

JACEK CINK, JERZY TOMCZYK

Politechnika Łódzka
Zakład Maszyn Roboczych i Napędów Hydraulicznych

KOMPENSACJA ZAKŁÓCEŃ DZIAŁANIEM WIATRU W RUCHU ROBOCZYM ŻURAWIA PORTOWEGO

Słowa kluczowe: Automatykacja, napęd, sterowanie, zakłócenia, maszyny robocze, żurawie, dynamika, wiatr.

Streszczenie. Dla maszyn dźwigowych, transportujących wiotko podwieszane ładunki, pracujących na wolnym powietrzu duży wpływ na wahania i pozycjonowanie ładunku ma działanie wiatru. W referacie przedstawiono badania symulacyjne układu automatycznej kompensacji zakłóceń wywoływanych tym działaniem. Opracowany system umożliwia prowadzenie ładunku wzdłuż linii prostej z automatyczną eliminacją jego wahań po okresach rozruchu i hamowania z jednoczesnym pozycjonowaniem ładunku po zakończeniu cyklu roboczego dla różnych warunków pogodowych.

1. WSTĘP

W ramach prac badawczych prowadzonych dla Komitetu badań Naukowych opracowano w Zakładzie Maszyn Roboczych i Napędów Hydraulicznych Politechniki Łódzkiej nową technologię transportu wiotko podwieszonych ładunków suwnicami pomostowymi sterowanymi za pomocą mikroprocesorów z napędami zasilanymi z elektroenergetycznych przetwornic częstotliwości. Istotą tej technologii jest sterowanie, zapewniające automatyczną eliminację wahań ładunku po okresach rozruchu i hamowania w przerywanym cyklu roboczym, bez konieczności używania mechanicznych urządzeń tłumiących, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej dokładności pozycjonowania maszyny i ładunku oraz ograniczeniu do minimum ukosowania mostu na torze jezdny.

Ostatnia wykonana praca [5] poświęcona była zastosowaniu tej technologii dla maszyn dźwigowych o ruchach obrotowych i wypadowych. Jednym z zasadniczych problemów pracy była kompensacja zakłóceń wywoływanych działaniem wiatru.

Wstępne badania symulacyjne [1] wykazały, że wiatr o prędkości przewidzianej dla stanów roboczych żurawia ma znaczący wpływ na pozycjonowanie ładunku w trakcie realizacji ruchu roboczego i po jego zakończeniu. Opracowana została metoda kompensacji zakłóceń wywoływanych działaniem wiatru. Przeprowadzono badania symulacyjne skojarzonych ruchów roboczych mechanizmów obrotu i wypadu żurawia portowego produkcji Famak – Kluczbork, zainstalowanego na Nabrzeżu Szwedzkim w porcie Gdynia. W żurawiu tym zostały zainstalowane napędy elektro-mechaniczne, zasilane z elektro-energetycznych przetwornic częstotliwości, umożliwiające płynne sterowanie prędkościami ruchów roboczych. Napędy takie umożliwiają zastosowanie opracowanej nowej technologii transportu w zakresie uzyskania cech automatycznego prowadzenia ładunku z eliminacją jego wahań i pozycjonowaniem. Zbadano także możliwość zastosowania do napędów mechanizmów obrotu i wypadu układów hydrostatycznych ze sterowaniem jednostką wtórną (silnikiem hydrostatycznym o zmiennej chłonności).

2. OGÓLNA KONCEPCJA TRANSPORTU ŁADUNKÓW MASZYNAMI ROBOCZYMI O RUCHACH OBROTOWYCH I WYPADOWYCH

Zastosowanie układów napędowych z płynnym sterowaniem prędkością ruchów roboczych stwarza możliwość wprowadzenia automatyzacji ruchów roboczych żurawia przy wprowadzeniu odpowiedniego systemu sterowania.

Żałożono, że system sterowania będzie zdolny do realizacji transportu automatycznego i półautomatycznego z możliwością przejścia w każdej chwili na sterowanie ręczne.

Transport automatyczny przebiega pod nadzorem operatora według opracowanego wcześniej programu transportu załączanego w trakcie operacji podnoszenia pierwszego ładunku. System ten jest pomyślany przede wszystkim dla ładunków o znormalizowanych wymiarach, jak ma to miejsce w przypadku transportu kontenerowego. Program transportu opracowany jest wcześniej jako optymalny dla kryterium minimalnego czasu załadunku lub wyładunku kontenerów usytuowanych na znanych wcześniej pozycjach załadunku i wyładunku na statku i placu kontenerowym. Transport automatyczny będzie możliwy do wykorzystania w przewidywanym w przyszłości systemie transportu światowego o wysokim stopniu zaawansowania logistycznego.

