

Czesław BALAK¹, Jarosław SMOCZEK¹, Janusz SZPYTKO²

UKŁAD STEROWANIA Z LOGIKĄ ROZMYTĄ W SYSTEMACH NAPĘDOWYCH SUWNIC POMOSTOWYCH

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono wybrane wyniki badań zrealizowanych na suwnicach pomostowych i ukierunkowanych na testowanie różnych układów sterowania ich mechanizmami napędowymi. Uwagę skoncentrowano na tak zwanych inteligentnych algorytmach typu. W artykule przedstawiono przykłady układów sterowania zrealizowanych na rzeczywistej suwnicy pomostowej o udźwigu $Q=12,5$ [t] oraz wyniki eksperymentów przeprowadzonych z użyciem zaproponowanych algorytmów regulacji.

FUZZY CONTROL SETS IN MOVEMENT MECHANISMS OF OVERHEAD CRANES

Summary. Researches conducted for improving exploitation reliability of overhead cranes are oriented towards possibility of using control systems based on intelligent methods in movement mechanisms. The examples of control systems based on fuzzy algorithms realized on real object, the overhead crane with $Q=12,5$ [t] hoisting capacity and experiments results conducted using proposed control algorithms, are presented.

1. WPROWADZENIE

Rezultatem wymagań w zakresie określonej dokładności ruchów roboczych oraz niezawodności i bezpieczeństwa suwnic pomostowych jest stosowanie w ich mechanizmach napędowych przemienników częstotliwości. Prowadzone są badania ukierunkowane na opracowanie układów regulacji ruchem mechanizmów roboczych suwnic pomostowych, mające na celu minimalizowanie niekorzystnych zjawisk występujących w czasie eksploatacji urządzenia, takich jak: wahania transportowanego naciągach ładunku, ukosowanie mostu suwnicy. Złożoność tych zjawisk, wynikająca z szerokiego zakresu zmian parametrów eksploatacyjnych urządzenia i nieliniowości procesu sterowanego powoduje, że coraz częściej w układach napędowych proponowane są rozwiązania tak zwanych odpornych regulatorów wykorzystujących: zbiory rozmyte, systemy eksperckie, sieci neuronowe [1÷7]. W większości jednak rozwiązań badania w tym zakresie prowadzone są wyłącznie na modelach matematycznych urządzeń lub ich modelach laboratoryjnych. Autorzy uwagę skoncentrowali na regulatorach rozmytych.

¹ PPUH EKO-ENERGIA Sp. z o.o., ul. Ujastek 1, 30-969 Kraków

² Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: +48 12 6173103, fax: +48 12 6173531, e-mail: szpytko@uci.agh.edu.pl

Regulatory rozmyte mają nieliniowy charakter i możliwość ujęcia wiedzy o sterowanym procesie w postaci reguł typu *Jeżeli-To*. Modele rozmyte mają charakter systemów ekspertowych, w których strategia sterowania przedstawiana jest w postaci reguł budowanych z użyciem zmiennych lingwistycznych, co daje w rezultacie prostszy i czytelniejszy *interfejs* w procesie budowy regulatora. W rozwiązaniach sterowania suwnicami z użyciem logiki rozmytej najczęściej stosowane są propozycje wykorzystujące wnioskowanie Mamdaniego [1, 2, 5, 7]. Ze względu na złożony mechanizm obliczeniowy tego wnioskowania trudno jest stosować taki algorytm na sterownikach przemysłowych wykorzystywanych w układach sterowania mechanizmami napędowymi suwnic.

Przedmiotem artykułu są wybrane systemy sterowania mechanizmami ruchu suwnicy pomostowej będące przedmiotem badań na obiekcie rzeczywistym w realizacji projektu E!RobCrane [6]. W przykładach systemów sterowania algorytm regulacji, wykorzystujący model Takagi-Sugeno-Kanga, został zrealizowany na sterowniku PLC typu Melseca FX2N firmy Mitsubishi. Opracowany i zrealizowany został układ pomiarowo-sterujący na suwnicy pomostowej o udźwigu $Q=12,5$ t, rozpiętości mostu $L=16$ m, wysokości podnoszenia $L=10$ m, pracującej w grupie natężenia pracy A4.

