

Metody rozwiązywania problemów automatyzacji sterowania dźwignicami

JERZY TOMCZYK
JACEK CINK

ANDRZEJ KOSUCKI

Zakład Maszyn Roboczych i Napędów Hydraulicznych Instytutu Konstrukcji Maszyn Politechniki Łódzkiej zajmuje się badaniami związanymi z automatyzacją pracy dźwignic. Przeprowadzone w ostatnich latach badania umożliwiły rozwiązanie większości zasadniczych problemów eksploatacyjnych dźwignic za pomocą sterowania numerycznego ich mechanizmami. Rozwiązano problemy dotyczące pozycjonowania i stabilizacji ruchu ładunku, eliminując jego wahania po okresach rozruchu i hamowania, ukosowaniem mostów suwnic oraz automatycznym prowadzeniem ładunku według zaplanowanej trasy [1–3]. Zastosowane w mechanizmach podnoszenia układy regulacji stałej mocy umożliwiają lepsze wykorzystanie mocy dyspozycyjnej tych mechanizmów [2, 4]. Jednocześnie zastosowane układy regulacji położenia i odpowiedni sposób sterowania rozruchem mechanizmów podnoszenia umożliwiły zmniejszenie obciążeń dynamicznych maszyn przy podnoszeniu ładunków [3, 4]. Sterowanie numeryczne i posiadane w związku z tym dane umożliwiają prowadzenie statystyki pracy maszyny przydatnej do oceny przeprowadzonych prac transportowych oraz oceny stanu eksploatacyjnego maszyny w odniesieniu do zakładanych dla niej obciążeń normowych [5]. W pracach badawczych położono duży nacisk na prostotę rozwiązań układów napędowych, sterowniczych oraz zbierania danych statystycznych, co sprzyja niezawodności i bezpieczeństwu, a także ekonomicznej pracy maszyn dźwigowych.

Zastosowane i zbadane do tej pory układy sterowania numerycznego umożliwiły rozwiązanie problemów eksploatacyjnych dźwignic pracujących w zamkniętych pomieszczeniach bez konieczności stosowania ruchów nawrotnych mechanizmów [6]. Cecha ta jest szczególnie istotna w eksploatacji maszyn o dużych wymiarach i masach. Zasadniczym problemem przy prowadzeniu i pozycjonowaniu ładunków dźwignicami pracującymi na wolnym powietrzu jest kompensacja zakłóceń wywołanych działaniem wiatru. Koncepcja układu kompensacyjnego, badanego aktualnie na stanowisku eksperymentalnym, zakłada pomiar parametrów wiatru i na tej podstawie określanie kierunku i siły wiatru działającego na ładunek [7, 8]. Zdawano sobie przy tym sprawę, że taki sposób określania sił działających na ładunek obarczony będzie zawsze pewnym błędem związanym z usytuowaniem czujników pomiaru wiatru względem samego ładunku, zróżnicowanym kształtem przenoszonych ładunków oraz miejscowymi zakłóceniami strugi wiatru. Poszukiwane są zatem rozwiązania, które umożliwiłyby zastąpienie pomiaru parametrów wiatru przez pomiar wychyleń ładunku przy spełnieniu podstawowego

założenia realizacji ruchu transportowego: uniknięcia konieczności wykonywania ruchów nawrotnych mechanizmów w cyklu roboczym obejmującym przeniesienie ładunku z punktu odbioru do punktu dostawienia.

W artykule syntetycznie przedstawione zostaną metody pracy nad automatyzacją sterowania maszyn dźwigowych oraz rezultaty tych prac, które umożliwiają rozwinięcie dalszych badań nad automatyzacją dźwignic.

Syntetyczne podsumowanie metodyki rozwiązań problemów automatyzacji dźwignic

Wykonane dotychczas prace badawcze w zakresie automatyzacji sterowania maszyn dźwigowych obejmowały rozwiązania następujących problemów eksploatacyjnych dźwignic:

- eliminacja wahań ładunku po okresach rozruchu i hamowania,
- pozycjonowanie ładunku w transporcie poziomym,
- optymalizacja czasu transportu,
- kompensacja ukosowania mostów suwnic,
- pozycjonowanie ładunku w transporcie pionowym,
- wykorzystanie mocy dyspozycyjnej mechanizmów podnoszenia,
- zmniejszenie obciążeń dynamicznych maszyn przy podnoszeniu ładunków,
- kompensacja zakłóceń wywołanych wiatrem.

• Eliminacja wahań i pozycjonowanie ładunku w transporcie poziomym

Problem eliminacji wahań ładunku po okresach rozruchu i hamowania danego cyklu roboczego maszyny rozwiązano za pomocą wyznaczania kształtu funkcji sterowania prędkością ruchów poziomych mechanizmów w tych okresach. Czasy rozruchu i hamowania przyjmowano na podstawie danych eksploatacyjnych oraz warunku zachowania sprzężenia ciernego między kołami napędowymi i szyną. Kształt zmian prędkości ruchu w tych okresach określany był w procesie optymalizacji. W procesie tym obliczany jest taki kształt funkcji sterowania prędkością, aby wskaźniki jakości sterowania po okresach rozruchu i hamowania osiągały minimalne wartości. Przy założonym uproszczeniu, że wiszący na linach ładunek jest wahadłem matematycznym z punktem podwieszenia poruszającym się ruchem prostoliniowym, wskaźnik jakości sterowania odpowiedzialny za wytłumienie wahań ładunku po okresie rozruchu ma postać:

$$W_r = \frac{1}{2} \cdot m_Q \cdot (v_{Or} - v_u)^2 + \frac{1}{2} \cdot c_Q \cdot (x_{Or} - x_u)^2 \quad (1)$$

gdzie:

- m_Q – masa podwieszonoego ładunku,
- v_{Or} – składowa pozioma prędkości ładunku na koniec okresu rozruchu,

Dr hab. inż. Jacek Cink i dr inż. Andrzej Kosucki są pracownikami Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej, a prof. dr hab. inż. Jerzy Tomczyk jest pracownikiem tego wydziału i OBRDiUT „Detrans” – Bytom.



v_u – składowa pozioma prędkości ładunku w ruchu ustalonym,
 c_Q – sztywność poziomego zawieszenia ładunku,
 x_{Qr} – poziome wychylenie ładunku na koniec okresu rozruchu,
 x_u – poziome wychylenie ładunku w ruchu ustalonym.

Przyjęcie wskaźnika jakości w takiej postaci oznacza minimalną względną energię kinetyczną i potencjalną ładunku po zakończeniu rozruchu, co jest równoznaczne z wytłumieniem jego wahań względem punktu podwieszenia.

