

## СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ МОДАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ КРАНОВИМ МЕХАНІЗМОМ ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ З ВРАХУВАННЯМ РОБОТИ ПІДЙІМАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ

О.І. Толочко<sup>1\*</sup>, докт.техн.наук, О.М. Рижков<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> – НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: [tolochko.ola@gmail.com](mailto:tolochko.ola@gmail.com)

<sup>2</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [o\\_ryzh@ied.org.ua](mailto:o_ryzh@ied.org.ua)

Для кранових механізмів поступального руху з вантажем, підвішеним на гнучкому канаті, синтезовано систему керування зі зворотним зв'язком за вектором стану повного порядку, що враховує зміну довжини каната при роботі підйомного пристрою. Для оцінки кута відхилення каната з вантажем від вертикалі та кутової швидкості цього переміщення синтезовано спостерігач стану Льюенбергера. Виконано аналіз розробленої системи модального керування методом математичного моделювання. Бібл. 4, рис. 5.

**Ключові слова:** модальне керування, кран, підйимальний механізм, спостерігач Льюенбергера.

**Постановка проблеми.** Підйомні крани, що призначені для переміщення важких вантажів з однієї заданої точки в іншу, широко використовуються на будівельних майданчиках, у портах, на промислових підприємствах. У процесі транспортування вантажу, підвішеного до органу переміщення на гнучкому канаті, виникають коливання вантажу, які призводять до збільшення динамічних навантажень на металеві конструкції, зносу каната, зниження продуктивності механізму, унеможливають точне позиціонування вантажу та створюють передумови для травм обслуговуючого персоналу. Тому усунення описаних коливань є актуальною задачею, вирішенню якої присвячено багато робіт, наприклад, [1-4].

При синтезі систем керування рухом кранових механізмів використовуються найрізноманітніші методи. Найбільш прості з них належать до класу розімкнутих систем і використовують алгоритми input-shaping [1], які формують серію прямокутних імпульсів визначеної амплітуди і тривалості для впливу на електропривод у заздалегідь обчислені моменти часу або попередньо розраховані тахограми, синтезовані в тому числі і з використанням методів оптимального керування [2]. Недоліком таких підходів є те, що вони розроблені для деякої фіксованої довжини каната, яка не змінює свого значення в процесі переміщення вантажу. Крім того, вони мають високу чутливість до сигнальних і параметричних збурень, таких як вітер і тертя, а також вимагають, щоб на момент початку переміщення відхилення каната від вертикалі було нульовим.

Синтез замкнених систем виконують лінійними методами, використовуючи лінеаризовані моделі об'єкта регулювання [3], нелінійними методами, які базуються на лінеаризації зворотним зв'язком з доведенням асимптотичної стійкості методом Ляпунова [4], методами нечіткого керування з використанням фазі-логіки і методами релейного керування з ковзними режимами (Sliding-mode Control). Для реалізації цих методів потрібна або веб-камера з пристроєм обробки відеозображень, або спостерігачі стану. При синтезі спостерігачів також використовують лінійні й нелінійні методи і ковзні режими. У деяких випадках застосовують двостадійне керування, коли на першому етапі здійснюється переміщення вантажу, а мінімізація його хитань відбувається в цільовій точці. Кожний метод має свої переваги і недоліки. При виборі методу демпфірування коливань вантажу бажано досягти мети керування без застосування дорогих датчиків та складних методів обробки інформації.

**Мета роботи** – синтезувати систему регулювання швидкості візка мостового крана, яка зможе ефективно гасити коливання підвішеного до нього на гнучкому канаті вантажу, з урахуванням зміни довжини каната без використання додаткових датчиків, що вимірюють кут відхилення вантажу від вертикалі та кутову швидкість коливань.