2. BADANIA UKŁADÓW STEROWANIA W MECHANIZMACH NAPĘDOWYCH SUWNICY POMOSTOWEJ

W przeważającej większości układy napędowe suwnic wyposażone są w silniki asynchroniczne prądu przemiennego. W starszych rozwiązaniach nastawianie prędkości realizowane jest poprzez nastawniki i skokową zmianę dodatkowych rezystancji wpiętych w obwód wirnika asynchronicznego silnika pierścieniowego. W nowszych rozwiązaniach napędowych stosowane są silniki indukcyjne klatkowe z przemiennikami częstotliwości, a sterowanie ich prędkością obrotową odbywa się poprzez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego f_s .

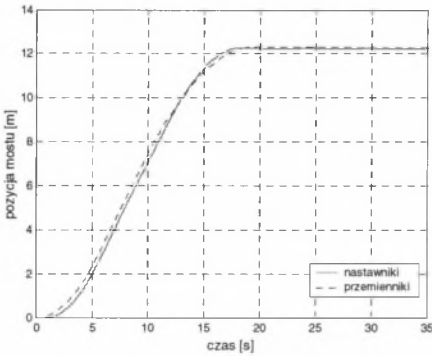
W rezultacie zastosowania przemienników częstotliwości w układach napędowych suwnicy pomostowej, będącej przedmiotem badań, uzyskano możliwość płynnego nastawiania prędkości i momentu silników napędzających mechanizmy robocze. Umożliwiło to prowadzenie badań w zakresie automatyzacji pracy urządzenia z zastosowaniem różnych typów regulatorów. W tabl. 1 zestawiono przemienniki częstotliwości zastosowane w układach napędowych badanego urządzenia. W układzie sterowania zastosowano sterownik firmy Mitsubishi serii FX2N 48MR wyposażony w dodatkowe moduły wejść i wyjść analogowych oraz moduł szybkiego licznika.

Jednym z założonych celów badań było wykazanie różnic w jakości sterowania ruchem mostu, wynikającej ze zmiany w układzie napędowym sposobu regulacji silnikami asynchronicznymi (z nastawników na przemienniki częstotliwości). Dokonano porównania obu sposobów sterowania zestawiając wyniki badań dla obu technik w postaci charakterystyk czasowych wybranych parametrów [6]: pozycji mostu (rys. 1), prędkości liniowej mostu (rys. 2), kąta wychylenia ładunku w kierunku jazdy mostem (rys. 3), mocy czynnej pobieranej przez układ napędowy mostu (rys. 4). Przykładowe wyniki dotyczą badań przeprowadzonych w mechanizmie jazdy mostu suwnicy pomostowej.

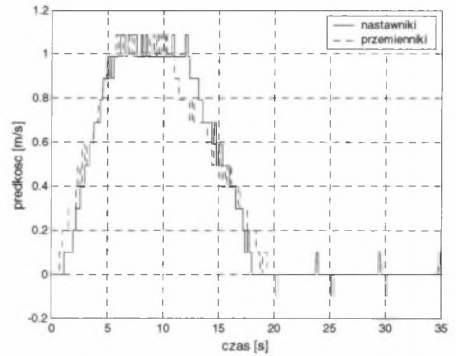
Tablica 1

Zestawienie przemienników częstotliwości zastosowanych w układach napędowych badanej suwnicy