Dla hamowania układu wskaźnik jakości sterowania przyjmuje postać:

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

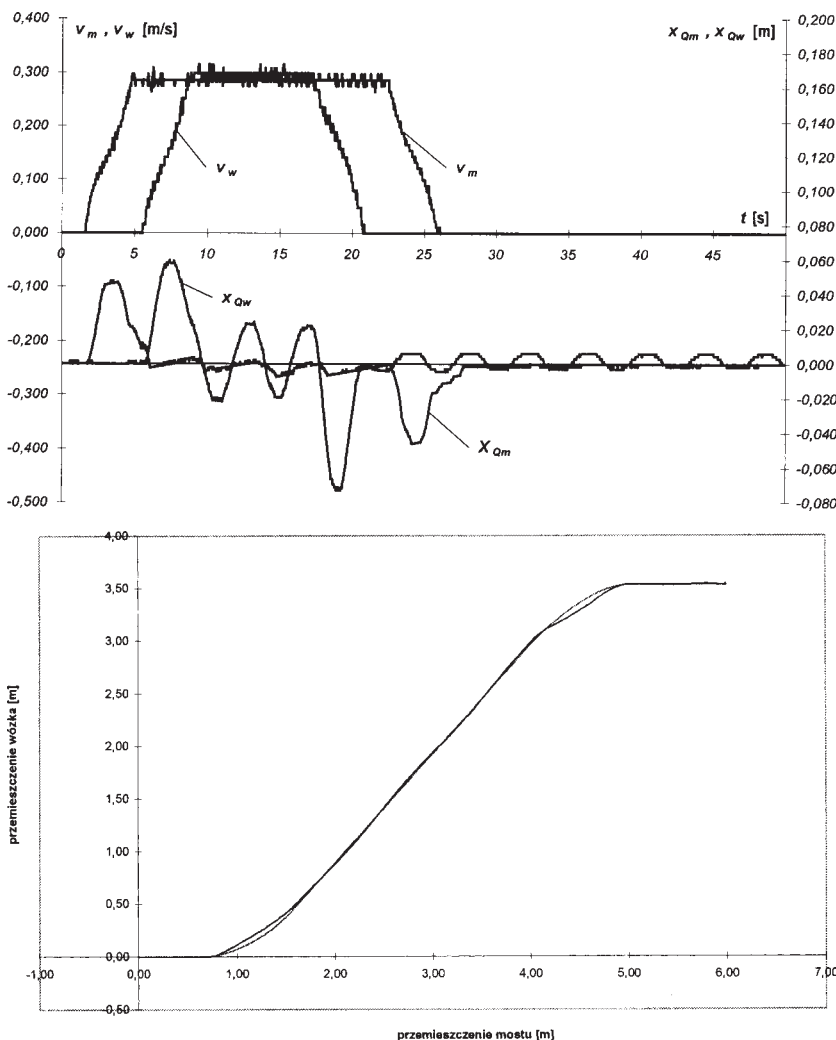
gdzie:

v_{Qk} – składowa pozioma prędkości ładunku po zatrzymaniu,

x_{Qk} – poziome wychylenie ładunku po zatrzymaniu.

Minimalizacja powyższego wskaźnika jakości oznacza bliską zeru energię kinetyczną i potencjalną ładunku, czyli minimalizację jego wahań po okresie hamowania.

Przedstawiona dla prostego przykładu wahadła poruszającego się ruchem liniowym metoda jest

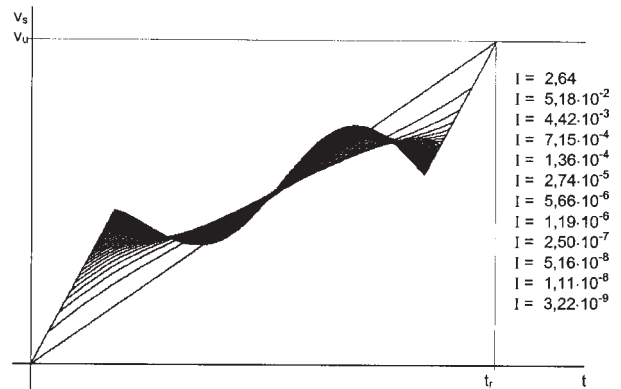


ogólna i znajduje zastosowanie również dla bardziej złożonych układów podwieszonych ładunków występujących w dźwignicach. Wskaźniki jakości sterowania określone przy jej użyciu przyjmą wówczas jedynie bardziej złożoną postać.

Na rys. 2 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych złożonych ruchów mechanizmów jazdy mostu i wózka suwnicy pomostowej, obrazujące przebieg prędkości jazdy tych mechanizmów dla cyklu transportowego realizowanego początkowo za pomocą jazdy mostu, a następnie z włączeniem także jazdy wózka bez przerywania ruchu jazdy mostu. Ładunek jest dostarczony do punktu odbioru, w tym przypadku na drodze linii łamanej. Widoczne jest skuteczne wytłumienie wahań ładunku po okresach rozruchu obydwu mechanizmów oraz po zatrzymaniu układu, zgodnie z funkcją sterującą prędkościami mechanizmów.

Efektywność tłumienia wahań ładunku, a zatem rzeczywista jakość sterowania metodą, którą można nazwać „sterowaniem za pomocą kształtu funkcji wymuszającej”, zależy od dokładności modelu dynamicznego układu. W

Rys. 2. Przebiegi prędkości mechanizmów i wychylenia ładunku w cyklu transportowym wzdłuż linii łamanej



Rys. 1. Proces poszukiwania funkcji optymalnej prędkości ruchu w okresie rozruchu

Proces poszukiwania funkcji optymalnej rozpoczyna się od założonej funkcji liniowej wynikającej z przyjętego czasu rozruchu i wartości prędkości w ruchu ustalonym. W procesie optymalizacji wyznaczane są kolejne kształty funkcji aż do osiągnięcia minimalnego wskaźnika jakości sterowania.

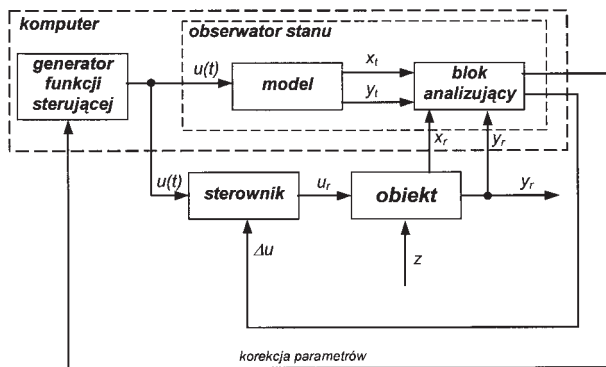
Proces poszukiwania funkcji optymalnej rozpoczyna się od założonej funkcji liniowej wynikającej z przyjętego czasu rozruchu i wartości prędkości w ruchu ustalonym.



typowych warunkach transportowych skuteczność metody może być uznana za wystarczającą. Powstaje jednak pytanie o metodę podwyższania rzeczywistej jakości sterowania dla takich przypadków eksploatacyjnych, które wymagać będą podwyższonej efektywności tłumienia.

