

JAN GRUDZIECKI, PIOTR MALENTA, JERZY UCIŃSKI

Politechnika Łódzka
Zakład Maszyn Roboczych i Napędów Hydraulicznych

BADANIA EKSPERYMENTALNE MECHANIZMÓW DŹWIGNIC Z NAPĘDEM FALOWNIKOWYM

Słowa kluczowe: dźwignice, napęd, sterowanie, falownik, badania eksperymentalne.

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań, sterowanych programowo, elektro-mechanicznych napędów dźwignic. Zamieszczone zostały rezultaty badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla mechanizmu jazdy i mechanizmu podnoszenia suwnicy pomostowej. Wymienione mechanizmy zaopatrzone w układy napędowe, w których silnik indukcyjny zwarty zasilany jest z przetwornicy częstotliwości i sterowany programowo. Badania przeprowadzone zostały na obiekcie rzeczywistym – laboratoryjnej suwnicy pomostowej. Rejestrowano przebiegi prędkości i przemieszczeń realizowanych przez napędy w odpowiedzi na zadawany sygnał sterujący.

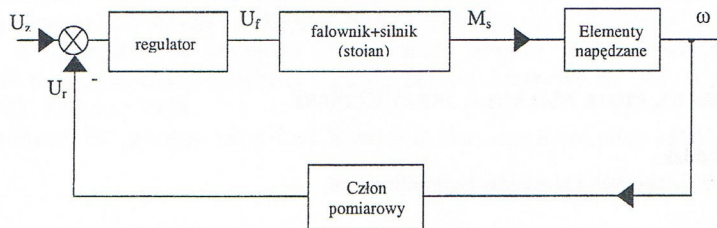
1. UKŁAD STEROWANIA

Większość pracujących obecnie maszyn dźwigowych wyposażonych jest w elektro-mechaniczne układy napędowe coraz częściej sterowane elektronicznie. Rozwój układów mikroprocesorowych, jaki dokonuje się w ostatnich latach, a zwłaszcza wzrost szybkości obliczeń i transmisji danych umożliwia powstawanie systemów automatyzujących pracę maszyn. W dźwignicach systemy te pojawiły się w pierwszej kolejności dla suwnic pomostowych i bramowych, a obecnie są instalowane także w układach napędowych żurawi.

Nowocześnie konstruowane maszyny muszą być wyposażone w odpowiednie napędy wraz z układem sterowania, które umożliwią realizację odpowiednio zaprogramowanych przebiegów prędkości w całym cyklu roboczym oraz zatrzymanie transportowanego ładunku w zadanym położeniu. Ponadto układ sterowania musi zapewnić sterowanie prędkością oraz

przemieszczeniem członu końcowego mechanizmu w sposób ciągły z możliwością korekcji sygnału przez pętle sprzężeń zwrotnych.

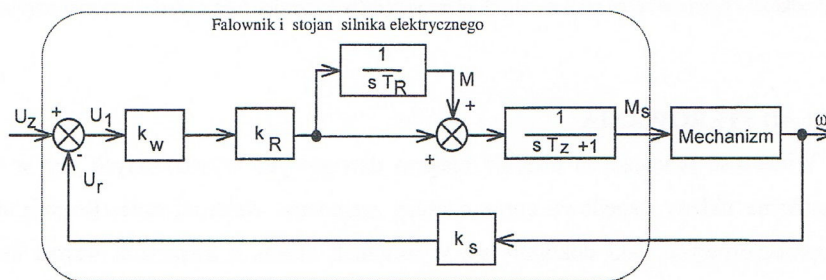
W przypadku regulacji prędkości schemat sterowanego, elektro-mechanicznego układu napędowego wygląda jak na rys. 1. Sygnał sterujący U_z , proporcjonalny do żądanej prędkości napędzanych elementów, po porównaniu z sygnałem U_r (odpowiadającym prędkości rzeczywistej) trafia jako U_f do przetwornicy częstotliwości zasilającej silnik.



Rys. 1. Schemat blokowy układu regulacji

W ogólnym przypadku pętla sprzężenia zwrotnego dotyczyć może oprócz prędkości również przemieszczenia lub innych wielkości fizycznych. W zależności od tego zmieniać się będzie struktura stosowanego regulatora.