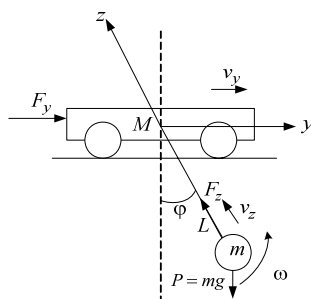


Рис. 1

**Матеріали і результати досліджень.** Як приклад механізму, що здійснює поступальне переміщення вантажу в горизонтальному і вертикальному напрямках, розглянемо візок мостового крана і розташований на ньому підйомний пристрій блочного типу. Схематичне зображення такої механічної системи показано на рис. 1, де використані такі позначення:  $s_y, v_y$  – лінійне переміщення і швидкість візка масою  $M$ ;  $F_y$  – зусилля, що виробляється приводними двигунами візка;  $\varphi, \omega$  – кут відхилення вантажу від вертикалі та його кутова швидкість відповідно;  $m$  – маса вантажу;  $L$  – довжина каната;  $v_z$  – швидкість підйому вантажу;  $F_z$  – зусилля, що виробляється приводом підйому вантажу,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Математичний опис рухів даної системи має вигляд [3]:

$$\begin{cases} \frac{dv_y(t)}{dt} = \frac{1}{M+m} \left[ F_y(t) + mL(t) \left( \frac{d\omega(t)}{dt} \cos\varphi(t) - L(t)\omega^2(t) \sin\varphi(t) + \frac{dv_z(t)}{dt} \sin\varphi(t) + 2v_z(t)\omega(t) \cos\varphi(t) \right) \right], \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{L(t)} \left[ \frac{dv_y(t)}{dt} \cos\varphi(t) + g \sin\varphi(t) + 2v_z(t)\omega(t) \right], \\ \frac{dv_z(t)}{dt} = \frac{F_z(t)}{m} + \frac{dv_y(t)}{dt} \sin\varphi(t) + L(t)\omega^2(t) + g \cos\varphi(t), \\ \frac{ds_y(t)}{dt} = v_y(t), \quad \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t), \quad \frac{dL(t)}{dt} = -v_z(t). \end{cases} \quad (1)$$

Відомо, що одним із способів гасіння пружних коливань у системах регулювання швидкості багатомасових електромеханічних об'єктів є використання систем зі зворотним зв'язком за вектором стану повного порядку, які часто називають системами модального керування (СМК). Спробуємо використати таку систему для гасіння коливань вантажу. Виконаємо синтез системи модального керування швидкістю візка. Для цього виключимо з системи (1) рівняння для похідних за швидкістю і переміщенням у вертикальному напрямку, а три рівняння, які залишилися, лінеаризуємо при загальноприйнятих припущеннях, справедливих для малих кутів відхилення вантажу і його кутової швидкості ( $\sin \varphi \approx \varphi$ ,  $\cos \varphi \approx 1$ ,  $\omega_2 \approx 0$ ) [2]

$$\begin{cases} (M+m) \frac{dv_y(t)}{dt} + mL(t) \frac{d\omega(t)}{dt} = F_y(t), \\ \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t), \\ \frac{dv_y(t)}{dt} + L(t) \frac{d\omega(t)}{dt} + g\varphi(t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Довжина каната, яка в рівняннях (2) є змінним параметром, може бути розрахована шляхом використання вихідного сигналу датчика положення в системі електроприводу підйомного пристрою. Для математичного опису об'єкта в просторі станів перетворимо перше і третє рівняння системи (2) у такий спосіб, щоб у кожному з них були присутні похідні тільки від одного з регульованих сигналів

$$\begin{cases} M \frac{dv_y(t)}{dt} = F_y(t) + mg\varphi(t), \\ \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t), \\ L(t) \frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{1}{M} F_y(t) - \frac{g(M+m)}{M} \varphi(t). \end{cases} \quad (3)$$

Із системи (3) отримуємо опис даного об'єкта регулювання у просторі станів

$$d\mathbf{X}(t)/dt = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}u(t), \quad s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}u(s), \quad (4)$$

$$u = F_y, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} v_y \\ \varphi \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{(M+m)g}{ML(t)} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \\ 0 \\ -\frac{1}{ML(t)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

На основі аналізу кінематики досліджуваного механічного комплексу та його математичного опису пропонується система керування, структурна схема якої показана на рис. 2, де *Crane* – математична модель крана відповідно до рівнянь (1), *Fz-Loop*, *Fy-Loop* – замкнуті контури регулювання зусиль, прикладених до канату і до візка, *Speed Controller* – ПІ-регулятор швидкості підйомного пристрою, *Reference Speed Generator* – задатчик інтенсивності систем управління візком (y) і підйомним пристроєм (z).