Analiza możliwych do zastosowania rozwiązań prowadzi do wniosku, że podwyższenie efektywności tłumienia winno być osiągane przez możliwe do przyjęcia dla rozwiązań w czasie rzeczywistym podwyższenie dokładności modelu dynamicznego przy jednoczesnym wprowadzeniu obserwatora stanu z zadaniem korekcji funkcji sterującej. Chodzi bowiem o utrzymanie założenia braku ruchów nawrotnych (niezmienności kierunku prędkości mechanizmów).

Na rys. 3 przedstawiono propozycję takiego układu sterowania w postaci schematu blokowego.



Rys. 3. Schemat blokowy układu z obserwatorem stanu

Obserwator stanu koryguje wektor sygnału sterującego na podstawie otrzymywanych informacji o aktualnych wartościach teoretycznych i rzeczywistych wybranych zmiennych stanu i zmiennych wyjściowych. Zasadniczym problemem rozwiązania takiego układu jest opracowanie metody wyznaczenia wektora $\Delta u(t)$, co wymaga badań teoretycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych konkretnych układów dynamicznych maszyn dźwigowych. Można zauważyć, że zaproponowana metoda nawiązuje do stosowanej w układach sterowania metody obserwatora niedostępnych zmiennych stanu z możliwością wprowadzenia logiki stosowanej w sterowaniu rozmytym. Pierwsze badania tego typu układu zastosowane dla rozwiązań problemu korekcji zakłóceń wywoływanych wiatrem przyniosły już zupełnie dobre rezultaty.

Metoda osiągnięcia założonego punktu dostawienia ładunku (pozycjonowania w transporcie poziomym) jest bardzo prosta. Rozpatrzmy przykładowo przemieszczenie ładunku tylko za pomocą jazdy mostu z eliminacją wahań ładunku. Mamy narzucone wartości całkowitego przemieszczenia mostu x_{mc} , prędkości w ruchu ustalonym v_u oraz czasu rozruchu t_r i hamowania t_h , z określonymi już kształtami prędkości. W takim przypadku problem pozycjonowania w określonym punkcie dostawienia ładunku sprowadza się do wyznaczenia czasu ruchu ustalonego t_u na podstawie zależności:

$$t_u = \frac{x_{mc} - \int_0^{t_r} v \cdot dt - \int_0^{t_h} v \cdot dt}{v_u} \quad (3)$$

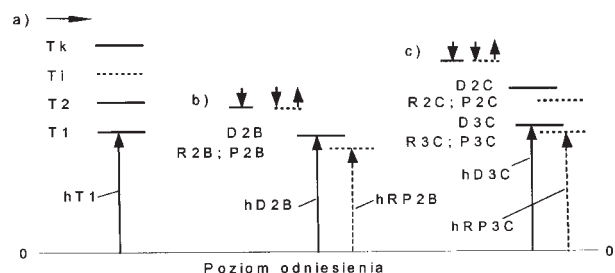
Należy jednak zaznaczyć, że metoda ta – oprócz oczywistego założenia transportu ładunków wzdłuż linii prostych (także w przypadku maszyn z mechanizmami obrotu) – wymaga znajomości rzeczywistych współrzędnych mechanizmów transportu poziomego. W przypadku torowych ruchów jezdnych, w których występuje sprzężenie cierne pomiędzy kołami napędowymi i szyną, a pomiar przemieszczeń odbywa się na podstawie obrotu kół jezdnych, mechanizmy jazdy muszą być wyposażone w układ korekcji współrzędnych. Korekcja taka jest niezbędna okresowo nie tylko ze względu na występujące mikropoślizgi na kołach, ale także ze względu na możliwość narastania błędów w układzie pomiaru przemieszczenia, który nie jest tutaj układem zderminowanym. Również i w tym przypadku można zbadać możliwość zastosowania obserwatora stanu dla ewentualnego podwyższenia dokładności pozycjonowania ładunków w transporcie poziomym.

• Optymalizacja czasu i wybór drogi transportu

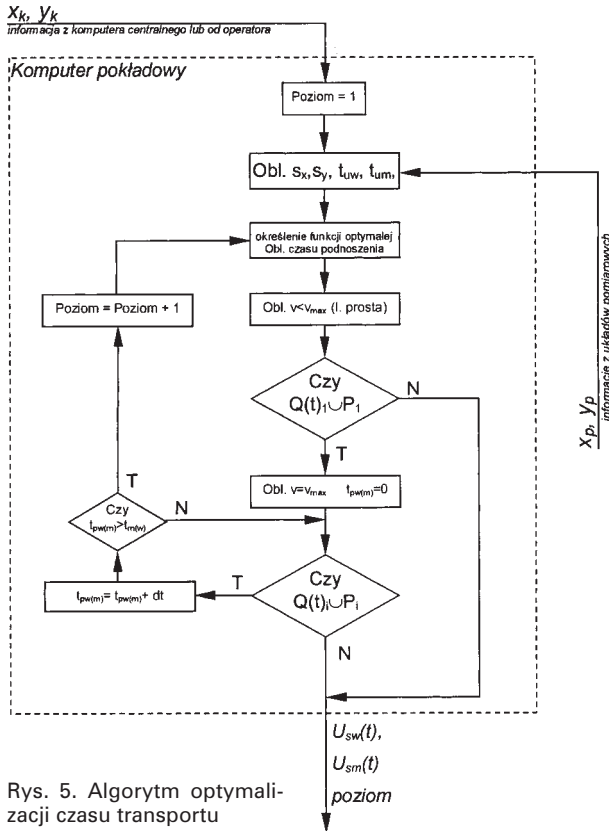
W systemie transportu automatycznego i pół-automatycznego przewiduje się możliwość określenia i wprowadzenia do programu zarządzania transportem punktów odbioru i dostawienia ładunków, których parametry są wprowadzone do programu sterowania transportem. Zaprogramowane są poziomy przemieszczania ładunku i zawiesia, poziomy dostawienia ładunku oraz podwieszania i rozłączania zawiesia. Przykład określania odpowiednich poziomów przedstawiony jest na rys. 4.

