

JACEK CINK¹, ANDRZEJ KOSUCKI¹

NIEPLANOWE ZATRZYMANIE MECHANIZMU JAZDY MOSTU SUWNICY Z WYTLUMIENIEM WAHAŃ ŁADUNKU

Słowa kluczowe: Automatyzacja, optymalizacja, napęd, sterowanie, suwnica

Streszczenie. Przy transporcie poziomym wiotko podwieszonych ładunków realizowanym za pomocą suwnic stosuje się sterowanie za pomocą funkcji optymalnych, które zapewniają wytlumienie wahań ładunku po okresach rozruchu i hamowania. Podczas pracy planowej hamowanie rozpoczyna się przy nie wahającym się ładunku, zatem optymalne funkcje sterujące dla tego okresu są zależne jedynie od parametrów ładunku i jego zawieszenia. Natomiast przy rozruchu prowadzonym np. wg funkcji liniowej wahań ładunku po zakończeniu rozruchu są duże i ich wytlumienie w okresie hamowania wymaga uzależnienia funkcji sterującej dodatkowo od stanu ładunku. W referacie przedstawiono wyniki badań symulacyjnych ruchu roboczego mechanizmu jazdy mostu suwnicy z zastosowaniem optymalnych funkcji sterujących zapewniających wytlumienie wahań ładunku po zatrzymaniu układu.

1. WSTĘP

W wyniku prac prowadzonych w Zakładzie Maszyn Roboczych i Napędów Hydraulicznych Politechniki Łódzkiej wypracowane zostały metody wyznaczania sterowań optymalnych mechanizmów jazdy dźwignic przy transporcie poziomym wiotko podwieszonych ładunków. Przy zastosowaniu sterowań optymalnych uzyskuje się wytlumienie wahań ładunku po okresach rozruchu i hamowania oraz dojazd mostu suwnicy do zadanego położenia z dokładnością rzędu 1 cm. Jeżeli zaistnieje konieczność niespodziewanego zatrzymania mostu suwnicy przed końcem planowego ruchu roboczego, to możliwe do rozważenia są dwa przypadki. W pierwszym, kiedy rozruch przeprowadzony został wg optymalnej funkcji sterującej i ładunek w ruchu ustalonym i na początku hamowania nie waha się, kształt optymalnej funkcji sterującej przy hamowaniu zapewniającej wytlumienie wahań ładunku zależy jedynie od parametrów ładunku (jego masy, długości lin) i czasu hamowania. W drugim przypadku, kiedy rozruch nie został przeprowadzony wg funkcji optymalnej, ale np. liniowej, ładunek w ruchu ustalonym waha się i przy określaniu optymalnej funkcji sterującej oprócz parametrów ładunku należy dodatkowo wziąć pod uwagę jego stan na początku hamowania (wychylenie i prędkość ładunku). Opracowana metoda optymalizacji umożliwia znalezienie takich optymalnych funkcji sterujących dla wyżej wymienionego przypadku nieplanowego zatrzymania mostu suwnicy przy rozkołysanym ładunku, aby po zakończeniu ruchu pozostawał on w spoczynku.

¹ Politechnika Łódzka

W referacie przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych falownikowego indywidualnego mechanizmu jazdy mostu suwnicy o udźwigu $Q = 500$ kN, rozpiętości $L = 14$ m i prędkości jazdy $v_{jm} = 103$ m/min.

2. WYMAGANIA STAWIANE MECHANIZMOM

Współczesne mechanizmy jazdy suwnic zaopatrzone są w układy ciągłego sterowania prędkością zapewniające w ruchach ustalonych proporcjonalność między sygnałem sterującym U i prędkością mechanizmu v . W napędach elektrycznych stosuje się z przetwornice częstotliwości, współpracujące z silnikami asynchronicznymi zwartymi, w napędach hydrostatycznych stosuje się przekładnie hydrostatyczne z jednostkami o zmiennej objętości jednostkowej. Układy te posiadają cechy, które umożliwiają ich zastosowanie w automatycznych systemach sterowania dźwignic, w tym sterowania optymalnego.

W rzeczywistości mechanizm jazdy mostu suwnicy jest poddany działaniu zakłóceń, które mogą zmienić przebieg ruchu roboczego w przypadku otwartego układu sterowania. Dodatkowo różne położenie wózka na moście powoduje różne obciążenie i różne opory ruchu czołownic, co z kolei, przy zastosowaniu napędów indywidualnych, może wywołać zjawisko ukosowania. W konsekwencji ruch suwnicy nie jest do końca zdeterminowany, co przy sterowaniu optymalnym zakłóca efekt eliminacji wahań ładunku, jak również dokładność dojazdu do zadanego położenia. W celu uniezależnienia się od zakłóceń stosuje się systemy napędowe, które zaopatrzone są w układy regulacji prędkości i przemieszczenia.