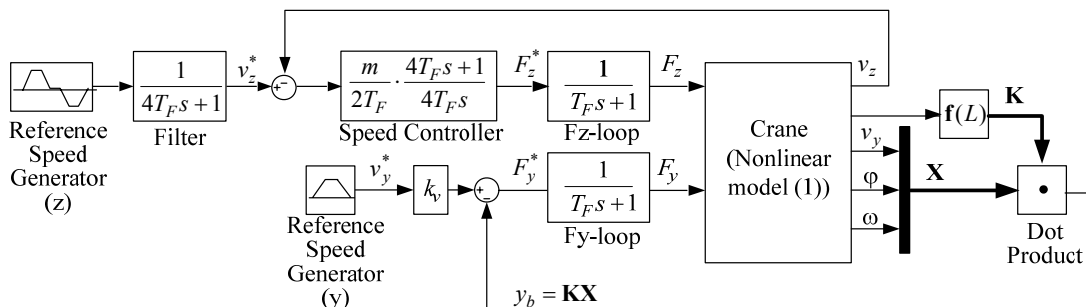


Рис. 2

Вектор коефіцієнтів зворотних зв'язків СМК  $\mathbf{K} = [k_v, k_\varphi, k_\omega]$  можна визначити розв'язанням рівняння

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}) = G(s), \quad (6)$$

де  $G(s) = s^3 + \Omega_0 \gamma_2 s^2 + \Omega_0^2 \gamma_1 s + \Omega_0^3$  – бажаний характеристичний поліном,  $\gamma_1, \gamma_2$  – його коефіцієнти,  $\Omega_0$  – середньгеометричний корінь (СГК), який визначає швидкодію замкнутої системи.

Вирази для коефіцієнтів регулятора стану, знайдені з рівняння (6) з урахуванням (5), мають вигляд

$$\mathbf{K} = \left[ \Omega_0^3 ML(t)/g, \quad g(M+m) - \Omega_0^2 \gamma_1 L(t)M, \quad -M\Omega_0 L(t)(\gamma_2 g - \Omega_0^2 L(t))/g \right]. \quad (7)$$

Застосуємо в рівнянні (6) поліном Бесселя, який має коефіцієнти  $\gamma_2 = 2.433, \gamma_1 = 2.466$ .

Результати моделювання системи рис. 2 при  $M=2000$  кг,  $m=4000$  кг,  $L_0=12$  м – початкова довжина каната,  $v_{y\max}=0.5$  м/с,  $T_f=0.002$  с,  $\Omega_0=1.9$  с<sup>-1</sup> представлені на рис. 3.

