УДК 631.362;
DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-2-18

Антощенков Роман Вікторович[1],
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мехатроніки, безпеки життєдіяльності та управління якістю

Свіргун Володимир Петрович[2],
кандидат технічних наук, професор кафедри підйомно-транспортних машини і обладнання

Свіргун Ольга Анатоліївна[1],
кандидат технічних наук, доцент кафедри надійності та міцності машин і споруд ім. В.Я. Аніловича

Свіргун Валентин Володимирович[1],
аспірант кафедри мехатроніки, безпеки життєдіяльності та управління якістю

[1] Державний біотехнологічний університет
[2] Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Antoshchenkov Roman[1],
Doctor of Sciences, Professor, Department of mechatronics, life safety and quality management, https://orcid.org/0000-0003-0769-7464

Svirgun Volodimir[2],
PhD in Technical Sciences, Professor, the Department of Lifting and Transport Machines and Equipment, https://orcid.org/0000-0001-5413-9428

Svirgun Olga[1],
Candidate of technical sciences, Associate Professor, Department of reliability and durability of machines and structures named after V. Anilovich, https://orcid.org/0000-0001-6069-8269

Svirgun Valentyn[1],
Postgraduate student, Department of mechatronics, life safety and quality management, https://orcid.org/0000-0002-3024-3252

[1] State Biotechnological University
[2] National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

АНАЛІЗ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОСТОВИМ КРАНОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИМАЛЬНИХ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ
ANALYSIS OF THE OPERATION OF THE MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM OF A BRIDGE CRANE USING OPTIMUM CONTROL LAWS

Антощенков Р. В., Свіргун В. П., Свіргун О. А., Свіргун В. В. Аналіз роботи мікропроцесорної системи керування мостовим краном з використанням оптимальних законів керування. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2024. Том 9. № 2. С. 107 – 112.

Antoshchenkov R., Svirgun V., Svirgun O., Svirgun V. Analysis of the operation of the microprocessor control system of a bridge crane using optimum control laws. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*. 2024. Volume 9. № 2, pp. 107 – 112.

У роботі наведено результати досліджень впливу похибки основних параметрів мостового крана на якість оптимального керування. В основі концепції оптимального керування покладено принцип максимуму Л.С. Понтрягіна, коли мета досягається перемиканням керування розгін-гальмування точки підвісу вантажу за певним алгоритмом. Розроблена програма, яка генерує оптимальні закони керування для конкретного крана. Ця програма може бути використана для будь-якої вантажопідйомної машини, де точка підвісу рухається прямолінійно і використовується гнучкий підвіс вантажу. Результати досліджень були апробовані на декількох об'єктах. У кожному випадку спостерігалося гарне співпадіння теоретичних результатів з експериментальними і як результат – ефективне керування об'єктом. Оптимальні закони керування були реалізовані оригінальною мікропроцесорною системою, побудованою спочатку на базі мікроконтролера МКП-1, а потім на базі Arduino. В статті досліджується, як похибка у кожному з основних параметрів крана впливає на кінцевий результат і як можна вдосконалити систему керування, щоб негативний вплив зменшити до мінімуму.

***Ключові слова**: оптимальне керування, усунення коливань вантажу, точне позиціонування, кран, мікропроцесор, перевантажувальний цикл.*

This work presents the results of studies on the influence of the error of the main parameters of the bridge crane on the quality of optimal control. The quality of control refers to the exact positioning of the load at the stopping point and the magnitude of the final fluctuations of the load after the crane stops. The concept of optimal control is based on L.S. Pontryagin's maximum principle, which is when the goal is achieved by switching the acceleration-braking control of the load suspension point according to a specific algorithm. To achieve the maximum speed of operation of the crane, certain restrictions and conditions have been removed, namely, the refusal to eliminate load fluctuations during crane acceleration, which simplifies the subsequent elimination of load fluctuations during crane braking. However, this is an unnecessary waste of time, and therefore, acceleration is carried out at the maximum possible acceleration without eliminating load fluctuations. Of course, at the same time, significant fluctuations in the cargo occur, and they continue throughout the entire time the crane is moving. Moreover, the final goal is achieved only at the end of the cycle by switching the acceleration-deceleration modes - the cargo is delivered precisely to the specified point without fluctuations after the crane stops. A PC program that generates optimal control laws for a specific crane has been developed. This program can be used for any lifting machine where the suspension point moves in a straight line, and flexible load suspension is used, such as overhead or gantry cranes, hoists, etc. The results of the research were tested on several objects: a 0.5t crane, a 5t bridge grab crane, and models of bridge cranes. In each case, a good coincidence of theoretical and experimental results was observed, resulting in effective management of the object. The original microprocessor system implemented the optimal control laws, built first based on the MKP-1 microcontroller and then based

on Arduino. However, a good result is guaranteed only if the fundamental parameters of the crane coincide with the theoretical ones. This is not easy to achieve during the actual operation of the crane. They vary within a specific range. The article examines how the error in each of the main parameters of the crane affects the result and how the control system can be improved to reduce the negative impact to a minimum.
***Keywords**: optimal control, elimination of load fluctuations, accurate positioning, crane, microprocessor, reloading cycle.*