Prowadzone w Zespole MRiNH PŁ badania układów sterowania dla napędów elektro-mechanicznych doprowadziły do opracowania modelu podukładu regulator – falownik – stojan silnika elektrycznego, którego schemat przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat podukładu falownik – silnik

Na powyższych rysunkach oznaczono m.in.:

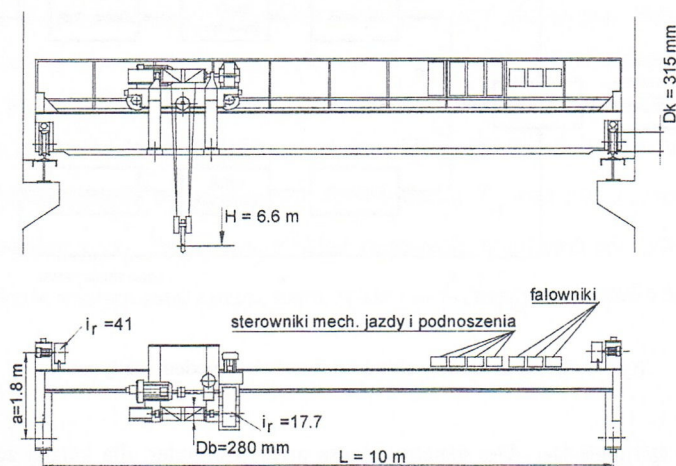
- U_z – sygnał sterujący,
- U_1 – napięcie wchodzące na regulator prędkości,
- M_s – moment silnika,

ω – prędkość kątowa mechanizmu,
 k_W – współczynnik wzmocnienia układu,
 k_R – współczynnik wzmocnienia regulatora prędkości,
 k_S – współczynnik skalujący w torze sprzężenia zwrotnego prędkości,
 T_R – stała czasowa regulatora,
 T_Z – zastępcza stała czasowa podukładu.

Model ten został zbadany, zidentyfikowany a następnie wykorzystany w układach napędowych na stanowiskach doświadczalnych oraz w rzeczywistych maszynach [2], [3], [5]. Przeprowadzone badania eksperymentalne dotyczyły mechanizmów jazdy mostu i wózka oraz mechanizmu podnoszenia suwnicy. Kolejne mechanizmy maszyn roboczych opracowane zostały na drodze symulacyjnej.

2. BADANIA MECHANIZMU JAZDY SUWNICY

Wykorzystanie suwnicy pomostowej w automatycznym systemie transportowym, wymaga zastosowania komputera pokładowego, sterującego pracą maszyny i często powiązanego z komputerem nadrzędnym. System czujników zapewniać musi informacje o położeniu ładunku w przestrzeni transportowej. Otrzymujemy w ten sposób urządzenie, które niektórzy autorzy określają jako suwnicę IV generacji [4].



Rys. 3. Schemat suwnicy laboratoryjnej

W przypadku mechanizmu jazdy suwnica wyposażona została w napęd indywidualny każdej z czołownic, w którym silniki indukcyjne sterowane są z osobnych przetwornic

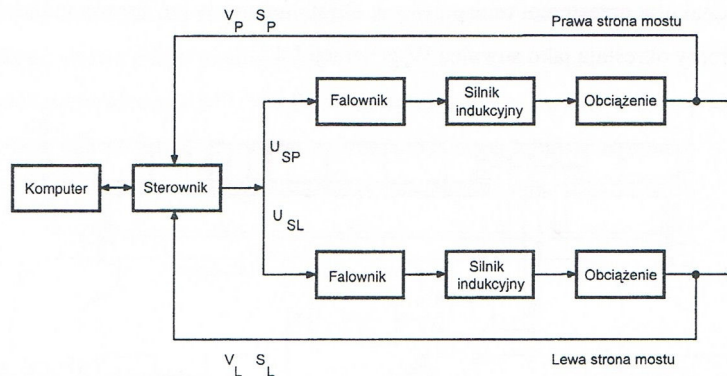
częstotliwości. Ciągły pomiar prędkości i przemieszczenia każdej z czołownic umożliwia m.in. likwidację ukosowania mostu suwnicy bez ingerencji operatora.

Wykorzystana do badań eksperymentalnych suwnica została przedstawiona na rys. 3. Posiada ona następujące parametry:

- udźwig $Q = 50 \text{ kN}$,
- rozpiętość mostu $L_M = 10 \text{ m}$,
- wysokość podnoszenia $H = 6.6 \text{ m}$.
- prędkość jazdy $V = 34 \text{ m/min}$,
- silniki mechanizmu jazdy – klatkowe z wbudowanym hamulcem, typ: 1LC5090 4EC21, $N_{ZN} = 1.1 \text{ kW}$, $n_{ZN} = 1410 \text{ obr/min}$,
- falowniki dla mechanizmów jazdy – typ ING 3 43P7 firmy BEVI.