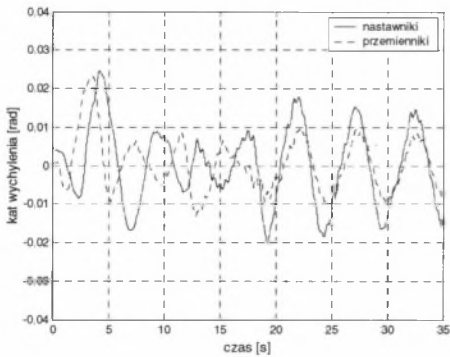
Mechanizm suwnicy	Moc silnika [kW]	Prędkość [obr/min]	Napięcie zasilające [V]	Prąd [A]	Przemiennik częstotliwości (producent, typ)
Jazdy wózka	3	950	380	9/22,5	Nordac SK 400/3CT
Jazdy mostu (dwa silniki po 5,5 kW)	5,5	710	380	16,1/27,8	dwa przemienniki: Mitsubishi FR-A500
Mechanizm podnoszenia głównego	22	720	380	37	ABB ACS600



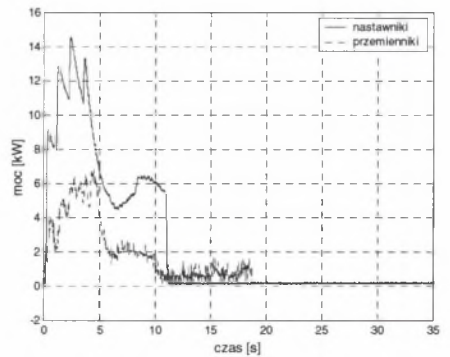
Rys. 1. Pozycja mostu suwnicy
Fig. 1. Position of the crane bridge



Rys. 2. Prędkość jazdy mostu
Fig. 2. Velocity of the bridge



Rys. 3. Kąt wychylenia ładunku
Fig. 3. Swing angle of the load



Rys. 4. Moc pobierana przez mechanizm jazdy mostu
Fig. 4. Power consumed by motors

Przyjęte zostały jednakowe dla obu technik sterowania warunki początkowe pomiaru:

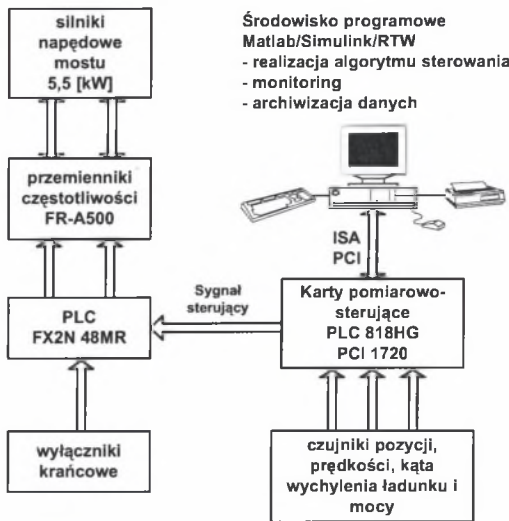
- suwnicę obciążono ładunkiem o masie $m_3 = 10\ 000$ [kg],
- wózek ustawiono w pozycji $x = 0$ [m] – na środku rozpiętości mostu, a ładunek podniesiono na wysokość 4 [m] nad poziomem zero hali (długość cięgna wynosiła $l = 6$ [m]),
- sterowanie ręczne w przypadku obu technik (nastawniki, przemienniki częstotliwości) realizowano przez operatora suwnicy dla podobnych zadanych pozycji, około $y_{zad} = 12,3$ [m].

Analizując wyniki pomiarów stwierdzono poprawę jakości sterowania mechanizmem ruchu mostu w rezultacie zastosowania w jego układzie napędowym przemienników częstotliwości (w porównaniu do układu tradycyjnego z nastawami rezystorowymi). W obu przypadkach suwnica sterowana była przez tego samego operatora. Zapewniona została możliwość płynnego sterowania prędkością i momentem (rys. 2 i rys. 4), co spowodowało znaczne zmniejszenie przeciążeń układu napędowego w stanach nieustalonych pracy urządzenia (rys. 4). W fazie rozruchu przy przełączaniu nastawników zmierzona maksymalna moc pobrana przez układ wyniosła powyżej 14 kW, podczas gdy z użyciem falowników wyniosła ona powyżej 6 kW – uzyskano około 57% mniejszy pobór mocy (rys. 4). Z wykresu mocy (rys. 4) obliczono średnią moc pobraną przez układ napędowy mostu, która dla przejazdu realizowanego nastawnikami wyniosła około 4,3 kW, natomiast dla przejazdu przy sterowaniu przemiennikami częstotliwości około 1,94 kW. W rezultacie zastosowania przemienników częstotliwości uzyskano ponad 50% zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Ponadto łagodniejsza charakterystyka hamowania pozwoliła zmniejszyć wychylenie ładunku zawieszono na linie do 0,01 rad. Podczas hamowania nastawnikami kąt wychylenia ładunku wyniósł około 0,018 rad (rys. 3).

