятора для системи «кран - вантаж». У першій частині [1] автори акцентують увагу на математичному моделюванні системи та визначенні основних характеристик динаміки крана, що впливають на коливання вантажу.

Динамічна модель, яка зображена на рис. 1, описується математичною моделлю [1]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = F - W; \\ x_1 = x_2 + \frac{l}{g} \ddot{x}_2, \end{cases} \quad (1)$$

Існує багато способів (керувань) переведення системи «кран - вантаж» із початкового у кінцевий стан. І основна сутність цього дослідження це, серед цієї множини необхідно обрати один, який би забезпечував мінімізацію критерію:

$$Int = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (F \cdot \dot{x}_1)^2 dt} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де P – потужність двигуна приводу крана.

Критерій (2) відображає витрати енергії під час розгону крана. Бажано, щоб витрати енергії були мінімальними – це дозволить підвищити енергоефективність його роботи.

У дослідженні [1] використовують обмеження на величину рушійного зусилля та швидкість його зміни в часі, а також на параметри реверсу крана.

Однією із головних вимог при синтезі оптимального регулятора є забезпечення стійкості руху системи. Дослідження стійкості регулювання руху системи «кран-вантаж» проводиться використовуючи модель (1). Для цього перетворена модель (1):

$$m_1 \left(\ddot{x}_2 + \frac{l}{g} \cdot \overset{IV}{\hat{\hat{x}}}_2 \right) + m_2 \cdot \ddot{x}_2 = F - W, \quad (3)$$

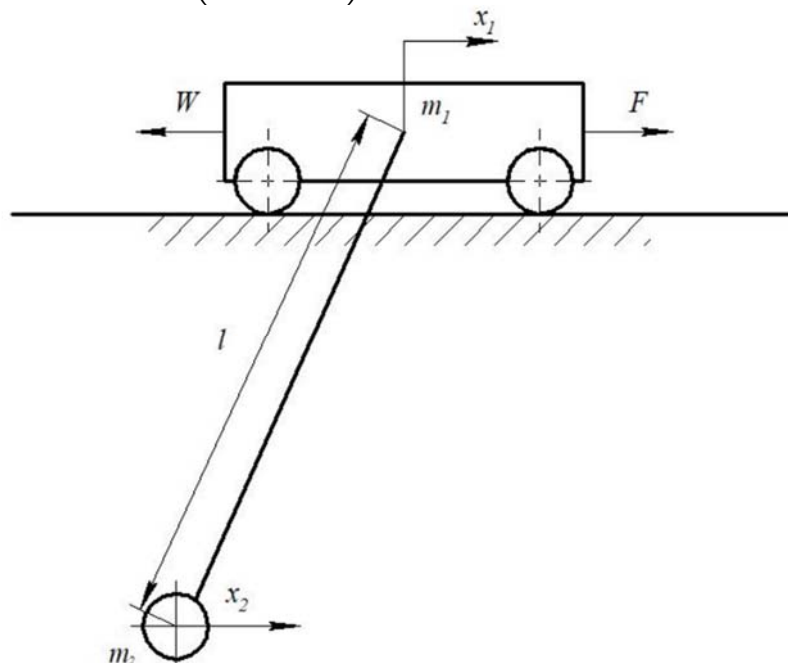


Рис. 1. Динамічна модель руху системи «кран-вантаж»

Після перетворення та спрощення рівняння (3) отримаємо:

$$\overset{IV}{\hat{\hat{x}}}_2 + \ddot{x}_2 \cdot \frac{m_1+m_2}{m_1} \cdot \frac{g}{l} = \frac{F-W}{m_1} \cdot \frac{g}{l}, \quad (4)$$

Математичну модель руху системи (4) представлено у наступному вигляді:

$$\ddot{y}_2 + \Omega^2 \cdot y_2 = u \Omega_0^2 \quad (5)$$

де $\Omega = \sqrt{\frac{m_1+m_2}{m_1} \cdot \frac{g}{l}}$ – частота коливань вантажу відносно рухомої точки підвісу; $\Omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ – частота коливань математичного маятника; $\hat{x}_2 = y_2$ (ця заміна дасть змогу понизити порядок рівняння (4) на одиницю); $u = \frac{F-W}{m_1}$ – функція регулювання руху системи.

Регулятор руху динамічної системи «кран-вантаж» представляється у такому вигляді:

$$u = (x_1 - x_2)K_1 + (V - \dot{x}_1) \cdot K_2 + (V - \dot{x}_2) \cdot K_3, \quad (6)$$

де K_1, K_2, K_3 – коефіцієнти регулятора, які необхідно визначити.