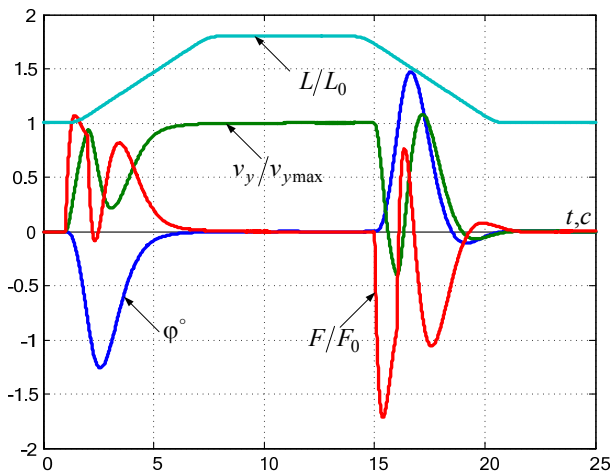


Рис. 3

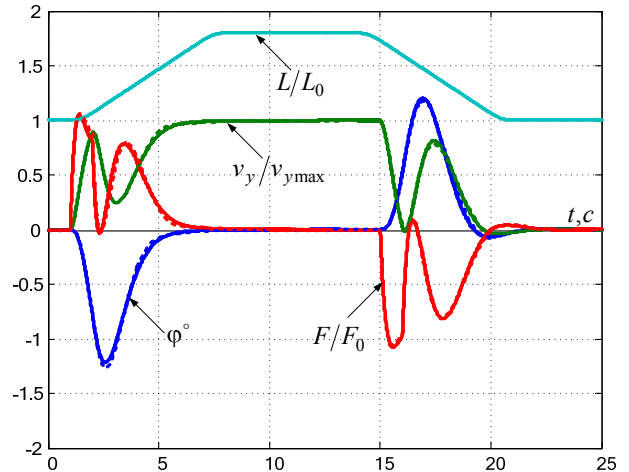


Рис. 4

З аналізу графіків рис. 3 видно, що при зменшенні довжини каната максимальні значення сили, що прикладаються до візка, та відхилення вантажу від вертикалі перевищують відповідні значення при збільшенні довжини. Це обумовлено зміною частоти власних коливань вантажу, яка пов'язана з довжиною каната квадратичною залежністю  $\Omega_b = \sqrt{g/L(t)}$ . Тому здійснимо адаптацію величини СГК  $\Omega_0$  до зміни частоти  $\Omega_b$  згідно з формулою

$$\Omega_{0v}(t) = \Omega_0 \cdot \sqrt{L_0/L(t)}. \quad (8)$$

Перехідні процеси у системі рис. 2 з варіацією СГК характеристичного полінома представлені на рис. 4 суцільними лініями. Як бачимо, завдяки запропонованій корекції, якість перехідних процесів при підйомі вантажу стала значно менше залежати від довжини каната. При реалізації синтезованої системи керування для визначення кута відхилення вантажу від вертикалі та його кутової швидкості необхідні або веб-камера із пристроєм обробки відеозображень, або акселерометр, сигнал якого при подвійному диференціюванні стає занадто зашумленим. До того ж застосування цих датчиків пов'язано з додатковими капітальними та експлуатаційними витратами. Більш економічним рішенням є відновлення перелічених вище сигналів за допомогою спостерігача стану.

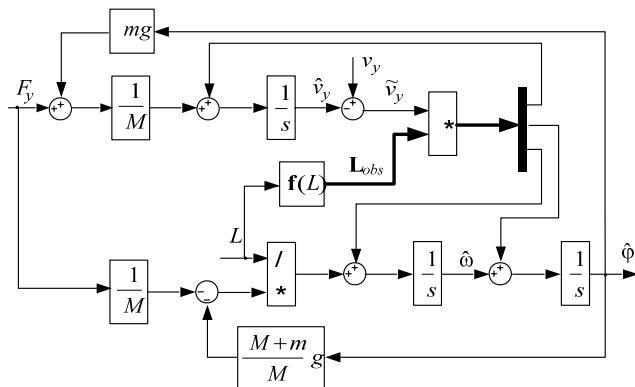


Рис. 5

З рівняння (9) знаходимо

$$\mathbf{L}_{obs} = \left[ \alpha_2 \Omega_{obs}, \quad \frac{L(t)M\alpha_3 \Omega_{obs}^2 - (M+m)g}{L(t)mg}, \quad -\frac{\alpha_2 g(M+m)\Omega_{obs} - L(t)M\Omega_{obs}^3}{L(t)mg} \right]^T. \quad (10)$$

Синтезуємо спостерігач стану (СС) Люенбергера, скориставшись математичним описом об'єкта регулювання у вигляді рівнянь (3), які справедливі при невеликих відхиленнях каната з вантажем від вертикалі і враховують зміну його довжини. Структурна схема такого спостерігача показана на рис. 5. Вектор коефіцієнтів коригувальних зв'язків спостерігача  $\mathbf{L}_{obs} = [l_1 \ l_2 \ l_3] = [l_v \ l_\phi \ l_\omega]$  можна визначити рішенням рівняння

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{L}_{obs}\mathbf{C}) = G(s), \quad (9)$$

де матриця виходу визначає змінну  $v_v$ , по якій здійснюється корекція НС:  $\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0]$ .

За наявності такого СС зворотні зв'язки за кутом відхилення вантажу від вертикалі і за кутовою швидкістю вантажу в системі рис. 2 можна замінити зворотними зв'язками за оцінками цих сигналів. Перехідні процеси в такій СМК при  $\Omega_{obs} = 2\Omega_0$  нанесені на рис. 4 пунктирними лініями. Як видно, вони практично не відрізняються від перехідних процесів у СМК рис. 2, замкнутій за вимірними сигналами.

Слід звернути увагу на те, що тахограма візка в розглянутій замкнутій системі, всупереч тому, що задатчик інтенсивності формує трапецеїдальну діаграму, автоматично набуває вигляду триетапної діаграми, тобто при розгоні має ділянку пригальмовування, а при гальмуванні – ділянку підрозгону.