Вступ

Відомо, що для підвищення продуктивності та ефективності перевантажувальних робіт треба використовувати сучасну мікропроцесорну техніку і переходити в автоматичний режим роботи. Особливістю крана-перевантажувача є те, що наявність гнучкого підвісу вантажу призводить до виникнення значних його коливань, які недопустимі в момент завантаження або розвантаження. При ручному керуванні краном задача усунення коливань вантажу при його зупинці покладена на оператора крана, який, керуючись своїм досвідом, шляхом змінення швидкості вантажного візка, досягає цієї мети за декілька маніпуляцій швидкістю. Це вимагає значного напруження уваги і не дозволяє максимально швидко усунути коливання вантажу в заданій точці. Втома оператора від напруженої роботи може призвести до аварійних ситуацій. При переході на автоматичний режим роботи перш за все треба розробити такі закони керування, що дозволять здійснити перевантажувальний цикл у найкоротший термін з усуненням коливань вантажу і точним позиціонуванням. Потрібна ціла система датчиків, яка буде надавати повну інформацію про хід виконання операцій. Математичний аналіз руху вантажного візка з вантажем, що на гнучкому канаті, показав необхідність використовувати максимальні прискорення на перехідних ділянках циклу, щоб досягти максимальної швидкодійності [1].

Розроблена програма синтезу оптимальних законів керування для будь-якого крана мостового типу. На виході ми отримуємо в розгортці за часом основні параметри (графіки): пересування і швидкість візка та вантажу [2]. При подальшому програмуванні мікроконтролера логічно взяти один з цих параметрів, зокрема швидкість візка під час руху і зробити його управляючим. Інші параметри достатньо контролювати за допомогою датчиків. Сучасні мікропроцесорні системи здатні точно реалізувати переміщення будь-якої матеріальної точки за заданим графіком швидкості і досягти поставленої мети – ефективного переходу в автоматичний режим роботи. Саме такий підхід дозволить досягти максимальної продуктивності крана, усунення фактору втоми кранівника, покращення безпеки перевантажувальних робіт тощо. Отримавши теоретичні оптимальні закони керування, проаналізуємо вплив похибки в основних параметрах крана на кінцевий результат. Будемо по черзі свідомо вносити похибку у кожний параметр, а оптимальний закон керування залишаємо незмінним. Автоматизація кранів стала актуальною задачею з появою на ринку компактних мікропроцесорних приладів. Але застосування засобів автоматики на крані стикається з низкою проблем і це перш за все наявність гнучкого підвісу вантажу, що не дозволяє застосовувати прості алгоритми керування через виникнення значних коливань вантажу під час руху кранового візка або самого крана. Також можна зазначити як проблему це агресивне середовище для стабільної роботи електронних елементів, але для механіків головне, що треба зробити для успішної роботи системи керування краном – це ефективне усунення коливань вантажу в точці завантаження/розвантаження. Дослідники з багатьох країн запропонували різні способи вирішення цієї проблеми [3-7]. Всі варіанти можна розкласти на декілька груп:

– плавний розгін або гальмування візка завдяки сучасним регульованим приводам. При незначній довжині каната і на невеликих вантажних потоках це може бути достатнім для організації нормального перевантажувального процесу, але виробність крана не може бути високою;

– застосування різноманітних просторових конструкцій підвісу вантажу з демпфуючими елементами. Конструкції виходять складними та коштовними і майже не працюють на підвісах великої довжини;

– усунення коливань вантажу лише засобами електроніки з використанням зворотного зв'язку з датчиками. Алгоритм керування доволі простий – в точці зупинки візок рухається слідом за вантажем і через декілька ітерацій вантаж заспокоюється. Це теж не швидкий спосіб і потребує додаткових маніпуляцій для точного позиціонування;

– усунення коливань вантажу через зміну швидкості візка. Це найбільш популярний спосіб, зокрема оператор крана при ручному керуванні саме так і робить. Розроблено багато різноманітних алгоритмів зміни швидкості вантажу, при яких не буде його коливань після зупинки. Деякі з них вже реалізовані на практиці. Але у всіх них є один недолік – вони не дозволяють скоротити перевантажувальний цикл до мінімуму і програють досвідченому оператору кран. Причина в тому, що всі відомі рішення робочі тільки тоді, коли усунені коливання вантажу під час розгону, на що витрачається зайвий час.