Для визначення коефіцієнтів K_1, K_2, K_3 з урахуванням стійкості руху системи «кран-вантаж» використано критерій стійкості Рауса-Гурвіца. В результаті аналізу при різних комбінаціях зведених мас вантажу, крана та довжини гнучкого підвісу вантажу було отримано такі значення меж пошуку цих коефіцієнтів [1]:

Таблиця

Значення меж пошуку коефіцієнтів K_1, K_2, K_3 регулятора, які забезпечують стійкість руху системи «кран-вантаж»

Параметр	Область пошуку значень
K_1	$-5 \cdot 10^6 \dots 0$
K_2	$0 \dots 5 \cdot 10^6$
K_3	$0 \dots 5 \cdot 10^6$

Отримані межі дають змогу виконати пошук коефіцієнтів регулятора при яких рух системи буде стійким з параметрами системи, що відповідають практиці експлуатації кранів.

У другій частині досліджень [2] основний акцент зроблено на реалізації оптимального регулятора за допомогою сучасних алгоритмів керування. Використання методів мінімізації енергетичних витрат та зменшення часу заспокоєння коливань дозволяє значно покращити продуктивність системи. Крім того, автори порівняли результати моделювання з експериментальними даними, що підтвердило ефективність запропонованого підходу.

Модель крана з вантажем представлена як система рівнянь у дискретній формі [2]:

$$\begin{cases} x_{2,i} = x_{2,i-1} + v_{2,i-1} \cdot \Delta t; \\ v_{2,i} = v_{2,i-1} + (x_{1,i-1} - x_{2,i-1}) \cdot \frac{g}{l} \cdot \Delta t; \\ x_{1,i} = x_{1,i-1} + v_{1,i-1} \cdot \Delta t; \\ v_{1,i} = v_{1,i-1} + \left(\frac{F_{i-1} - W}{m_1} - \frac{m_2}{m_1} (x_{1,i-1} - x_{2,i-1}) \cdot \frac{g}{l} \right) \cdot \Delta t, \end{cases} \quad (7)$$

де Δt – крок дискретизації часу; i - індекс, що пробігає значення від 1 до $\frac{T}{\Delta t}$, $i \in \left(1, \frac{T}{\Delta t}\right)$; T – тривалість розгону системи.

Запропоновано комплексний інтегрально-термінальний критерій:

$$Cr = Ter + Int_{\text{дис}} \quad (8)$$

де $Int \approx Int_{\text{дис}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\frac{T}{\Delta t}} (F_i \cdot v_{1,i})^2 \Delta t} \rightarrow \min$ – дискретний критерій оптимізації; Ter - термінальний критерій руху системи [2].

Параметри регулятора (K_1, K_2, K_3) визначаються за допомогою методу рою часток (ME-PSO). Критерій Cr має наперед задані бажані властивості, які можна оцінити на рис. 2.

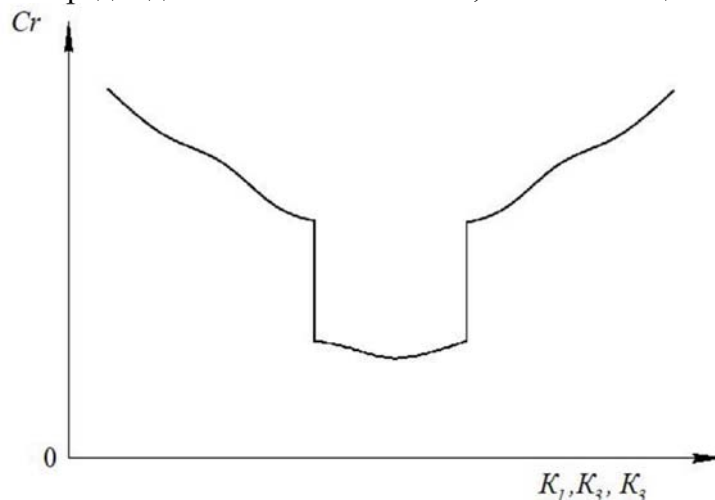


Рис. 2. Умовне зображення топології критерію Cr

У статті [3] представлена модель оптимального керування для мостового крана. Особливу увагу приділено врахуванню зовнішніх впливів, таких як вітрове навантаження та раптові зміни параметрів вантажу з використанням зворотного зв'язку для стабілізації коливань вантажу. Також автори пропонують використовувати адаптивні регулятори, які підлаштовуються до змін умов експлуатації.

Рух мостового крана описується тримасовою динамічною моделлю [3]. На рис. 3 через x_0 , x_1 позначені узагальнені координати, відповідно, зведених мас вантажу, приводу із кінцевими балками та моста крана з візком, а через l – довжина гнучкого підвісу вантажу.

Динамічна модель (рис. 3) описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 = F_p - W - c(x_0 - x_1); \\ m_1 \ddot{x}_1 = c(x_0 - x_1) - \frac{mg}{l}(x_1 - x); \\ \ddot{x} = \frac{g}{l}(x_1 - x). \end{cases} \quad (9)$$

Для усунення коливань вантажу в кінці розгону введено крайові умови [3]:

$$\begin{cases} t = 0; x = 0; \dot{x} = 0; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \overset{V}{\ddot{x}} = 0; \\ t = t_1; x = \frac{Vt}{2}; \dot{x} = V; \ddot{x} = 0; \overset{IV}{\ddot{x}} = 0; \overset{V}{\ddot{x}} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

де t – час; t_1 – тривалість процесу пуску крана; V – номінальна швидкість руху крана.