Na rys. 4a widoczne są zaprogramowane poziomy transportu poziomego ładunków i zawiesia T_i ($i = 1 \dots k$). Wybór liczby poziomów zależy od zakładanej technologii transportu w danej przestrzeni transportowej i zaprojektowanego procesu optymalizacji czasu transportu. Dla każdego typu ładunku oznaczonego odpowiednim numerem oraz stanowisk dostawienia ładunków określa się poziomy dostawienia oraz rozłączania i przyłączania ładunków. Na rys. 4b przedstawiono przykład określenia poziomu D dostawienia ładunku 2 na stanowisku B oraz poziomowi rozłączania i przyłączania RP ładunku nr 2 na tym stanowisku. Ten sam ładunek otrzymuje inny poziom dostawienia oraz podwieszania i rozłączania ładunku na stanowisku C, co widoczne jest na rys. 4c. Poziom ten może być inny w przypadku operowania na stanowisku C ładunkiem nr 3.

Wybór odpowiedniego poziomu transportu dokonywany jest automatycznie, na podstawie danych pochodzących z komputera centralnego, lub w przypadku półautomatycznego, a także odpowiedniej opcji ręcznego sterowania, na podstawie danych wprowadzanych do komputera pokładowego. Po dokonaniu analizy komputer pokładowy wybiera



Rys. 4. Poziomy transport poziomego ładunków i zawiesia, dostawienia oraz podwieszania i rozłączania zawiesia



Rys. 5. Algorytm optymalizacji czasu transportu

bezpieczną metodę oraz poziom transportu, dającą najkrótszy jego czas. Algorytm optymalizacji czasu transportu przedstawiony jest na rys. 5 [9].

Po otrzymaniu współrzędnych docelowych komputer pokładowy sprawdza, czy możliwy jest transport ładunku na najniższym poziomie transportowym. Ze względu na minimalizację czasu ruchu w pierwszej kolejności sprawdzana jest możliwość prowadzenia ładunku po linii prostej, a następnie, jeśli nie jest to możliwe, inne przypadki ruchu polegające na kojarzeniu ruchów mostu i wózka poprzez dodawanie czasu opóźnienia startu poszczególnych mechanizmów jazdy. Jeśli na danym poziomie transportowym nie jest możliwe prowadzenie ładunku bez kolizji z przeszkodami lub jest to nieefektywne ze względu na czas transportu, komputer dokonuje takich samych operacji na kolejnych poziomach. Przyjęto zasadę, że najwyższy poziom transportowy nie może mieć żadnych obszarów kolizyjnych, czyli że transport na tym poziomie odbywać się będzie po linii prostej. Efektem pracy tego układu jest uzyskanie przebiegów funkcji wymuszających dla mechanizmów jazdy i określenie poziomu, na którym transport ładunku ma się odbywać przy warunku minimalizacji czasu transportu.

Przy przełączeniu na pracę półautomatyczną operator, po podwieszeniu ładunku, wprowadza dane określające numer ładunku i punkt jego dostawienia oraz rozkaz startu realizacji cyklu transportowego. Po wykonaniu operacji transportu i rozłączeniu zawiesia operator wprowadza dane określające numer ładunku i punkt jego poboru oraz rozkaz startu realizacji cyklu przemieszczenia maszyny w celu pobrania kolejnego ładunku. Reszta operacji jest wykonywana automatycznie. W każdej chwili możliwe jest płynne przejście na sterowanie ręczne całkowite lub sterowanie ręczne

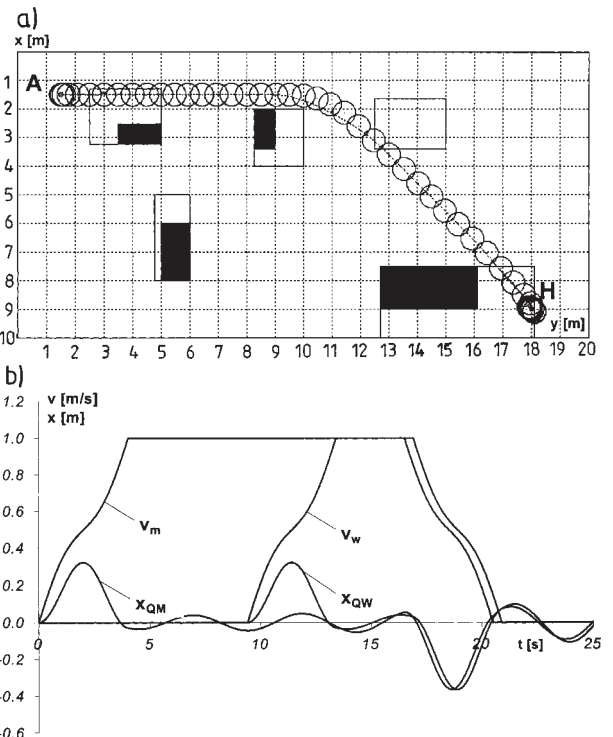
ze wspomaganiami automatycznymi procesów ruchu i hamowania ruchów jezdnych w celu eliminacji wahań ładunku. W tym ostatnim przypadku sterowanie ręczne podnoszeniem i opuszczaniem ładunku możliwe jest tylko w wtedy, gdy nie wykonuje się ruchów jezdnych oraz gdy ruchy jezdne odbywają się ze stałą prędkością.

Po wykonaniu optymalizacji czasu transportu i określeniu jego drogi na monitorze komputera pokładowego pojawia się mapa pola transportu z zaznaczonymi dla wybranego poziomu przemieszczenia przeszkodami stałymi i założoną drogą transportu.

Na rys. 6 przedstawiono przykładowy cykl transportowy ładunku przemieszczanego za pomocą suwnicy pomostowej. Droga transportu (rys. 6a) widoczna jest w postaci kół określających bezpieczną przestrzeń transportową w płaszczyźnie poziomej dla ładunku o danych wymiarach. Styk lub przekrywanie przeszkód tymi kołami eliminuje transport daną drogą. Układ jest zabezpieczony przed błędnym wprowadzeniem danych docelowych. Droga transportu jest widoczna w czasie trwania przemieszczenia ładunku z uwidocznieniem również aktualnej jego pozycji. Daje to operatorowi pogląd na możliwości transportu poziomego na określonym poziomie przemieszczenia w przypadku przejścia na sterowanie ręczne, ponieważ w trakcie podnoszenia zmieniają się mapy uwidaczniające istniejące przeszkody dla ładunku o danych wymiarach.

Zaciemnione pola widoczne na rys. 6a oznaczają przeszkody na określonym jako optymalnym poziomie transportu dla ładunku o danej wysokości. Dostarczenie tego ładunku z punktu A do H na tym poziomie będzie zrealizowane wzdłuż dwóch linii prostych, co daje najkrótszy czas transportu.