Формулювання цілей статті

Після аналізу відомих рішень була прийнята концепція подальших досліджень, зокрема отримати оптимальні за швидкодійністю закони керування, які не передбачають усунення коливань вантажу під час розгону, а тільки після зупинки крана в кінцевій заданій точці. В такій постановці задача значно ускладняється, оскільки перед початком гальмування вантаж здійснює вільні коливання. Додатково накладені обмеження на максимальне відхилення вантажу від вертикальної осі. В такій постановці ця задача ще не розглядалася. Мета – проаналізувати, як та чи інша похибка вплине на кінцевий результат – точне позиціонування й остаточні коливання вантажу після зупинки. Дослідити, як впливають похибки

основних параметрів крана на кінцевий результат при оптимальному керуванні за допомогою мікропроцесорної системи.

Виклад основного матеріалу дослідження

Дослідження оптимальних законів керування при різних постановках досліджувалися у роботах [8-12]. У цій статті обмежимося основними постулатами, які були прийняті.

Оптимізаційна задача формулюється таким чином: необхідно знайти закон керування, який має мінімальну кількість перемикань і при цьому візок з вантажем, що висить на канаті, переміститься на визначену відстань з повним гасінням коливань вантажу наприкінці руху.

Розрахункова схема крана представляє собою візок масою m_1 і вантаж масою m_2, підвішений на гнучкому канаті довжиною l. На візок діє рушійне зусилля $F(t)$ і зусилля статичного опору W (рис. 1).

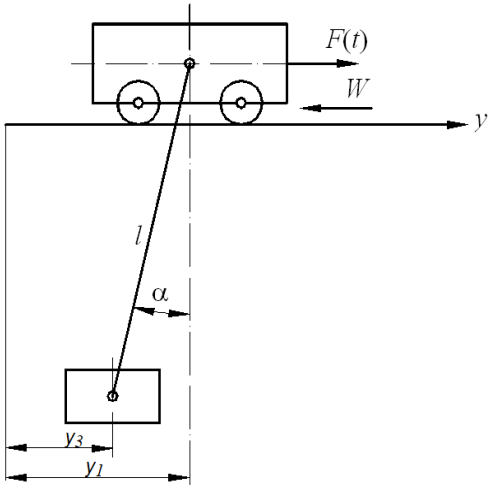

Рис. 1. Розрахункова схема крана

Рух такої моделі описується системою диференційних рівнянь

$$\dot{y}_1 = y_2, \dot{y}_2 = \frac{(y_3 - y_1)m_2 g}{m_1 l} + U(t), \dot{y}_3 = y_4, \dot{y}_4 = \frac{(y_1 - y_3)g}{l}, \quad (1)$$

де $U(t) = (F(t))/m_1$; y_1, y_2 – переміщення і швидкість візка; y_3, y_4 – переміщення і швидкість вантажу; g – гравітаційна константа.

В якості керуючого параметра вибрано рушійне зусилля $F(t)$. Але у подальшому керуючим параметром вважається параметр $U(t)$, який є пропорційний $F(t)$.

Прийняті такі обмеження:

$$|F(t)| \le K, y_2 \le v_0, \quad (2)$$

де K – максимально можливе рушійне зусилля, v_0 – номінальна швидкість візка.

Було встановлено, що оптимальний закон керування згідно з принципом максимуму Л.С. Понтрягіна має релейний вид. Тому на кожній ділянці перевантажувального циклу $U(t) = U_0 = const$. Враховуючи це, розв'язок системи рівнянь (1) можна записати у такому вигляді:

$$\begin{cases} y_1 = b_1 + b_2 t - b_3 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot cos\,\lambda t - b_4 \frac{m_2}{m_1} \cdot sin\,\lambda t + \frac{U_0}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{gt^2}{2l} + \left(1 - \frac{g}{l\lambda^2}\right)(1 - cos\,\lambda t)\right]; \\ y_2 = b_2 + b_3\lambda \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot sin\,\lambda t - b_4\lambda \frac{m_2}{m_1} \cdot cos\,\lambda t + \frac{U_0}{\lambda} \cdot \left[\frac{gt}{l\lambda} + \left(1 - \frac{g}{l\lambda^2}\right) sin\,\lambda t\right]; \\ y_3 = b_1 + b_2 t + b_3 \cdot cos\,\lambda t + b_4 \cdot sin\,\lambda t + \frac{U_0 \cdot g}{l\lambda^2} \cdot \left[\frac{t^2}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \cdot (1 - cos\,\lambda t)\right]; \\ y_4 = b_2 - b_3\lambda\, sin\,\lambda t + b_4\lambda \cdot cos\,\lambda t + \frac{U_0 \cdot g}{l\lambda^2} \cdot \left[t - \frac{sin\,\lambda t}{\lambda}\right]. \end{cases} \quad (3)$$