W wyniku przeprowadzonych badań na modelach cyfrowych urządzenia opracowane zostały algorytmy sterowania mechanizmami ruchu suwnicy pomostowej wykorzystujące regulatory PI oraz regulatory rozmyte z wnioskowaniem Takagi-Sugeno-Kanga. Następnie przeprowadzono badania weryfikacyjne zaproponowanych algorytmów na obiekcie rzeczywistym, z wykorzystaniem dwóch platform sprzętowych: komputera pokładowego z kartami interfejsu oraz sterownika programowalnego PLC, na którym zaimplementowany został rozmyty algorytm regulacji z wykorzystaniem standardowych instrukcji sterownika.

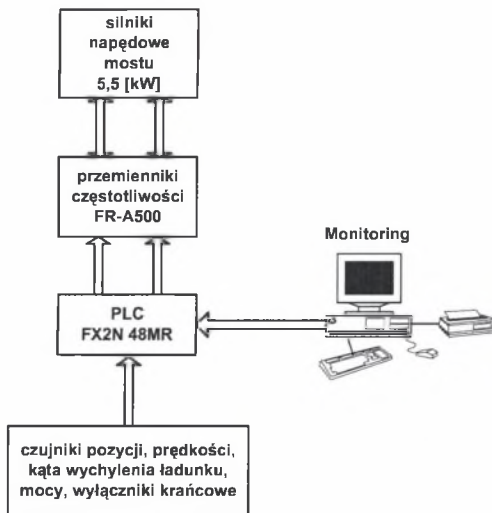
W układzie sterowania z komputerem pokładowym algorytm regulacji realizowany był przez komputer klasy PC wyposażony w karty interfejsu i oprogramowanie Matlab/Simulink/RTW. Układ ten umożliwił zrealizowanie pomiaru za pośrednictwem czujników bieżącej pozycji i prędkości mostu suwnicy, kąta wychylenia ładunku i mocy czynnej pobieranej przez układy napędowe, a ponadto umożliwił sterowanie urządzeniem w czasie rzeczywistym (rys. 5). Zaproponowana platforma sprzętowo-programowa umożliwiła szybkie prototypowanie algorytmów sterowania na obiekcie rzeczywistym.

Kolejnym założonym celem przeprowadzonych badań było wykazanie, że jest możliwe zaimplementowanie opracowanego algorytmu sterowania na sterowniku programowalnym PLC zastosowanym w układzie sterowania podzespołami napędowymi suwnicy pomostowej (rys. 6) oraz że opracowany system sterowania może być stosowany w konfiguracji sprzętowej umożliwiającej przemysłową eksploatację urządzenia. W tym celu napisany i przetestowany został program dla sterownika typu FX2N z wykorzystaniem standardowych instrukcji, który realizował algorytm sterowania rozmytego z wnioskowaniem typu Takagi-Sugeno-Kanga.