Na rys. 6b widoczne są przebiegi prędkości jazdy mostu v_m i wózka v_w oraz wahań ładunku w



Rys. 6. Przykładowy przebieg cyklu transportowego na wybranym poziomie optymalnym

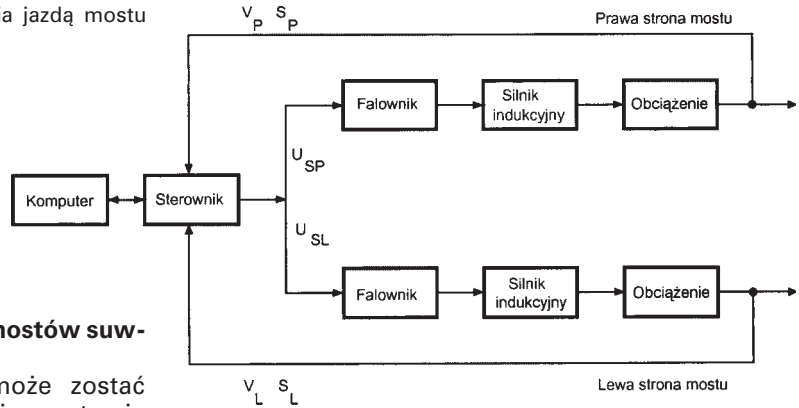
Rys. 7. Schemat blokowy napędu i sterowania jazdą mostu suwnicy z kompensacją ukosowania mostu

płaszczyznach x i y (x_{Qw} , x_{Qm}), wynikające z ruchów jazdy wózka i mostu. Widoczne optymalne przebiegi prędkości jazdy mostu i wózka w okresach rozruchu i hamowania powodują wytłumienie wahań ładunku po tych okresach, uwalniając operatora od rozwiązywania tych problemów.

● **Metoda kompensacji ukosowania mostów suwnic**

Układ sterowania numerycznego może zostać wykorzystany do ograniczenia do minimum tarcia obrzeży kół jezdnych mostów suwnic. W szczególności dotyczy to suwnic o dużych rozpiętościach mostów. Równoległe prowadzenie mostu suwnicy z ograniczeniem jego ukosowania uzyskuje się metodą sprzężeń zwrotnych i układów regulacji przemieszczeń i prędkości obydwu czołownic. Mówimy w takim przypadku o układzie kompensacji ukosowania mostu. Schemat blokowy takiego układu sterowania przedstawiony jest na rys. 7.

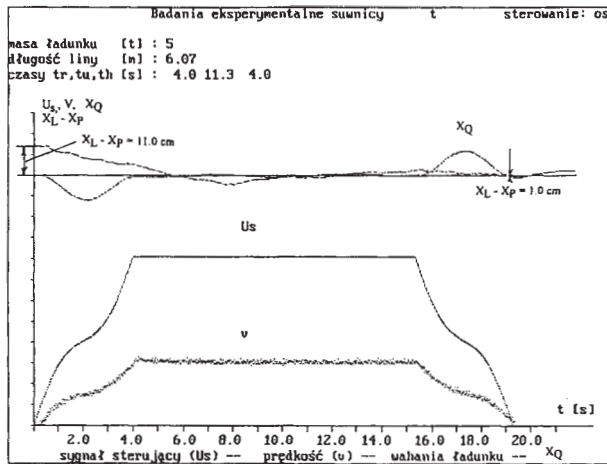
Na rys. 8 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych obrazujących uzyskane własności kompensacyjne w cyklu roboczym przemieszczania poziomego w ruchu jazdy mostu.



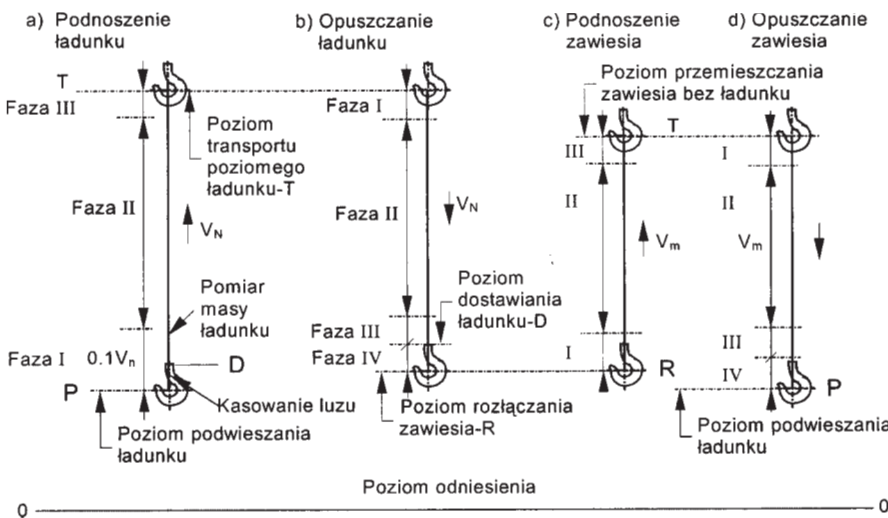
Przed ruchem roboczym most suwnicy został specjalnie przekoszony tak, że różnica pozycji obu czołownic wynosiła $x_l - x_p = 11$ cm. Widoczna jest szybka reakcja układu regulacji wyrównująca w ciągu ok. 5 s, również w okresie rozruchu, położenie mostu przez kompensację tej początkowej różnicy. Można też zauważyć, że zastosowanie specjalnego kształtu funkcji sterowania prędkością jazdy eliminuje wahań ładunku po okresach rozruchu i hamowania, co zmniejsza znacznie obciążenia dynamiczne układów jazdy i konstrukcji stalowej. W trakcie jazdy i po zahamowaniu układu różnice położenia obu czołownic nie przekraczają wartości 1 cm.

● **Pozycjonowanie, wykorzystanie mocy i zmniejszenie obciążeń dynamicznych w transporcie pionowym**

Metoda realizacji automatycznego transportu pionowego na wymagane, wcześniej zaprogramowane poziomy, rozwiązująca problemy pozycjonowania, wykorzystania mocy dyspozycyjnej mechanizmu oraz zmniejszenia jego obciążeń dynamicznych przedstawiona jest na rys. 9. Realizacja ruchu podnoszenia ładunku (rys. 9a) przebiega w trzech fazach. W fazie I, początkowo samo zawiesie, a następnie ładunek podnoszone są ze zmniejszoną prędkością o wartości ok. 0,1 prędkości nominalnej. Następuje skasowanie luzu w więzi linowej z możliwością zatrzymania ruchu mechanizmu na żądanym poziomie dostarczenia ładunku D, a potem łagodny rozruch do małej prędkości podnoszenia ładunku. Metoda ta umożliwia znaczne zmniejszenie obciążeń dynamicznych przy rozruchu.