де $b_1 = (m_1 y_{01} + m_2 y_{03})/m$, $b_2 = (m_1 y_{02} + m_2 y_{04})/m$, $b_3 = m_1 (y_{03} - y_{01})/m$, $b_4 = \lambda^{-1} m_1 (y_{04} - y_{02})/m$, $\lambda = \sqrt{g/l\mu}$, $\mu = m_1/(m_1 + m_2)$, $m = m_1 + m_2$.

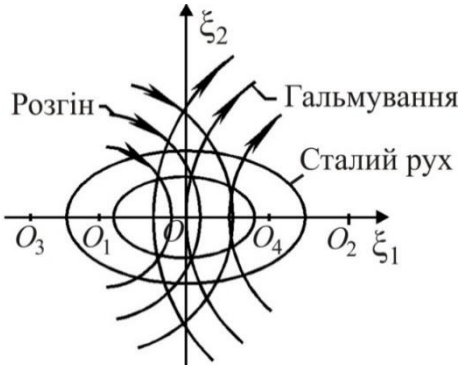

Рис. 2. Типи фазових траєкторій

Процес руху моделі зручно досліджувати на фазовій площині

$$(\xi_1, \xi_2): \xi_1 = (y_3 - y_1)\lambda, \xi_2 = y_4 - y_2.$$

Фазові траєкторії на перехідних ділянках виглядають як концентричні кола з центром в точці $O_1(-(K - W)/m_1\lambda)$ під час розгону і з центром в точці $O_2((K + W)/m_1\lambda)$ під час гальмування (рис. 2).

Сталий рух відображається еліпсом навколо початку координат. Рух за траєкторією здійснюється за годинною стрілкою і радіус кола залежить від початкових фазових координат. Час руху за будь-якою траєкторією:

$$t_i = \phi_i / \lambda, \quad (4)$$

де ϕ_i – величина центрального кута, на який спирається дуга кола; i =1,2,...- номер ділянки.

Постійний режим руху системи, коли візок рухається з номінальною швидкістю, а вантаж здійснює вільні коливання, описується системою рівнянь (1), розв'язок яких має вигляд:

$$\begin{cases} y_1 = y_{10} + y_{20} \cdot t; \\ y_2 = y_{20}; \\ y_3 = y_{10} + y_{20} \cdot t + (y_{30} - y_{10}) \cdot cos\,\mu t + \mu^{-1} \cdot (y_{40} - y_{20}) \cdot sin\,\mu t; \\ y_4 = y_{20} - (y_{30} - y_{10}) \cdot \mu\, sin\,\mu t + (y_{40} - y_{20}) \cdot cos\,\mu t, \end{cases} \quad (5)$$

де $\mu = \sqrt{\frac{g}{l}}$,

Для отримання закону $U(t)$ при постійному русі систему рівнянь (1) слід записати відносно $U(t)$. У результаті отримуємо диференційне рівняння:

$$\ddot{U}(t) + \left(\frac{g}{l}\right) \cdot U(t) = 0. \quad (6)$$

Рівняння (6) має таке розв'язок

$$U(t) = -\frac{m_2 g}{m_1 l} \cdot [(y_{30} - y_{10}) \cdot cos\, \mu\, t + \mu^{-1} \cdot (y_{40} - y_{20}) \cdot sin\, \mu\, t] \quad (7)$$

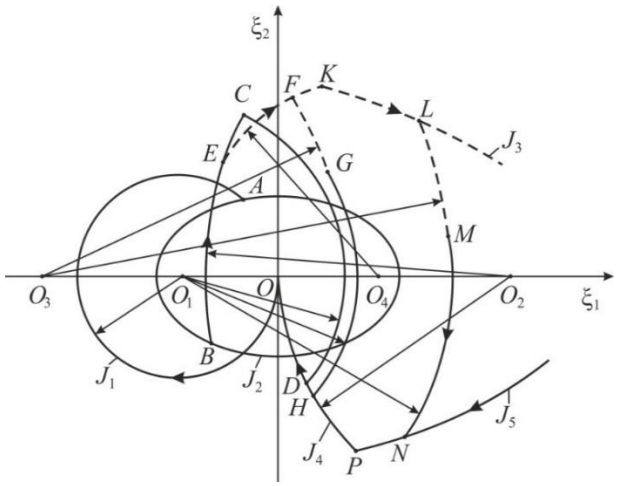

Рис. 3. Оптимальний закон керування з обмеженням швидкості

Було встановлено, що режиму постійного руху на фазовій площині (ξ_1, ξ_2) відповідає еліпс, рівняння якого записується у вигляді