Indywidualne napędy jazdy mostu wykonano w postaci modułów napędowych. Po każdej stronie mostu, na wale koła napędzanego zawieszony został motoreduktor, połączony sztywnym łącznikiem z czołownicą.

Schemat ideowy układu sterowania mechanizmu jazdy suwnicy przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat ideowy układu sterowania napędem jazdy mostu

Sygnały sterujące U_{SL} , U_{SP} generowane są przez komputer, dla każdej ze stron mostu osobno. Są one proporcjonalne do zadawanych prędkości ruchów roboczych. Na bieżąco odbywa się pomiar prędkości czołownic V_L , V_P oraz ich przemieszczenia S_L , S_P .

Zaproponowany i przedstawiony na rys. 4. układ napędowy wraz z układem sterowania mechanizmów jazdy suwnicy pomostowej został zrealizowany w Zespole MRiNH PŁ na obiekcie rzeczywistym [5], [6].

W przedstawianych badaniach eksperymentalnych mechanizmu jazdy cykl pracy obejmował rozruch, ruch ustalony i hamowanie do zatrzymania w zadanym położeniu na torze. Pomiar położenia mostu suwnicy dokonywany był poprzez określenie położenia lewej i prawej czołownicy.

Dla poszczególnych ruchów roboczych mostu rejestrowano, dla obu jego stron, odpowiednie przebiegi czasowe następujących wielkości fizycznych:

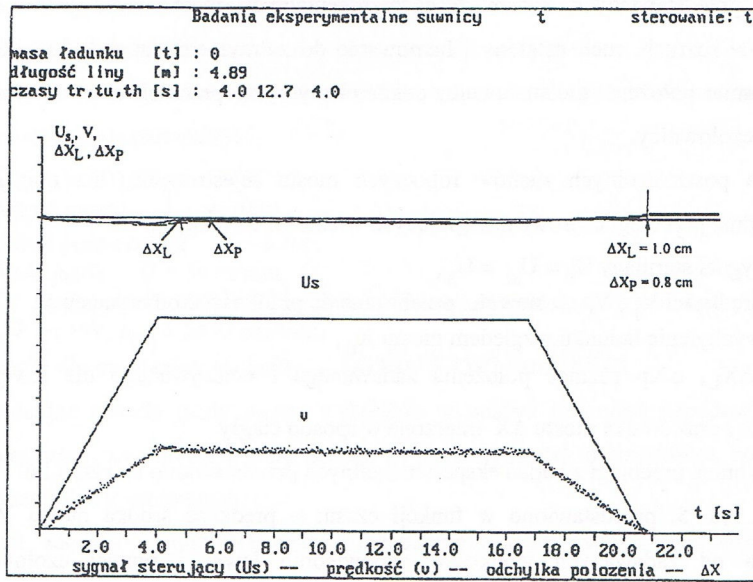
- sygnał sterujący $U_s = U_{SL} = U_{SP}$
- prędkości V_p, V_L czołownic, przeliczane do prędkości środka mostu V ,
- wychylenie ładunku względem mostu X_Q ,
- $\Delta X_L, \Delta X_P$ różnice położenia zadanego i rzeczywistego dla lewej i prawej

czołownicy oraz środka mostu ΔX mierzone w sposób ciągły.

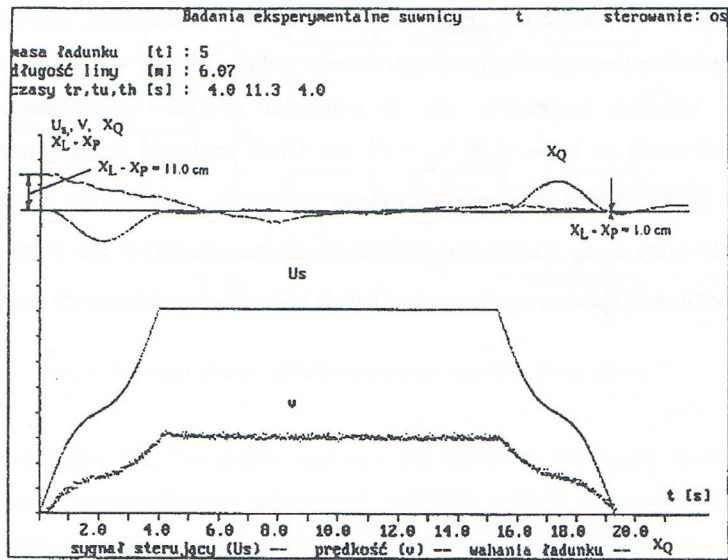
Wybrane przebiegi z badań eksperymentalnych przedstawiono na rys. 5 i 6.