Rys. 5. Układ sterowania ruchem mostu suwnicy z komputerem pokładowym realizującym rozmyty algorytm sterowania

Fig. 5. Control system of the crane's bridge movement mechanism with computer board realizing fuzzy control algorithm



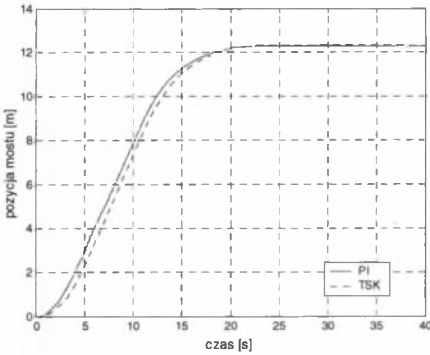
Rys. 6. Układ sterowania ruchem mostu suwnicy z użyciem sterownika programowalnego PLC realizującego rozmyty algorytm sterowania

Fig. 6. Control system of the crane's bridge movement mechanism with PLC realizing fuzzy control algorithm

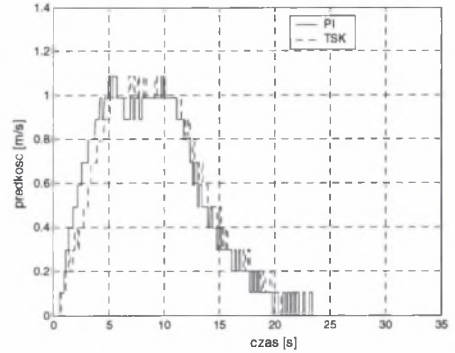
Sterownik PLC w układzie przedstawionym na rys. 6 realizował bezpośrednio sterowanie przeмиennikami częstotliwości. Komputer pokładowy połączony ze sterownikiem PLC zapewniał możliwość monitorowania i zadawania oczekiwanej pozycji w środowisku specjalistycznego oprogramowania.

3. BADANIA ROZMYTEGO UKŁADU STEROWANIA NA OBIEKCIE RZECZYWISTYM

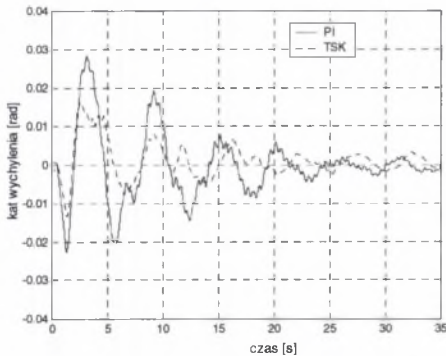
Wyniki eksperymentu na obiekcie rzeczywistym, przeprowadzone dla sterowania z użyciem regulatora typu PI, porównane zostały następnie z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu sterowania rozmytego realizowanego dla tego samego obciążenia, długości cięgien oraz zadanej pozycji 12,3 m. Wyniki obu eksperymentów zestawione zostały na rys. 9, 10, 11 i 12, w postaci charakterystyk: czasowych pozycji i prędkości mostu, kąta wychYLENIA ładunku oraz mocy pobranej przez mechanizm napędowy [6]. Uzyskane wyniki były następnie przedmiotem analizy jakości zastosowanych systemów regulacji (PI i TSK).



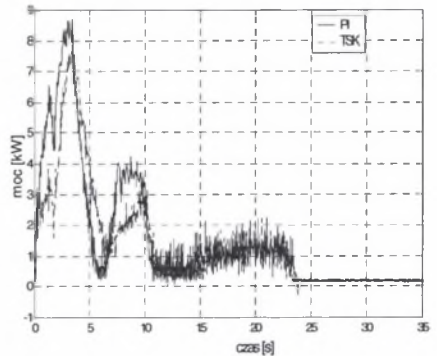
Rys. 7. Pozycja mostu
Fig. 7. Position of the bridge



Rys. 8. Prędkość jazdy mostu
Fig. 8. Velocity of the bridge



Rys. 9. Kąt wychYLENIA ładunku
Fig. 9. Swing angle of the load



Rys. 10. Moc pobierana przez mechanizm jazdy mostu
Fig. 10. Power consumed by motors

W rezultacie zastosowania rozmytego algorytmu regulacji TSK uzyskano lepsze wytłumienie wahań ładunku w fazie rozruchu oraz szybsze jego zminimalizowanie w czasie hamowania w porównaniu z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu regulatora PI. Maksymalne wychylenie ładunku przy sterowaniu z regulatorem typu PI wyniosło około 0,028 [rad], podczas gdy przy zastosowaniu regulatora rozmytego wynosiło 0,016 [rad] – uzyskano poprawę o ok. 43% (rys. 9).