$$\frac{\xi_1^2}{\xi_{10}^2 + (\mu^{-1}\lambda\xi_{20})^2} + \frac{\xi_2^2}{(\xi_{10} \cdot \mu^{-1}\lambda)^2 + \xi_{20}^2} = 1, \quad (8)$$

де ξ_{10}, ξ_{20} – початкові фазові координати.

Рух по еліпсу відбувається рівномірно з кутовою швидкістю μ за годинниковою стрілкою, а тривалість будь-якого етапу сталого режиму визначається залежністю

$$t_i = {}^{\alpha_i}/_{\mu}, \quad (9)$$

де α_i – кут між відрізками, які з'єднують початок координат з граничними точками досліджуваної ділянки еліпса (рис. 2).

У кінці перевантажувального циклу фазова точка має розміщуватися на початку координат фазової площини при виконанні умов

$$y_1 = S \quad (10)$$

$$y_2 = 0. \quad (11)$$

Розглянемо процес руху досліджуваної моделі на фазовій площині (ξ_1, ξ_2). Першому етапу перевантажувального циклу відповідає окружність J_1 (рис. 3) і припустимо, що у точці А швидкість візка досягла свого номінального значення v_0. Подальший рух візка буде відбуватися зі сталою швидкістю, а вантаж здійснювати вільні коливання. На фазовій площині цьому етапу відповідає еліпс J_2, який проходить через точку А. Припустимо, що на дузі ОА немає точки, з якої можна було б потрапити у початок координат при виконанні умов (10) і (11). Це припущення дає підставу вважати тривалість першого етапу t_{OA} сталою і незалежною від S. Величина t_{OA} визначається шляхом розв'язання рівняння $y_2 = v_0$ з використанням виразу (3) для y_2. Величина S буде визначати тривалість другого етапу – руху візка зі сталою швидкістю, тому необхідно розробити алгоритм, який дозволяє отримати розв'язання поставленої задачі для будь-якої точки еліпса. Розглянемо алгоритм пошуку оптимального розв'язання, наприклад, для точки В. Можна показати, що розв'язання поставленої задачі зводиться до вибору з сімейства траєкторій типу BCDO такої, щоб на початку координат була виконана умова (11), а умова (10) визначить положення точки В на еліпсі J_2. Якщо, наприклад, у точці Е зміниться напрям руху візка, то оптимальне розв'язання варто шукати серед траєкторій типу BEFGHO.

Далі зупинимося на розгляді тих особливостей алгоритму, які пов'язані з наявністю обмежень. Дослідимо етап EF – розгін візка у зворотному напрямі. Оскільки швидкість візка обмежена, то природно припустити, що на окружності, якій належать точки Е і F, знаходиться така точка К, у якій $y_2 = -v_0$ і, якщо серед усіх точок дуги ЕК такої немає, щоб траєкторія типу BKFGHO задовольняла умові (11), то розв'язання варто шукати серед точок еліпса J_3, який відповідає руху візка з номінальною швидкістю у зворотному напрямі.

Тепер дослідимо етап DO – гальмування візка до повної зупинки. Цей етап можна умовно розглядати як розгін візка з нульової фазової відстані при зворотному відліку часу, коли $U_0 = (N + W)/m_1$. Природно припустити, що на окружності J_4 існує деяка точка Р, у якій $y_2 = v_0$. Тому, якщо при розв'язанні задачі можна було потрапити на окружність J_4 у будь-якому місці, то у розглянутому випадку допустимою ділянкою цієї окружності є тільки дуга ОР, а відкинута з розгляду частина траєкторії замінюється еліпсом, який проходить через точку Р. Тому розв'язання поставленої оптимізаційної задачі у загальному вигляді зводиться до пошуку траєкторії переходу з ділянок ВЕ, ЕК або еліпса J_3 на ділянку ОР, або еліпса J_5. Критерій пошуку залишається колишнім – виконання умови (11) у точці О. Таким чином, розв'язанням задачі можуть бути траєкторії достатньо складні, наприклад, типу BEKLMNPO. Це залежить в основному від положення точки В на еліпсі J_2 або від фазового стану системи «візок – вантаж» перед початком гальмування.