Transport półautomatyczny, możliwy do wykorzystania w bliższej przyszłości, wykonywany jest przez operatora, którego praca wspomagana jest systemami pozycjonowania, prowadzenia ładunku po najkrótszej drodze (linii lub liniach prostych) oraz eliminacji wahań ładunku po okresach rozruchu i hamowania przy przemieszczeniach poziomych. Określana jest prędkość mechanizmu obrotu i wypadu dla uzyskania optymalnej (maksymalnej) prędkości w ruchu ustalonym ładunku wzdłuż linii prostej. Układ będzie zdolny do włączenia systemu pozycjonowania ładunku także w ruchach pionowych z zastosowaniem regulacji stałej mocy, opracowanego już dla suwnic pomostowych.

W każdym przypadku możliwe będzie przejście w dowolnej chwili procesu transportu na system sterowania ręcznego, wykonywanego przez operatora. Przejście to w przypadku stanu ruchu będzie związane z zatrzymaniem układu i rozpoczęciem sterowania ręcznego. W stanie spoczynku przejście na sterowanie ręczne jest tylko wyborem opcji sterowania.

2.1. Układy napędowe i sterownicze

Jak już wspomniano wyżej, ogólnym wymogiem, koniecznym dla realizacji opracowanej technologii transportu, dla układów napędowych mechanizmów roboczych żurawia – mechanizmów obrotu, wypadu i podnoszenia, jest możliwość płynnego sterowania prędkością. Mechanizm jazdy, pełniący rolę mechanizmu nastawczego może być wyposażony w napęd o stałej prędkości ruchu.

Dla mechanizmów żurawia zbadano możliwość zastosowania elektromechanicznych napędów z najtańszymi silnikami indukcyjnymi klatkowymi, zasilanymi z elektroenergetycznych przetwornic częstotliwości (falowników). Układy takie zostały zastosowane w dźwignicach po raz pierwszy w Polsce w laboratoryjnej suwnicy pomostowej zainstalowanej w laboratorium Zakładu MRiNH w Politechnice Łódzkiej, a następnie w żurawiu wypadowym zbudowanym i zainstalowanym w porcie w Gdyni. Ogólne schematy takich układów napędowych były prezentowane dla suwnic [6], [7].

Innym systemem napędowym, zbadanym symulacyjnie i możliwym do zastosowania jest hydrostatyczny napęd ze sterowaniem jednostkami wtórnymi.

Podstawową zaletą tego systemu napędowego jest centralne źródło mocy w postaci zespołu zasilającego stałociśnieniową linię hydrauliczną, do której podłączone są silniki hydrostatyczne o zmiennej chłonności jednostkowej zaopatrzone w układy regulacji prędkości napędzające poszczególne mechanizmy robocze żurawia. Dla uzyskania cechy płynnego sterowania mechanizmem wypadu, napędzanego hydrostatycznym silnikiem liniowym,

konieczne byłoby zastosowanie transformatora hydraulicznego. Innym rozwiązaniem może być tutaj zastosowanie typowego napędu mechanicznego np. śrubowego, napędzanego hydrostatycznym silnikiem obrotowym o zmiennej chłonności.

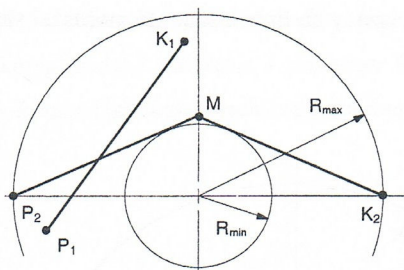
Prędkości kątowe silników hydrostatycznych mechanizmów roboczych sterowane są elektronicznie za pomocą indywidualnych sterowników połączonych z kabiną operatora za pomocą sterownika nadrzędnego. Hydrauliczna stacja zasilająca utrzymująca stałe ciśnienie w sieci hydraulicznej wyposażona jest w integralny regulator ciśnienia i jest załączana do pracy za pośrednictwem sterownika nadrzędnego.

Wymogiem proponowanej koncepcji jest, aby mechanizmy obrotu i wypadu odpowiedzialne za ruch ładunku w płaszczyźnie poziomej, niezależnie od zastosowanego systemu napędowego, były wyposażone w (oprócz integralnie związanych z nimi układów regulacji prędkości) działające w sposób ciągły układy regulacji położenia.

2.2. Koncepcja transportu poziomego ładunków

Z obserwacji pracy operatorów żurawi wypadowych wynika, że starają się oni intuicyjnie, manewrując ruchami obrotu i wypadu, prowadzić transportowany ładunek najkrótszą drogą po trajektorii zbliżonej do linii prostej. Obserwacje te stanowiły jedną z zasadniczych przesłanek do przyjęcia założenia [1], [9] takiego kojarzenia prędkości krążka szczytowego w ruchach obrotu i wypadu, dla automatycznego lub półautomatycznego sterowania, aby ładunek w transporcie poziomym poruszał się dokładnie po linii prostej.