Rys. 8. Badania eksperymentalne suwnicy – cykl roboczy jazdy mostu



W czasie ruchu podnoszenia ładunku z małą prędkością, przy końcu fazy I, następuje pomiar masy ładunku i wypracowanie przez sterownik wartości prędkości dla podnoszenia zasadniczego, realizowanego według zasady stałej mocy. Następnie bez zahamowania ładunku zwiększona zostaje jego prędkość dla realizacji podnoszenia zasadniczego, które stanowi fazę II. Przed osiągnięciem przez ładunek podanego przez komputer pokładowy poziomu

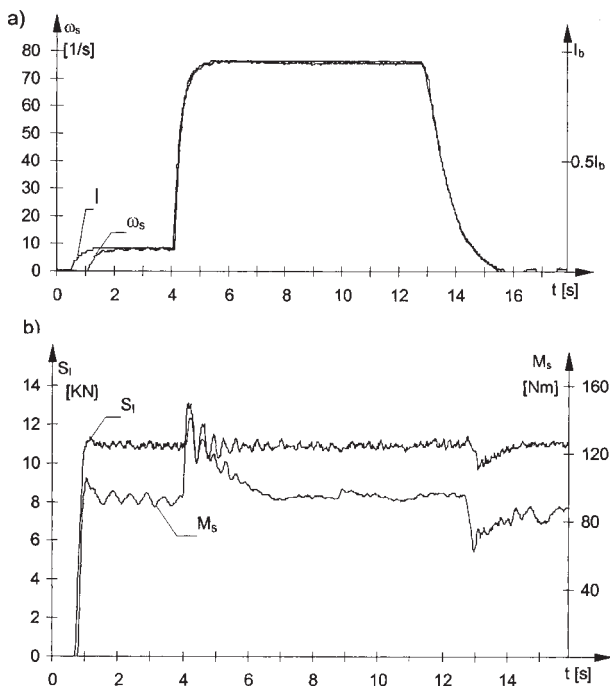
Rys. 9. Metoda realizacji ruchów pionowych

transportu, na którym ładunek będzie transportowany poziomo za pomocą ruchów jezdnych, prędkość podnoszenia jest w sposób łagodny zmniejszana, układ wchodzi bowiem w strefę regulacji przemieszczenia ładunku w fazie III. Faza ta kończy się hamowaniem elektrycznym ruchu podnoszenia i dostawieniem ładunku do określonego poziomu, po czym zapada hamulec mechaniczny pełniący jedynie rolę hamulca bezpieczeństwa i odciążania silnika elektrycznego i falownika w czasie postoju.

Komputer pokładowy przy sterowaniu automatycznym lub operator w systemie sterowania pół-automatycznym lub ręcznego określa poziom podniesienia ładunku do transportu poziomego w zależności od wybranej optymalnej drogi tego transportu. Pozycjonowanie ładunków w ruchach pionowych dokonywane jest przez typowy układ regulacji z dużą dokładnością, ponieważ przemieszczenia pionowe ładunków są ściśle związane z obrotami I wału mechanizmu. Przy sterowaniu ręcznym operator ma możliwość wyboru dowolnego poziomu transportu, a także jego zmiany w czasie ruchów jazdy z ustaloną prędkością.

Efekty wynikające z zastosowania sterowania numerycznego oraz automatyzacji mechanizmu widoczne są doskonale na uzyskanych eksperymentalnie przebiegach prędkości podnoszenia, sił w linach oraz momentu obrotowego na wale silnika przedstawionych na rys. 10, uzyskanych przy podnoszeniu ładunku z podłoża do zadanego wcześniej położenia.

Na rys. 10a widoczny jest rozruch mechanizmu do małej prędkości podnoszenia, wzrost prędkości, po dokonaniu pomiaru masy ładunku, do wartości wynikającej z zasady stałej mocy, a następnie zmniejszanie prędkości z łagodnym dojazdem do zadanego położenia w strefie regulacji przemieszczenia ładunku. Zamieszczone na rys. 10b przebiegi czasowe momentu na wale silnika M_s oraz siły w linach S_i , świadczą o znacznym, w stosunku do klasycznych

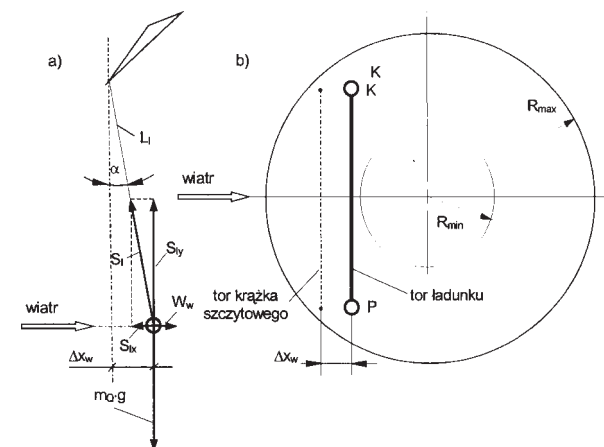


Rys. 10. Badania eksperymentalne mechanizmu podnoszenia: ω_s – prędkość kątowa silnika napędowego, I – sygnał sterujący, S_i – siła w linach, M_s – moment na wale silnika

układów napędowych, zmniejszeniu współczynników dynamicznych. Przeciężenia momentu nie przekraczają 30%, a przeciężenia siły w linach 10% wartości obciążeń statycznych tych elementów.

• Metoda kompensacji zakłóceń wywołanych wiatrem

W prowadzonych do tej pory pracach badawczych metodę kompensacji zakłóceń wywołanych wiatrem opracowano przyjmując, że dźwignica będzie wyposażona w czujnik pomiaru prędkości i kierunku wiatru, a dane te odpowiednio przetworzone podawane będą jako sygnał korekcyjny do układu sterowania. Założono, że na podstawie parametrów wiatru może być określona w każdej chwili z odpowiednią dokładnością siła (co do wartości i kierunku), z jaką wiatr działa na ładunek. Przykładowo, w przypadku żurawia portowego ogólna koncepcja kompensacji działania wiatru polega na takim usytuowaniu w danej chwili krążka szczytowego względem wiszącego na linach ładunku, aby składowa pozioma sił w linach kompensowała siłę, z jaką wiatr działa na ładunek. W ruchu sterowanym automatycznie ruchy mechanizmu obrotu i wypadu kojarzone są w sposób zapewniający przemieszczanie ładunku wzdłuż linii prostej. Metoda ta wyjaśniona jest na rys. 11 dla wiatru o stałej prędkości prostopadłej do drogi transportu.