Визначення тривалості кожного етапу залежить від типу траєкторій. Зробимо це для найбільш важкої траєкторії – BEKLMPO: t_{BE}, t_{LM} – знаходиться з рівняння $y_2 = 0$, де y_2 знаходимо з виразу (3); t_{EK} – з рівняння $y_2 = -v_0$; t_{KL} – з умови (11); t_{MN} – з формули (4); t_{NP} – з формули (9); t_{PO} – з рівняння $y_2 = v_0$ при зворотному плині часу, коли $U_0 = (N + W)/m_1$.

На рис. 4 показані графіки перехідних процесів і фазова діаграма, отримані шляхом реалізації на ЕОМ описаного алгоритму пошуку оптимального закону керування з урахуванням обмеження на швидкість пересування крана.

Реалізувати отримані оптимальні закони керування можна за допомогою мікропроцесорної системи керування. Такі випробування пройшли на декількох об'єктах: електрична таль в/п 0.5т, мостовий грейферний кран в/п 5т, макети різних кранів. Експерименти показали достатнє добре співпадіння з теоретичними результатами. Спостерігалося ефективне усунення коливань вантажу і точне його позиціонування. Зрозуміло, що мали місце і незначні остаточні коливання вантажу після зупинки крана і деяка похибка в позиціонуванні. Це є наслідком похибки в вимірюванні основних параметрів крана, які були закладені як початкові дані для розрахунку оптимальних законів керування. Проведемо чисельний експеримент, метою якого має стати відповідь на питання – похибка якого параметра крана

суттєво впливає на кінцевий результат. За базовий варіант візьмемо закон керування, що приведений на рис. 4.

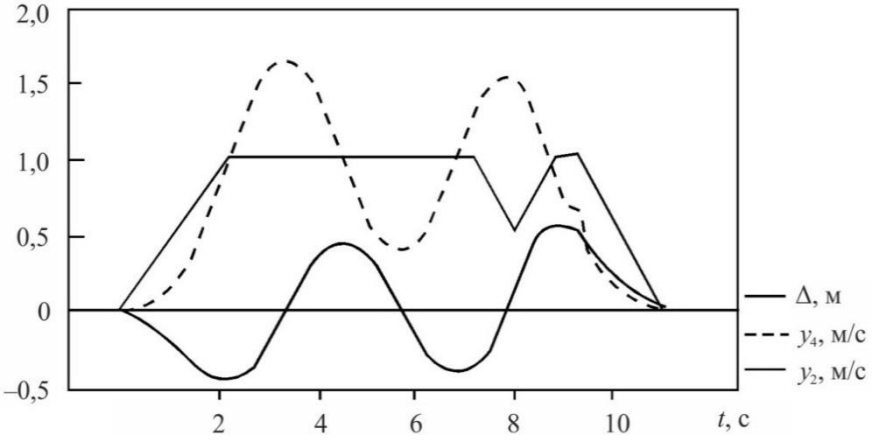

Рис. 4. Графіки перехідних процесів при оптимальному керуванні з урахуванням обмеження y_2: m_1=10,3т; m_2=0,6т; K=6кН; W=1кН; S=8м; v_0=1м/с; l=5м

Вважаємо, що система керування побудована на простій логіці без зворотного зв'язку, складається із 4 простих етапів – розгін і сталий рух, гальмування, розгін і знову сталий рух, остаточне гальмування. Не змінюючи інтервали перемикання, у формули перехідних процесів (3), (5) будемо вносити в один із параметрів крана похибку R, яка може бути до 50% від номіналу, і оцінимо, як це може вплинути на кінцевий результат, окремо на позиціонування і окремо на остаточні коливання вантажу. Такий чисельний експеримент був проведений для чотирьох основних параметрів – довжина підвісу, швидкість сталого руху, маса вантажу і статичний супротив. Результати цього чисельного експерименту приведені на рис. 5 і 6.