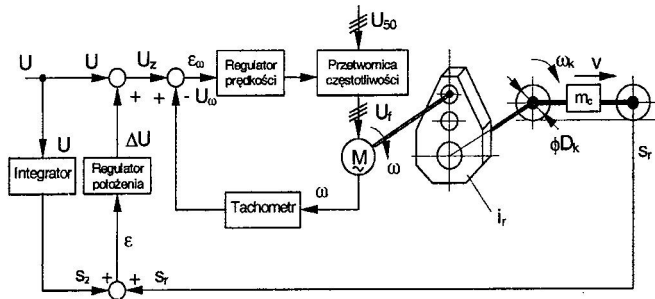
Jeżeli taki układ zastosuje się w mechanizmie jazdy suwnicy, to ruch sztywnego mostu stosunkowo dokładnie odwzorowuje zadaną funkcję sterującą (prędkości czołownic są proporcjonalne do wartości sygnału sterującego). W efekcie zadanie poszukiwania optymalnej funkcji sterującej zapewniającej wytłumienie wahań zawieszzonego na linach ładunku może zostać ograniczone tylko do minimalizacji energii wewnętrznej zawieszzonego na linach ładunku.

W Zakładzie MRiNH opracowana została struktura i dobrane zostały parametry układu sterowania mechanizmem jazdy czołownicy, zaopatrzonego w układy regulacji prędkości i przemieszczenia. We współczesnych napędach elektrycznych zawierających przetwornice częstotliwości układ regulacji prędkości zrealizowany jest przez system mikroprocesorowy samego falownika, natomiast układ regulacji przemieszczenia - przez osobny sterownik mikroprocesorowy. W napędach hydrostatycznych układy regulacji prędkości i przemieszczenia realizowane są za pomocą osobnych sterowników.

Schemat układu regulacji prędkości i przemieszczenia dla falownikowego napędu mechanizmu jazdy czołownicy pokazano na rys. 1.

Układ regulacji prędkości zawiera elementy typowe: tor sprzężenia zwrotnego prędkości kątowej silnika elektrycznego ω (proporcjonalnej do prędkości kątowej ω_k koła napędowego oraz, przy braku poślizgu, do prędkości v czołownicy), węzeł sumacyjny oraz regulator, natomiast układ regulacji przemieszczenia w sposób ciągły dokonuje porównania sygnału proporcjonalnego do przemieszczenia zadanego s_z oraz przemieszczenia rzeczywistego s_r . Uchyb przemieszczenia ϵ_s , po przejściu przez regulator, koryguje napięciowy sygnał sterujący U , proporcjonalny do prędkości zadanej czołownicy. Sygnał przemieszczenia zadanego s_z

uzyskuje się przez ciągłe całkowanie sygnału sterującego $\left(s_z = \int_0^t k_z \cdot U \cdot dt \right)$.



Rys. 1. Struktura układu sterowania mechanizmu jazdy czołownicy

3. MODELE DYNAMICZNE I WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH.

W oparciu o doświadczenia Zakładu MRiNH opracowana została struktura modelu dynamicznego mostu badanej suwnicy wraz z mechanizmami jazdy czołownic oraz układem sterowania.

Przy budowie modelu przyjęto następujące założenia i uwzględniono następujące cechy układu:

- most suwnicy potraktowano jako ciało sztywne,
- uwzględniono ruch płaski mostu w płaszczyźnie poziomej,
- kąty zukosowania mostu potraktowano jako małe,
- prędkości kątowne mostu potraktowano jako małe,
- prędkości i przyspieszenia elementów mostu są równoległe do toru jezdnygo,
- opory ruchu czołownic są proporcjonalne do ich obciążenia pionowego i zmieniają się wraz z położeniem wózka na moście,
- nie uwzględniono tarcia obrzeży,
- ładunek waha się w płaszczyźnie pionowej równoległej do toru jezdnygo mostu,
- wahania zawieszono na linach ładunku są małe,
- liny wciągarki są nieważkie i mają stałą długość,
- siła oporu powietrza działająca na ładunek jest proporcjonalna do jego prędkości,
- siła oporu powietrza jest przyłożona w środku ciężkości ładunku,
- nie uwzględniono działania wiatru.

W opisie matematycznym części mechanicznej wykorzystano znane zasady mechaniki: zależności statyczne, kinematyczne i dynamiczne oraz zależności stosowane w automatyce dla opisu układu sterowania.