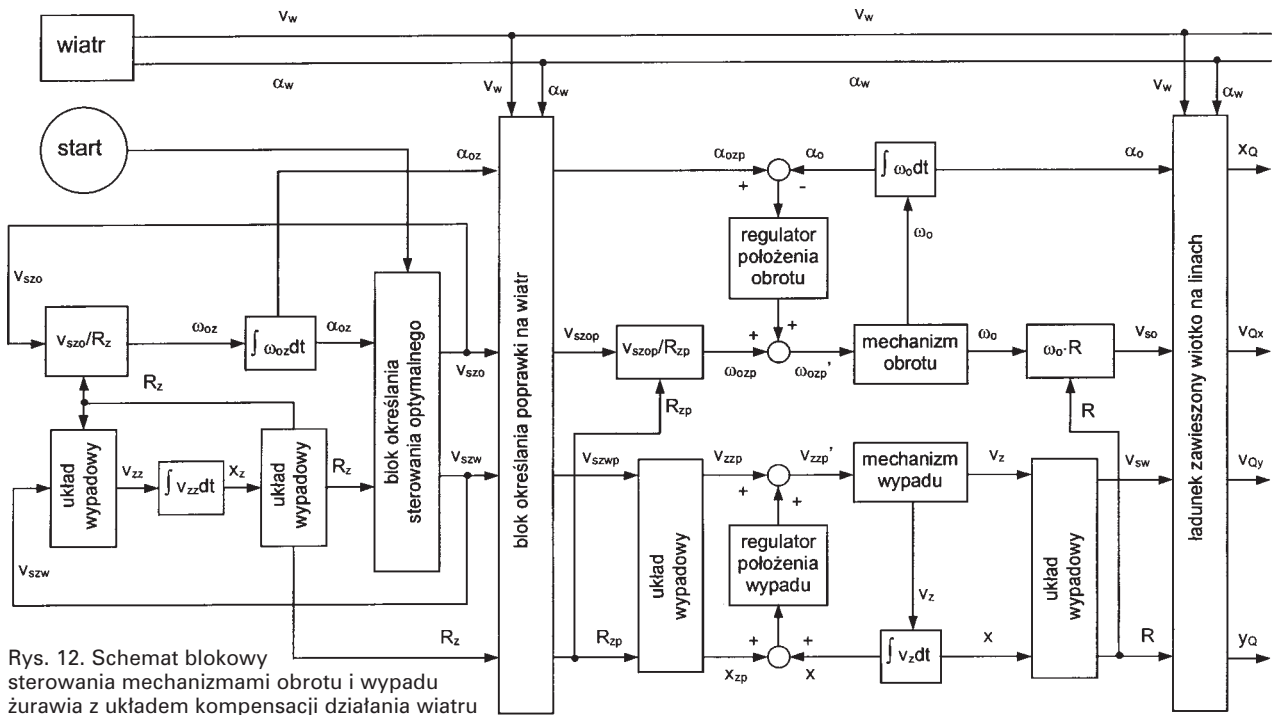


Rys. 11. Idea kompensacji zakłóceń wywołanych działaniem wiatru

W każdej chwili krążek szczytowy jest prowadzony równoległe do toru ładunku ze stałym odchyleniem poziomym Δx_w w stosunku do środka masy ładunku, w kierunku przeciwnym do zwrotu wektora siły wiatru, co kompensuje jego działanie.

Do realizacji opracowanej koncepcji kompensacji zakłóceń wywołanych działaniem wiatru opracowane zostały odpowiednie układy sterowania. Na rys. 12 przedstawiony jest przykładowy schemat blokowy sterowania mechanizmami obrotu i wypadu żurawia wyposażony w układ kompensacji działania wiatru.

Mierzone parametry wiatru, działającego na zawieszony na linach ładunek, w postaci jego prędkości v_w i kierunku α_w podawane są do bloku określania poprawki na wiatr. W bloku tym wypracowane zostają sygnały korygujące prędkości obrotu i wypadu. W rezultacie otrzymuje się w każdej chwili skorygowane położenie krążka szczytowego wysięgnika względem ładunku kompensujące siłę, z jaką wiatr działa na ładunek.



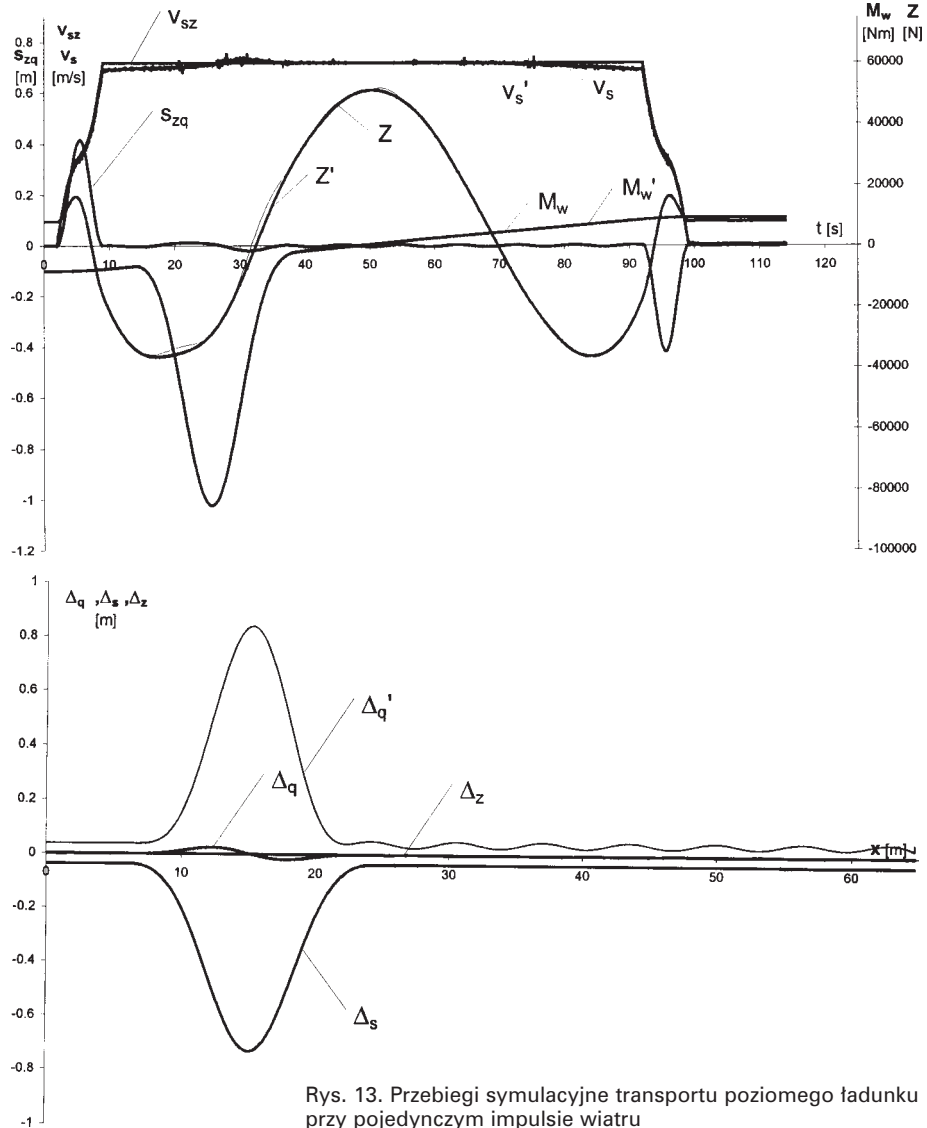
Rys. 12. Schemat blokowy sterowania mechanizmami obrotu i wypadu żurawia z układem kompensacji działania wiatru

Na rys. 13 przedstawione są wyniki badań symulacyjnych transportu ładunku za pomocą skojarzonych ruchów mechanizmów obrotu i wypadu żurawia w warunkach impulsowego podmuchu wiatru w czasie transportu.