Na rys. 5. przedstawiono w funkcji czasu: – prędkość środka mostu V , odchyłki położenia od zadanonych wielkości, odpowiednio lewej i prawej czołownicy $\Delta x_L, \Delta x_p$. Zastosowano trapezowy przebieg sygnału sterującego U_s w zadanym cyklu pracy przy suwnicy nieobciążonej. Czas trwania ruchu ustalonego jazdy wynikał z zadanego przemieszczenia mostu przy założonych czasach rozruchu i hamowania.

Na rys. 6. przedstawiono przypadek ruchu suwnicy obciążonej, sterowanej według funkcji optymalnej tzn. zapewniającej wytlumienie wahań ładunku w zadanym cyklu pracy. Do badań wybrano przypadek, gdy w położeniu początkowym występuje znaczne przekoszenie mostu na torze, tj. $x_L - x_p = 11$ cm. Obok prędkości środka mostu i sygnału sterującego przedstawiono względne wychylenie ładunku X_Q oraz różnicę położenia lewej i prawej czołownicy $x_L - x_p$. Zastosowany układ sterowania umożliwia nie tylko wytlumienie wahań ładunku w miejscu zatrzymania suwnicy ale i likwidację przekoszenia mostu (rys.6).



Rys. 5. Badania eksperymentalne suwnicy.
 Suwnica nieobciążona, wymuszenie trapezowe



Rys. 6. Badania eksperymentalne suwnicy.
 Suwnica obciążona, wymuszenie optymalne, początkowe przekoszenie mostu

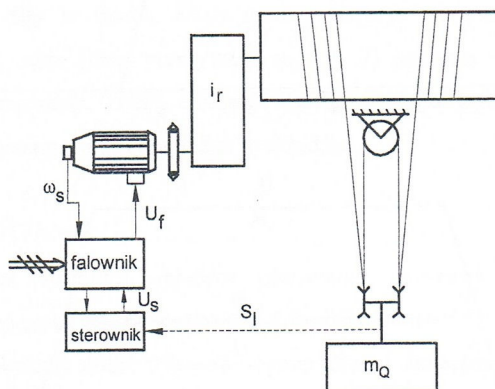
3. BADANIA MECHANIZMU PODNOSZENIA SUWNICY

Przedstawione wcześniej układy regulacji zastosowano również w mechanizmie podnoszenia opisanej suwnicy. Jak wiadomo napędy wciągarek charakteryzują się następującymi cechami:

- rozruch pod obciążeniem,
- praca przerywana, z dużą ilością włączeń,
- zmienne obciążenie w kolejnych cyklach pracy,
- obciążenie silnika wciągarki momentem czynnym przy opuszczaniu,
- konieczność utrzymania w spoczynku ładunku zawieszonoego na haku.

Zwłaszcza ostatnia cecha powoduje, że zastosowanie przetwornic częstotliwości w mechanizmach podnoszenia było trudniejsze w realizacji. Dopiero pojawienie się falowników wyposażonych w system „vector”, umożliwiający rozwijanie przez silnik momentu napędowego przy zerowych obrotach pozwoliło na praktyczne wykonanie układów sterowania zgodnych z rys. 1 i 2.