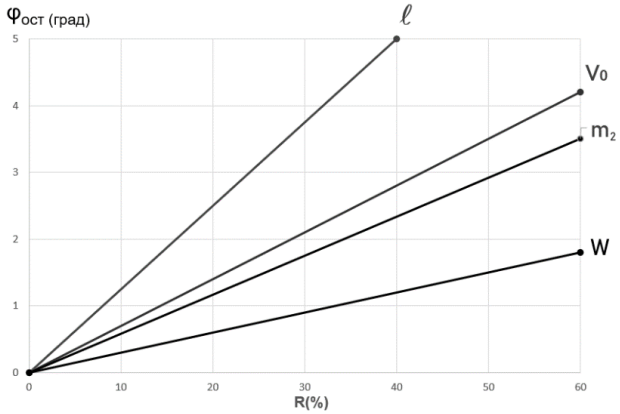

Рис. 5. Остаточні коливання вантажу при похибці в параметрах

Аналіз цих результатів показує, що на остаточні коливання вантажу найбільше впливає похибка у замірі довжини каната. Це легко пояснити, тому що в цьому випадку фазовий стан системи «кран-вантаж» перед першим гальмуванням буде відрізнятися від розрахункового і алгоритм гасіння коливань вантажу буде неефективним або зовсім не працюватиме. До речі, це буде також залежати від пройденого шляху. Чим він більший, тим більше буде накопичуватися похибка фазового стану. Тому треба приділити особливу увагу під час заміру довжини каната. При натурних експериментах був застосований простий, але доволі точний алгоритм вимірювання довжини каната. Він полягає в тому, що на початку секундоміром визначається період вільних коливань вантажу, а потім із відомої формули фізики розрахунку періоду вільних коливань знаходимо довжину каната. Що стосується точності позиціонування, то вона найбільше залежить від точності заміру сталої швидкості, що є логічним.

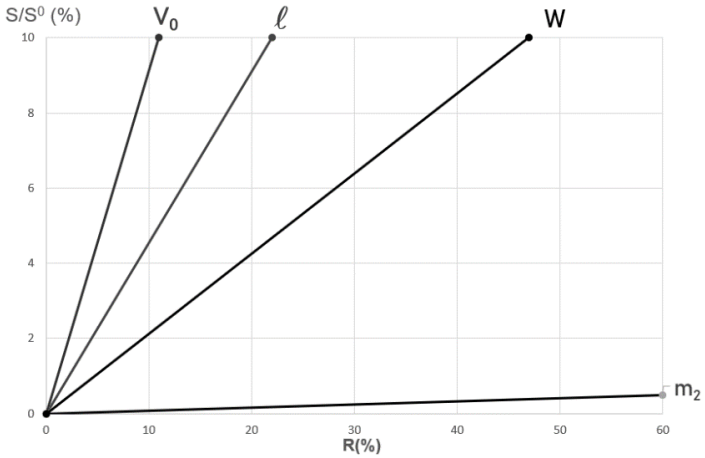

Рис. 6. Точність позиціонування при похибці в параметрах

Залежність якості керування від похибки вимірювання сталої швидкості крана і статичного супротиву можна значно зменшити шляхом удосконалення алгоритмів, що використовуються при програмуванні мікроконтролера, зокрема, якщо кран облаштувати датчиком швидкості, сигнал від якого в ході руху через певний інтервал часу, наприклад, через 0.1 секунду порівнюється з ідеальним теоретичним графіком швидкості крана і при потребі вносити коригування в управляючі сигнали. Таким чином вплив похибки цих параметрів буде зведено до мінімуму.

Висновки та перспективи подальших розвідок

1. Оптимальні закони керування для крана мостового типу дозволяють за найкоротший час перемістити вантаж в задану точку з усуненням його коливань. Реалізувати оптимальні алгоритми керування можна за допомогою мікропроцесорної техніки. Якість керування залежить від точності заміру основних параметрів крана.

2. Встановлено, що на остаточні коливання вантажу найбільше впливає похибка у заміру довжини каната. Менше впливають похибки сталої швидкості, маси вантажу і статичного опору відповідно.

3. На точність позиціонування найбільше впливає похибка сталої швидкості, довжини каната, статичного опору і маси вантажу відповідно.

4. Для зменшення залежності точності керування від похибки деяких параметрів в мікропроцесорній системі доцільно використовувати слідкуючі алгоритми за швидкістю крана з внесенням коригуючих сигналів, при необхідності використовуючи датчики зворотного зв'язку.