Opis matematyczny przedstawiono w przestrzeni zmiennych stanu jako dogodny dla rozwiązania równań za pomocą komputera cyfrowego. Otrzymano stacjonarny liniowy układ równań różniczkowych I rzędu w postaci (1):

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, z) \quad y = g(x) \quad (1)$$

x - wektor stanu układu, z - wektor zakłóceń.

Wielkością sterującą u jest sygnał napięciowy U jednakowy dla obu czołownic i proporcjonalny do ich prędkości.

4. SPOSÓB WYZNACZANIA OPTYMALNYCH FUNKCJI STERUJĄCYCH

Do wyznaczania optymalnych funkcji sterujących w okresie hamowania zastosowano opracowaną wcześniej gradientową metodę optymalizacji zmodyfikowaną do postaci uwzględniającej istnienie obszaru sterowań dopuszczalnych. Istnienie takiego obszaru związane jest z wymaganiem, aby funkcja sterująca ograniczona była do zakresu $\langle 0, U_{\max} \rangle$ sensownego fizycznie, a jej pochodna (proporcjonalna do przyspieszenia mostu) nie przekraczała wartości, przy której występuje poślizg między kołami napędowymi i szynami.

Przyjęty został wskaźnik jakości sterowania odpowiadający energii zmagazynowanej w wahającym się ładunku po zatrzymaniu układu. Przyjmuje on postać (2).

$$I = \frac{1}{2} \cdot m_Q \cdot v_{Qk}^2 + \frac{1}{2} \cdot c_Q \cdot x_{Qk}^2 \quad (2)$$

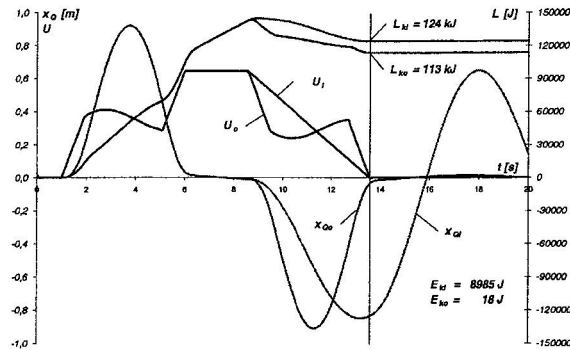
- m_Q – masa zawieszona na linach ładunku,
- c_Q – sztywność poziomego zawieszenia ładunku,
- v_{Qk} – prędkość ładunku w chwili końca hamowania,
- x_{Qk} – wychylenie ładunku w chwili końca hamowania.

Optymalnej funkcji sterującej poszukiwano dla różnych czasów hamowania, tak aby przy różnych fazach wahań ładunku na początku hamowania po jego zakończeniu ograniczyć energię zmagazynowaną w wahającym się ładunku, czyli wskaźnik (2) do umownego poziomu 100 J, co odpowiada wahanom o amplitudzie rzędu 1 cm.

5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

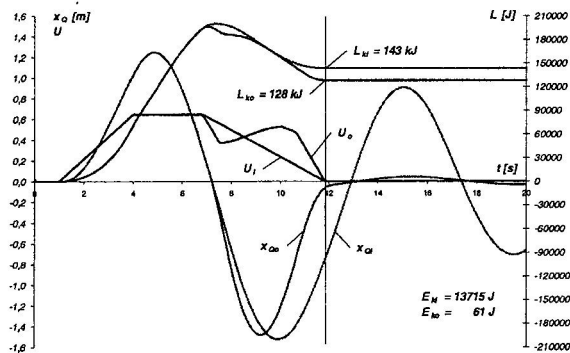
Przeprowadzono serię badań symulacyjnych ruchu roboczego mechanizmu jazdy mostu suwnicy z wykorzystaniem optymalnych funkcji sterujących przy hamowaniu. Przykładowe wyniki badań optymalizacyjnych pokazano na rysunkach 2, 3, i 4. Zamieszczono na nich przebiegi czasowe sterowań U oraz odpowiadające im przebiegi wahań ładunku względem mostu x_Q oraz prac L wykonanych na wale silnika elektrycznego. Indeksami „I” oznaczono przebiegi i wielkości odpowiadające hamowaniu wg funkcji sterującej liniowej, indeksami „0” – analogiczne przebiegi odpowiadające hamowaniu wg funkcji sterującej optymalnej. Na każdym wykresie zaznaczono wartości prac L_k wykonanych na wale silnika elektrycznego w chwili zakończenia ruchu roboczego oraz energii E_k zmagazynowanej w wahającym się ładunku, odpowiadającej wartości wskaźnika jakości sterowania I w równaniu (2) w tej samej chwili.