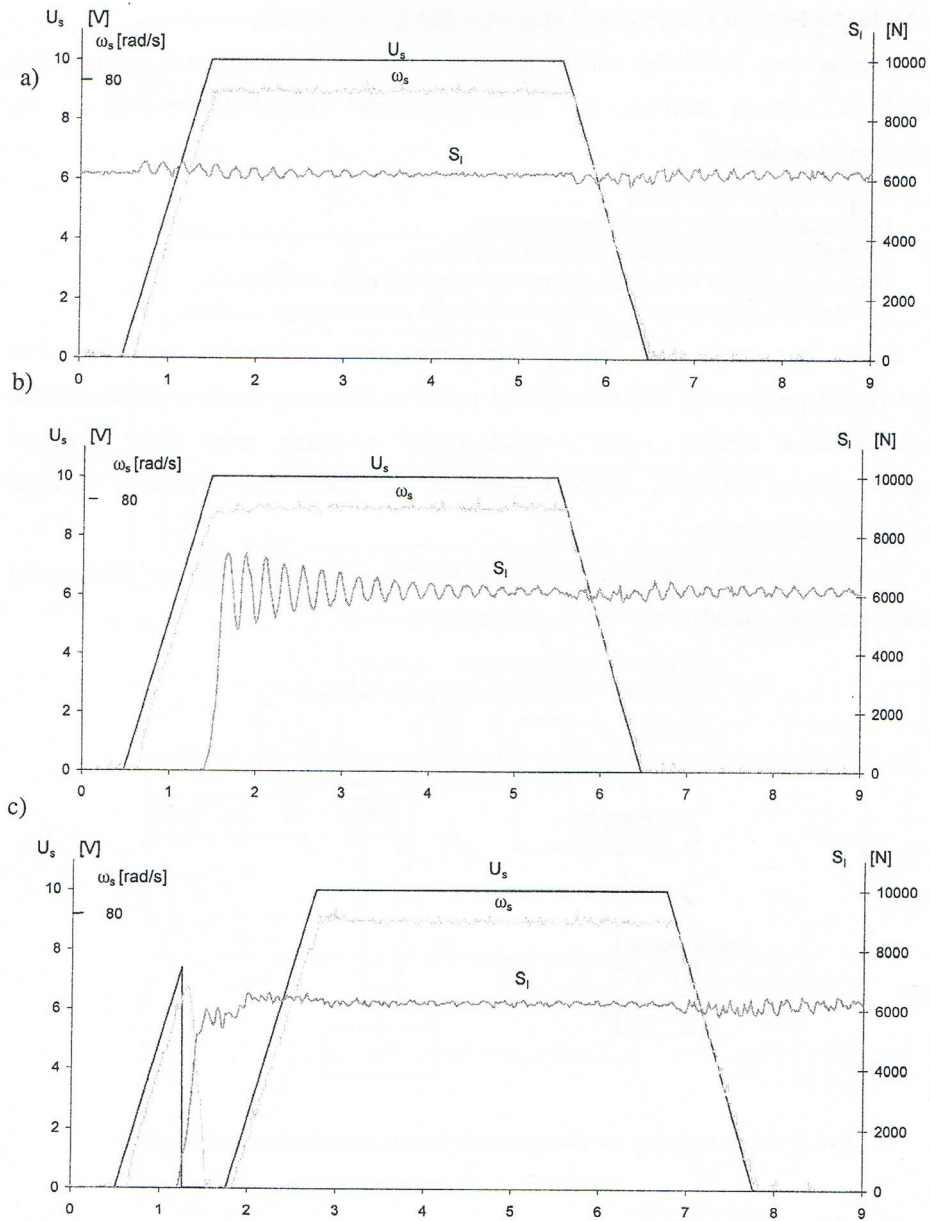
Zrealizowany na obiekcie rzeczywistym schemat układu napędowego mechanizmu podnoszenia wraz z układem sterowania przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat ideowy układu sterowania napędem mechanizmu podnoszenia

Charakterystyka napędu:

- silnik – klatkowy 3SLg180L8,
 $N_{zn} = 11 \text{ kW}$, $n_{zn} = 725 \text{ obr/min}$,
- falownik – typ VARISPEED 616G5 firmy YASKAWA,
- prędkość podnoszenia $V_p = 0.62 \text{ m/s}$.



Rys. 8. Badania eksperymentalne mechanizmu podnoszenia

a) podnoszenie z napięciem węża,

b) podrywanie ładunku,

c) podrywanie ładunku z zastosowaniem czujnika przeciążenia

Na wale silnika elektrycznego umieszczone jest sprzęgło hamulcowe. Hamulec zapada jedynie w czasie postoju. Samo hamowanie wstrzymujące i zatrzymujące realizowane jest przez falownik i silnik.

W badaniach podnoszono ładunek $Q = 25$ kN z prędkością $0,6$ m/s. Cykl pracy obejmował tylko podnoszenie ładunku.