Як відомо, триетапні тахограми руху вимагають попереднього розрахунку тривалості кожного з етапів тахограми. Будь-яке параметричне або сигнальне збурення (наприклад, початкове відхилення каната від вертикалі або зміна довжини канату) робить такий спосіб гасіння коливань неспроможним. Встановлено, що в розробленій замкнутій системі наявність збурень впливає тільки на якість перехідних процесів, але не заважає виконанню основного завдання.

**Висновки.** У роботі запропоновано нову систему керування швидкістю механізму поступального руху з підвищеним до нього вантажем, що забезпечує гасіння коливань вантажу навіть при роботі підйомного пристрою. Система складається з регулятора стану повного порядку та спостерігача стану Люенбергера. В основу синтезу покладено лінеаризовану модель об'єкта зі змінними параметрами. Адаптація середньогометричного кореня характеристичного полінома і коефіцієнтів регулятора стану до зміни довжини каната дає змогу зменшити амплітуду коливань вантажу при розгоні та гальмуванні візка і ліквідувати їх у цільовій точці. Використання спостерігача стану дозволяє обійтися без складних і вартісних пристроїв вимірювання кутового положення та кутової швидкості вантажу.

#### СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ КРАНОВЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С УЧЕТОМ РАБОТЫ ПОДЪЕМНОГО МЕХАНИЗМА

О.И. Толочко<sup>1</sup>, докт. техн. наук, А.М. Рыжков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И.Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: [tolochko.ola@gmail.com](mailto:tolochko.ola@gmail.com)

<sup>2</sup> - Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: [o\\_rvzh@ied.org.ua](mailto:o_rvzh@ied.org.ua)

*Для крановых механизмов поступательного движения с грузом, подвешенным на гибком канате, синтезирована система управления с обратной связью по вектору состояния полного порядка, учитывающая изменение длины каната при работе подъемного устройства. Для оценивания угла отклонения каната с грузом от вертикали и угловой скорости этого перемещения синтезирован наблюдатель состояния Люенбергера. Выполнен анализ разработанной системы модального управления методом математического моделирования. Библи. 4, рис. 5.*

**Ключевые слова:** модальное управление, кран, подъемный механизм, наблюдатель Люенбергера.

#### SYNTHESIS AND ANALYSIS OF MODAL CONTROL SYSTEM FOR CRANE MECHANISM MOTION TAKING INTO ACCOUNT THE WORK OF LIFTING MECHANISM

O.I. Tolochko<sup>1</sup>, A.M. Ryzhkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Sikorski Kyiv Polytechnic institute, пр. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: [tolochko.ola@gmail.com](mailto:tolochko.ola@gmail.com)

<sup>2</sup> - The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, пр. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [o\\_rvzh@ied.org.ua](mailto:o_rvzh@ied.org.ua)

*The control system for crane mechanism with feedback over full order state vector is synthesized. This system applied to motions of crane mechanism with load suspended on a flexible rope. In addition, this system taking into account changes of rope length of lifting mechanism when it working. The Luenberger-observer was synthesized for estimation swing angle and angular speed of this movement. Analysis of designed modal control system was performed with mathematical modelling method. References 4, figures 5.*

**Keywords:** modal control, crane, lifting mechanism, Luenberger observer.

1. Chang C.Y. The switching algorithm for the control of overhead crane. *Neural Computing & Applications*. 2006. Vol. 15. Pp. 350-358.
2. Buch A. Optimale Bewegungssteuerung von schwingungsfähigen mechatronischen Systemen mit zwei Freiheitsgraden am Beispiel eines Krans mit Pendelnder Last und elastischer Mechanik. Magdeburg, 1999. 250 p.
3. Moustafa K.A.F. Feedback control of overhead cranes swing with variable rope length. American Control Conf. Baltimor, Mariland, 1994. Pp. 691-695.
4. Park H., Chwa D., Hong K.-S. A feedback linearization control of container cranes: varying rope length. *International Journal of Control, Automation, and System*. 2007. Vol. 5. No 4. Pp. 379-387.

Надійшла 02.03.2018  
Остаточний варіант 12.04.2018