Rys. 2 odpowiada sytuacji, kiedy rozruch przeprowadzony został wg funkcji sterującej optymalnej w czasie $t_r = 5$ s, tzn. w czasie ruchu ustalonego i na początku hamowania ładunek nie wahał się. Czas hamowania niezbędny dla wy tłumienia wahań ładunku wyniósł $t_h = 5$ s.

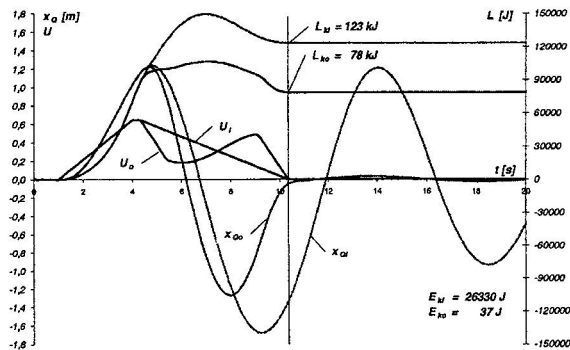


Rys. 2. Optymalizacja hamowania. Rozruch optymalny, $t_r = 5$ s, $t_h = 5$ s

Na rysunkach 3 i 4 pokazano sytuację, kiedy rozruch przeprowadzony został wg funkcji sterującej liniowej w czasie $t_r = 3$ s, a hamowanie następowało po czasie ruchu ustalonego t_u równym odpowiednio 0.33 s i 2.83 s, czyli przy różnych fazach wahań ładunku na początku hamowania. W pierwszym przypadku (rys. 3) czas hamowania niezbędny dla wytłumienia wahań ładunku wyniósł $t_h = 6$ s, w drugim (rys. 4) – $t_h = 5$ s.



Rys. 3. Optymalizacja hamowania. Rozruch liniowy, $t_r = 3$ s, $t_h = 6$ s



Rys. 4. Optymalizacja hamowania. Rozruch liniowy, $t_r = 3$ s, $t_h = 5$ s

6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania optymalizacyjne wykazały, że zaproponowana metoda optymalizacji oraz przyjęty wskaźnik jakości sterowania umożliwiają znalezienie takiej optymalnej funkcji sterującej przy hamowaniu, która pozwala na wytłumienie wahań ładunku po zatrzymaniu układu przy dowolnym wychyleniu ładunku od położenia równowagi na początku hamowania.

Wytłumienie wahań ładunku wymaga odpowiednio długiego czasu hamowania. Jest on tym dłuższy, im większa jest energia zmagazynowana w wahającym się ładunku po zakończeniu ruchu roboczego przy hamowaniu wg funkcji liniowej.

Hamowanie wg funkcji sterującej optymalnej poprawia bilans energetyczny ruchu roboczego. Odzyskana zostaje energia, która byłaby zmagazynowana w wahającym się ładunku po zakończeniu ruchu roboczego przy hamowaniu nieoptymalnym (np. wg funkcji liniowej) i uległaby dysypacji podczas postoju suwnicy.

LITERATURA

1. Cink J.: *Model i badania symulacyjne mechanizmu jazdy mostu suwnicy z napędem elektrohydrostatycznym*. Przegląd Mechaniczny Nr 23-24, Warszawa, 1991.
2. Cink J.: *Tłumienie wahań ładunku w systemie automatycznego sterowania suwnicą*. VI Konferencja Naukowa Sterowanie, Napęd, Wytrzymałość Zmęczeniowa i Projektowanie Maszyn Budowlanych. Rynia, październik 1994.
3. Tomczyk J. i inni: *Automatyzacja sterowania suwnicy do przeladunku kontenerów*. Prace dla Komitetu Badań Naukowych. OBRDiUT „DETRANS”- Bytom, Politechnika Łódzka, 1994.
4. Cink J., Tomczyk J.: *Rozwiązanie podstawowych problemów transportu wiotko podwieszonych ładunków suwnicami sterowanymi numerycznie*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1998, Seria: Transport, Zeszyt 34.
5. Cink J.: *Optymalne sterowanie maszyn roboczych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Mechanika, Nr 265/2001, Zeszyt 64.

THE UNPLANNED STOPPING OF THE TRAVELLING MECHANISM OF THE OVERHEAD CRANE WITH DAMPING THE LOAD OSCILLATIONS

Summary

During the horizontal transport of the flexibly suspended loads by overhead cranes the optimum control is used. It provides the damping of load oscillations after the acceleration and braking phases. When the work is scheduled the braking starts without load oscillations so optimum control functions for this period depend only on load and its suspension parameters. However, when acceleration is leaded by, for example, ramp control function the load oscillations after this period are great and damping them during the brake phase demands the control function would additionally dependent on load state. The results of simulation tests for duty motion of travelling mechanism of overhead crane by optimum control damping load oscillations after stopping the bridge are presented in the paper.