Крайові умови (10) дають змогу усунути коливання вантажу та пружні коливання мостової балки у кінці розгону крана. У якості критерію оптимізації прийнято середньоквадратичне значення інтенсивності зміни зусилля, що діє в мостовій балці крана:

$$I_F = \left\{ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} \left[m_1 \frac{l}{g} \overset{VI}{\ddot{x}} + (m_1 + m) \overset{IV}{\ddot{x}} \right]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Умовою мінімуму критерію (11) є рівняння Ейлера-Пуасона.

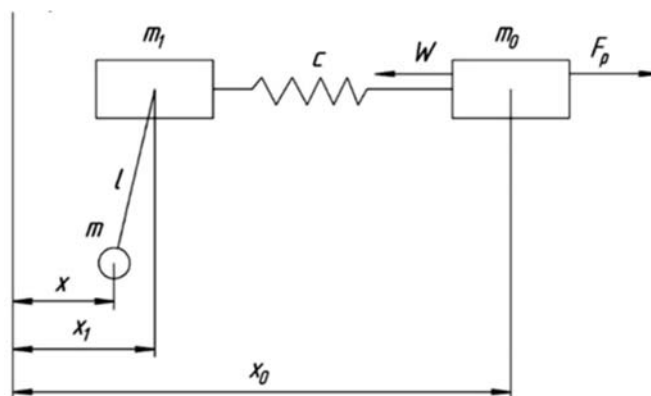


Рис. 3. Тримасова динамічна модель мостового крана

Для експериментальних досліджень системи використано:

1. Частотний перетворювач Mitsubishi FR-E740-060.
2. Мікроконтролерний пристрій для зворотного зв'язку, що включає тензOMETричні датчики для визначення маси вантажу та енкодери для вимірювання довжини підвісу.

У статті [4] описано два розроблені способи гальмування вантажопідіймних кранів, що дозволяють значно зменшити амплітуду коливань вантажу та динамічні навантаження. Перший спосіб полягає у поетапному гальмуванні електроприводом крану і механічним гальмом за виведеним законом. Другий спосіб полягає у вимірюванні поточної маси вантажу і введенні в роторне коло ротора двигуна відповідного опору для зменшення динамічних навантажень на металоконструкцію крана.

Висновки

1. Проведений аналіз підтверджує важливість розробки та впровадження нових методів управління для вантажопідійомних кранів. Використання інтелектуальних систем управління та частотнорегульованих приводів дозволяє суттєво знизити коливання вантажу та динамічні навантаження, підвищуючи безпеку та продуктивність кранів.

2. Визначення оптимальних параметрів регуляторів, таких як коефіцієнти керування K_1 , K_2 , K_3 , забезпечує стійкість руху та мінімізацію динамічних навантажень.

3. Моделювання і експериментальні дослідження підтвердили ефективність нових підходів до стабілізації коливань вантажу, врахування нелінійних динамічних характеристик та крайових умов. Це дає змогу застосовувати результати для модернізації існуючих механізмів і розробки нових систем управління.

4. Подальші дослідження повинні зосереджуватися на інтеграції сучасних алгоритмів оптимізації з мехатронними системами управління, що дозволить створювати більш економічні та надійні вантажопідійомні механізми для використання в різних галузях промисловості.

Список літератури

1. Ромасевич Ю.О., Синтез оптимального регулятора руху системи «кран-вантаж». Ч. 1 // Ловейкін В.С., Пилипенко А.П., Макарець В.В. // Підйомно-транспортна техніка №3 (64), 2020.
2. Ромасевич Ю.О., Синтез оптимального регулятора руху системи «кран-вантаж». Ч. 2 // Ловейкін В.С., Пилипенко А.П., Макарець В.В. // Підйомно-транспортна техніка №1 (65), 2021.
3. Ловейкін В.С., Система оптимального керування рухом мостового крана // Ромасевич Ю.О., Крушельницький В.В. // Підйомно-транспортна техніка №1 (60), 2019.
4. Неженцев О.Б. Оптимізація параметрів частотного керування при гальмуванні кранів мостового типу // Неженцев О.Б., Збітнев П.В. Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. - 2017, 176-181 с.

Methods for optimizing the operation of load-lift cranes

Kolomiets Bohdan, Nyezhentsev Oleksiy

Modern methods for optimizing the operation of cranes are analyzed. Methods for optimal control of the movement of bridge cranes based on optimal control laws that allow reducing cargo fluctuations and dynamic loads are considered.

Keywords: cranes; methods of optimal control; criteria of optimal control; cargo oscillations; dynamic loads