Література

1. Gamkrelidze R. V. L. S. Pontryagin selected works volume 4: The Mathematical Theory of Optimal Processes. CRC Press, 2019. 519 p.
2. Григоров О.В., Свіргун В.П., Аніщенко Г.О. Оптимальне керування підйомно-транспортними машинами-Optimale Steuerung für Hebe-und Fördermaschinen: навчальний посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. 240 с.
3. Hong K.-S., Shah U.H. Dynamics and Control of Industrial Cranes. Advances in Industrial Control, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5770-1.
4. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів: монографія. Київ: ЦП «Компринт», 2015. 197 с.
5. Wang X.L., Liu H.B., Lai X.C. A new approach of anti-swing control system based on run-to-run control and fuzzy control for overhead crane. In: International conference on natural computation, Guilin, China. 2017. New York: IEEE.
6. Miao Y., Xu F., Hu Y., An J., Zhang M. Anti-swing control of the overhead crane system based on the harmony search radial basis function neural network algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. № 11(3).
7. Romasevych Y., Loveikin V., Bakay B. A Real-World Benchmark Problem for Global Optimization. *Cybernetics and Information Technologies*. 2023. Vol. 23 (2023). DOI: https://doi.org/10.2478/cait-2023-0022. P. 23-39.
8. Свіргун В.П, Свіргун В.В., Антощенков Р.В. Мікропроцесорна система керування мостовим краном на базі Ардуіно. *Інженерія природокористування*. 2022. № 23. С. 87-91. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.6822931.
9. Свіргун В.П., Свіргун О.А. Проблеми, що виникають при автоматизації кранів мостового типу. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2020. № 21. С. 92-96. DOI: https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.92-96.
10. Свіргун В.П, Свіргун В.В., Антощенков Р.В. Мікропроцесорна система керування мостовим краном на базі Ардуіно. *Інженерія природокористування*. 2022. № 23. С. 87-91. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.6822931.
11. Свіргун В.П., Свіргун О.А. Проблеми, що виникають при автоматизації кранів мостового типу. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2020. № 21. С. 92-96.
12. Свіргун В.П., Свіргун В.В. Дослідження оптимальних законів керування макетом крану при незначних за тривалістю перехідних процесах: Збірка матеріалів форуму XVI-й Міжнародний форум молоді "Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі". Харків. 2020. 14 с.

References

1. Gamkrelidze R. V. L. S. Pontryagin selected works volume 4: The Mathematical Theory of Optimal Processes. CRC Press, 2019. 519 p.
2. Hryhorov, O.V., Svirhun, V.P., Anischenko, H.O. (2014). *Optymal'ne keruvannia pidjomno-transportnymy mashynamy-Optimale Steuerung für Hebe-und Fördermaschinen*. [Optimum control of lifting and transport machines - Optimale Steuerung für Hebe-und Fördermaschinen]. NTU «KhPI». Kharkiv. Ukraine.
3. Hong, K.-S., Shah, U.H. (2019). Dynamics and Control of Industrial Cranes. Advances in Industrial Control. Springer Nature Singapore Pte Ltd. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5770-1.
4. Lovejkin, V.S., Romasevych, Yu.O. (2015). *Dynamichna optymizatsiia mekhanizmu pidjomu vantazhu mostovykh kraniv*. [Dynamic optimization of the load lifting mechanism of bridge cranes]. TsP «Komprynt». Kyiv. Ukraine.
5. Wang, X.L., Liu, H.B., Lai, X.C. (2017). A new approach of anti-swing control system based on run-to-run control and fuzzy control for overhead crane. In: International conference on natural computation, Guilin, China. IEEE. New York. USA.
6. Miao, Y., Xu, F., Hu, Y., An, J., Zhang, M. (2019). «Anti-swing control of the overhead crane system based on the harmony search radial basis function neural network algorithm». *Advances in Mechanical Engineering*. № 11(3). DOI: https://doi.org/10.1177/1687814019834458.
7. Romasevych, Y., Loveikin, V., Bakay, B. (2023). «A Real-World Benchmark Problem for Global Optimization». *Cybernetics and Information Technologies*. Vol. 23 (2023). DOI: https://doi.org/10.2478/cait-2023-0022. R. 23-39.
8. Svirhun, V.P, Svirhun, V.V., Antoschenkov R.V. (2022). «Microprocessor control system of bridge crane based on Arduino». *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*. № 23. pp. 87-91. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.6822931.
9. Svirhun, V.P., Svirhun, O.A. (2020). «Problems arising in the automation of bridge-type cranes». *Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. № 21. S. 92-96. DOI: https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.92-96.
10. Svirhun, V.P, Svirhun, V.V., Antoschenkov R.V. (2022). «Microprocessor control system of bridge crane based on Arduino». *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*. № 23. pp. 87-91. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.6822931.
11. Svirhun, V.P., Svirhun, O.A. (2020). «Problems arising in the automation of bridge-type cranes». *Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. № 21. S. 92-96. https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.92-96.
12. Svirhun, V.P., Svirhun, V.V. (2020). «Study of the optimal laws of control of the crane layout in the case of short-term transitional processes». Doslidzhennia optymal'nykh zakoniv keruvannia maketom kranu pry neznachnykh za tryvalistiu perekhidnykh protsesakh. *Proceeding of* the Materials of the forumu KhVI-j Mizhnarodnyj forum molodi "Molod' i sil's'kohospodars'ka tekhnika u KhKhI storichchi". Kharkiv. Ukraine.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2024 р.