Zastosowanie regulatora TSK zmniejszyło jednocześnie minimalnie przeciążenia w układzie napędowym w fazie rozruchu. Łagodniejszy rozruch urządzenia umożliwił zmniejszenie maksymalnej wartości mocy z około 8,7 kW dla sterowania typu PI do około 7,8 kW (rys. 10) – czyli ponad 10%. Średnia moc pobrana przez układ napędowy wyniosła w przypadku sterowania z regulatorem PI około 2,1 kW, podczas gdy w przypadku sterowania z regulatorem TSK - około 1,84 kW. W rezultacie uzyskano zmniejszenie zużycia energii elektrycznej o ponad 12%. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że możliwa jest poprawa, w porównaniu do regulacji typu PI, sterowania mechanizmami ruchu suwnic pomostowych poprzez zastosowanie regulatora rozmytego.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

W rezultacie przeprowadzonych badań na obiekcie rzeczywistym, tj. na dwudźwigarowej suwnicy pomostowej pracującej w hali produkcyjnej, opracowano algorytm sterowania wykorzystujący wnioskowanie typu TSK. Przeprowadzone eksperymenty na rzeczywistej suwnicy z użyciem regulatora rozmytego porównano z wynikami uzyskanymi dla konwencjonalnego regulatora typu PI. Wyniki badań pozwalają stwierdzić, że w rezultacie zastosowania tak zwanych inteligentnych metod sterowania w układach napędowych suwnicy pomostowej możliwa jest poprawa dokładności ruchów roboczych i niezawodności urządzenia.

Zastosowane i przetestowane układy sterowania z użyciem przemienników częstotliwości, komputera pokładowego z kartami interfejsu i sterownika programowalnego PLC oraz zbudowanego toru pomiarowego pozwalają na realizację algorytmów regulacji w warunkach przemysłowej eksploatacji urządzenia.

Przedstawione badania i próby na rzeczywistej instalacji przeprowadzono we współpracy z firmą PPUH EKO-ENERGIA Sp. z o.o., która posiada zaplecze inżynierskie do realizacji omówionych rozwiązań w praktyce na suwnicach pomostowych.

Literatura

1. Benhidjeb A., Gissinger G.L.: Fuzzy Control of an Overhead Crane Performance Comparison with Classic Control. *Control Engineering Practice*, 1995, Vol. 3, No. 12, pp. 1687-1696.
2. Mahfouf M., Kee C.H., Abbod M.F., Linkens D.A.: Fuzzy Logic-Based Anti-Sway Control Design for Overhead Cranes. *Neural Computing and Applications*, 2000, No. 9, pp. 38-43.
3. Mendez J.A., Acosta L., Moreno L., Torres S., Marichal G.N.: An Application of a Neural Self Controller to an Overhead Crane. *Neural Computing and Applications* 8, pp. 143-150, 1999.
4. Moreno L., Mendez J.A., Acosta L., Torres S., Hamilton A., Marichal G.N.: A self-tuning neuromorphic controller: application to the crane problem. *Control Engineering Practice* 6, pp. 1475-1483, 1998.

5. Pauluk M.: Odporne algorytmy optymalnego i inteligentnego sterowania systemem nieliniowym w czasie rzeczywistym. Praca doktorska, AGH, Kraków 2001.
6. Szpytko J.(Red.): Sprawozdanie z projektu E!RobCrane, AGH, Kraków 2003.
7. Stasik M.: Zastosowanie regulatora rozmytego, PID oraz optymalnego w systemie wahań na suwnicy w środowisku Matlab-Simulink. Konferencja nt.: Metody Aktywnej Redukcji Drgań i Hałasu, Krakow-Krynica, maj 2001, s. 309-316.

Recenzent: Dr hab. inż. Manfred Chmurawa