Rejestrowano następujące wielkości:

- sygnał sterujący U_s
- prędkość kątową silnika ω_s ,
- siłę w linach S_L .

Przykładowy przebieg podnoszenia ładunku z napiętą więzią przedstawiono na rys. 8 a. Na rys. 8 b przedstawiono przypadek podnoszenia z tzw. podrywaniem ładunku. Widoczne jest tu wyraźne przeciążenie w układzie linowym sięgające 30% przy połowie nominalnego obciążenia. Zjawisko to jest niekorzystne dla trwałości samego mechanizmu, a może też być niekorzystne dla podnoszonego ładunku. W praktyce, przy sterowaniu ręcznym operator stara się nie dopuścić do podrywania poprzez wstępne uniesienie ładunku przy niewielkiej prędkości. W układach automatycznego sterowania możliwe jest stworzenie układu z pomiarem wartości siły w linach, który miałby na celu stwierdzenie faktu poderwania ładunku. Sprzężenie takie (linia przerywana na rys. 7) pozwala na znaczne ograniczenie przeciążeń w mechanizmie. Efekt działania takiego układu przedstawiono na rys. 8 c. Widoczny jest praktyczny zanik przeciążeń w układzie.

4. PODSUMOWANIE

Zaproponowana struktura układów sterowania umożliwia prawidłowe działanie mechanizmów jazdy i podnoszenia z napędem falownikowym.

Badania potwierdziły dobre własności dynamiczne i statyczne zastosowanych układów regulacji.

Dla mechanizmów jazdy suwnicy zaobserwowane uchyby położenia członów końcowych mechanizmów po zakończeniu cyklu pracy osiągają przeciętne wartości rzędu 2 cm. Na wartość uchybu duży wpływ mają luzy występujące w układzie mechanicznym oraz zakłócenia w torze pomiarowym.

Zastosowany dla mechanizmu jazdy układ regulacji, umożliwiający sterowanie ruchem każdej z czołownic oddzielnie, pozwala na szybką eliminację zarówno początkowego, jak i pojawiającego się w czasie jazdy zukosowania suwnicy.

Przeprowadzone badania dotyczące mechanizmu podnoszenia wskazują na celowość pracy w cyklu automatycznym. Pozwala to zredukować przeciążenia w układzie oraz umożliwia pozycjonowanie ładunku.

Prowadzone są dalsze prace dotyczące wpływu struktury regulatora na dynamikę mechanizmu podnoszenia, zmierzające do całkowitej eliminacji przeciążeń. Zastosowanie dodatkowo regulatora stałej mocy umożliwi zwiększenie wydajności pracy poprzez wzrost prędkości ruchów roboczych.

LITERATURA

1. Bednarski S., Cink J., Malenta P., Pozycjonowanie ładunku w ruchu roboczym wciągarki bębnowej z napędem falownikowym. IV Konferencja – Okrętownictwo i Oceanotechnika. Międzyzdroje 1998.
2. Grudziecki J., Wpływ wybranych parametrów układu jazdy na dokładność pozycjonowania mostu suwnicy. Praca doktorska. Łódź 1998.
3. Grudziecki J., Kosucki A., Uciński J., Pozycjonowanie suwnicy sterowanej automatycznie. Część II. Badania doświadczalne układu sterowania mechanizmu jazdy. VIII Konferencja – Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych. Zakopane, styczeń 1995.
4. Murata I., Nakajima M., Automatic control system of container crane. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C. August 1993.
5. Tomczyk J. i in. Automatyzacja sterowania suwnicy do przeładunku kontenerów. Sprawozdanie z realizacji Projektu Badawczego KBN nr 7 7016 9203. Łódź – Bytom 1994.
6. Tomczyk J. i in. Badania dynamiki maszyn dźwigowo transportowych sterowanych za pomocą mikroprocesorów. Sprawozdanie z realizacji Projektu Badawczego KBN nr 7 T07C 02809. Łódź 1997.

THE EXPERIMENTAL TESTS OF THE CRANES MECHANISMS EQUIPPED WITH THE FREQUENCY CONVERTERS

Summary

The paper presents the results of the tests provided for the electro-mechanical drives of heavy working machines. The experimental tests have been done for both the traversing and hoisting mechanisms. These drives were equipped with the squirrel-cage motors and programmable frequency converters. The tests were provided on the laboratory overhead travelling crane. The signals of the speed, displacement and command signals were gathered.