Na wykresach tych określone są przebiegi czasowe następujących wielkości fizycznych:

- v_{sz} – prędkość zadana krążka szczytowego,
- v_s – prędkość rzeczywista krążka szczytowego,
- v'_s – prędkość przy wyłączonym układzie kompensacji,
- s_{zq} – wychylenie ładunku względem krążka szczytowego wzdłuż linii transportu,
- Z – opór ruchu mechanizmu wypadu zredukowanego do siłownika wypadu,
- M_w – moment, z jakim wiatr działa na część obrotową żurawia,
- M'_w – moment przy wyłączonym układzie kompensacji.

Ponadto w funkcji odległości x od punktu początkowego transportu, mierzonej wzdłuż założonej jego linii, przedstawione są



Rys. 13. Przebiegi symulacyjne transportu poziomego ładunku przy pojedynczym impulsie wiatru

na wykresach odchylenia od tej linii dla następujących wielkości fizycznych w całym ruchu roboczym:

Δz – odchylenie zadanego położenia krążka szczytowego,

Δs – odchylenie rzeczywistego położenia krążka szczytowego,

Δq – odchylenie rzeczywistego położenia krążka szczytowego,

$\Delta q'$ – odchylenie przy wyłączonym układzie kompensacji zakłóceń.

Reakcją układu na pojedynczy impuls wiatru jest wychylenie Δs krążka szczytowego wysięgnika żurawia w kierunku działania wiatru, co kompensuje jego działanie na ładunek, tak że odchyłka ładunku Δq od założonego toru jest niewielka.

Niezależnie od dobrych wyników badań symulacyjnych należy w tym przypadku, rozwijając badania w kierunku podniesienia jakości i bezpieczeństwa przeładunków, poszukiwać także innych metod kompensacji tych zakłóceń. Jak wspomniano we wstępie, zaproponowany sposób określania sił wiatru działających na ładunek obciążony będzie zawsze pewnym błędem, co w specyficznych warunkach transportowych może wpływać niekorzystnie na dokładność pozycjonowania ładunku i tłumienie jego wahań. Proponuje się zatem zbadanie i rozwinięcie metod kompensacji, w szczególności przy zastosowaniu obserwatora stanu układu. Zastosowanie takiej metody wydaje się pożądane ze względu na jednoczesną możliwość podniesienia także jakości tłumienia wahań ładunku, a zatem lepszej jakości i bezpieczeństwa całego procesu transportu wiotko podwieszonych ładunków.

Podsumowanie

Przedstawione metody automatycznego sterowania numerycznego układami napędowymi dźwignic umożliwiają stosunkowo proste rozwiązanie podstawowych problemów eksploatacyjnych dla typowych warunków prowadzenia przeładunków. Zdobyte doświadczenia umożliwiają rozwinięcie badań nad podnoszeniem jakości opracowanych układów sterowania, a także bezpieczeństwem przeładunków. W celu uzyskania możliwie prostych i cechujących się wysoką jakością rozwiązań układów sterowniczych, badania układów sterowania maszyn dźwigo-

wych mogą być rozwijane zwłaszcza przez skojarzenie metody obserwatora stanu z logiką sterowania rozmytego. Wydaje się także celowe utrzymanie dotychczasowego założenia niezmienności kierunku prędkości mechanizmów w cyklu roboczym przenoszenia ładunku z punktu jego załadunku do punktu wyładunku. Można zauważyć, że do praktycznego wprowadzenia automatyzacji sterowania dźwignic konieczna stanie się unifikacja i automatyzacja procesów przyłączania i rozłączania ładunków z zawiesiem maszyny. Należy przewidywać, że operator dźwignicy będzie w dalszym ciągu niezbędny w procesie przeładunków, z tym że jego działania będą się skupiały na obserwacji i kontroli przebiegającego automatycznie procesu transportowego.

LITERATURA

1. *Tomczyk J. i inni*: Automatyzacja sterowania suwnicy do przeładunku kontenerów. Praca badawcza KBN nr 7 7016 92 03, Łódź 1994.
2. *Tomczyk J. i inni*: Badania dynamiki maszyn dźwigowo-transportowych sterowanych za pomocą mikroprocesorów. Praca badawcza KBN nr 7 T07C 028 09, Łódź 1997.
3. *Tomczyk J., Cink J.*: The Optimisation of the Flexibly Suspended Loads Transport by Microprocessor Controlled Overhead Cranes. Computer Aided Optimum Design of Structures VI. WITpress, Southampton, Boston, pp. 43–54, 1999.
4. *Bednarski S., Cink J., Tomczyk J.*: Regulacja mocy w mechanizmie podnoszenia dźwignicy. Maszyny Dźwigowo-Transportowe nr 4/1996 ss. 46–54.
5. *Tomczyk J.*: System zbierania danych statystycznych pracy i obciążeń dźwignicy w procesie eksploatacji [w:] Mat. X Konferencji „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, Zakopane 1997.
6. *Tomczyk J.*: Problemy automatyzacji krajowych maszyn roboczych. Problemy Maszyn Roboczych, Komitet Budowy Maszyn PAN, z. 4, vol. 4. Warszawa 1994.
7. *Cink J., Tomczyk J.*: Zakłócenia działaniem wiatru w automatycznym sterowaniu maszyn roboczych [w:] Mat. XIII Konferencji Naukowej „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, Zakopane, styczeń 2000.
8. *Tomczyk J., Cink J.*: The automatic load transportation by wind disturbance. Proceedings of the 18 th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. IMB editors 2001.
9. *Tomczyk J., Kosucki A.*: Efektywny transport wewnętrzny wiotko podwieszonych ładunków dźwignicami sterowanymi numerycznie [w:] Materiały V Konferencji „Maszyny dla Transportu Bliskiego, Służb Komunalnych i Ratownictwa Technicznego”, Warszawa 2002.