Dla żurawia, którego parametry były podstawą badań, najdłuższa cięciwa koła maksymalnego zasięgu żurawia ($R_{\max} = 36$ m), styczna do koła określonego minimalnym promieniem wypadu ($R_{\min} = 11$ m) wynosi 95 % średnicy koła maksymalnego zasięgu ($L_{\max} = 0,95 \cdot D_{\max}$). Przed wykonaniem pracy transportowej, żuraw jest ustawiany na torze za pomocą mechanizmu jazdy w dogodnej pozycji. Można przyjąć zatem, że w większości przypadków transportu ładunków, żuraw może być tak ustawiony na torze, aby transport ładunków mógł być wykonany najkrótszą drogą wzdłuż jednej linii prostej P_1K_1 . Przyjęto również jako możliwe, wykonanie transportu wzdłuż linii łamanej P_2MK_2 w przypadkach sporadycznych, kiedy zajdzie konieczność wykorzystania maksymalnego zasięgu żurawia. Przypadki te pokazane są na rys. 1.



Rys. 1. Poziomy transport ładunku wzdłuż linii prostej P_1K_1 oraz z wykorzystaniem pełnego zasięgu żurawia wzdłuż linii łamanej P_2MK_2

2.3. Koncepcja kompensacji zakłóceń powodowanych działaniem wiatru

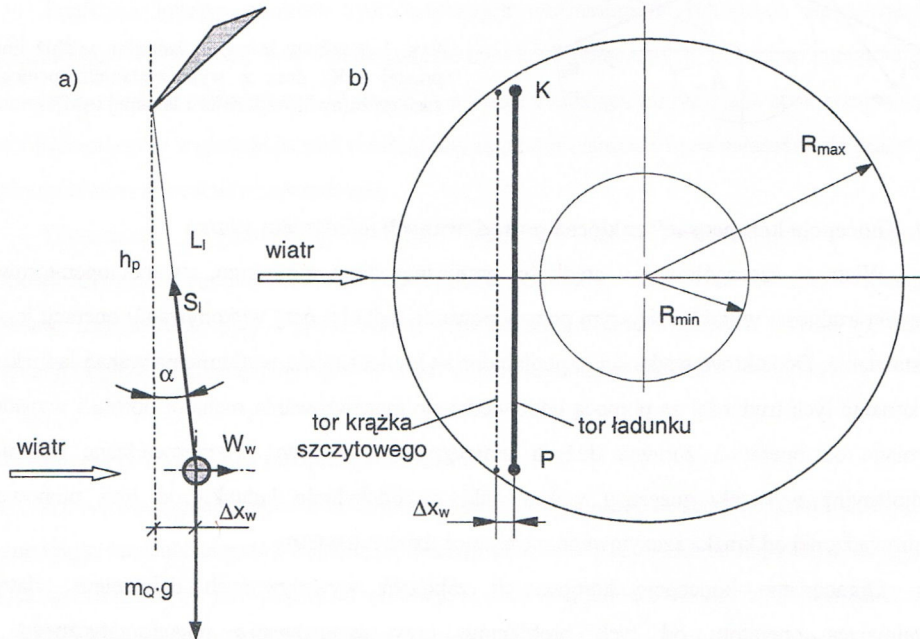
Wiatr, w szczególności o prędkości granicznej stanu roboczego, stwarza operatorowi żurawia trudności w dokładniejszym pozycjonowaniu ładunku przy wykonywaniu operacji jego dostawiania. Dodatkowo trudności te pogłębione są koniecznością wytlumienia wahań ładunku. Pokonanie tych trudności za pomocą odpowiedniego manewrowania ruchami obrotu i wypadu wymaga od operatora żurawia dużych umiejętności i wprawy. Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały znaczący wpływ, jaki na odchylenie ładunku od linii pionowej poprowadzonej od krążka szczytowego może mieć działanie wiatru.

Opracowano koncepcję kompensacji zakłóceń wywoływanych działaniem wiatru uwalniającą operatora od tych problemów przy zastosowaniu półautomatycznego i automatycznego sterowania transportem. Ogólnie koncepcja ta polega na takim usytuowaniu krążka szczytowego w dowolnej chwili, aby ładunek w ruchu ustalonym w warunkach naporu wiatru pozostał w równowadze w położeniu zadanym. Koncepcja ta wyjaśniona jest na rys. 2 dla wiatru o stałej prędkości, prostopadłej do drogi transportu.

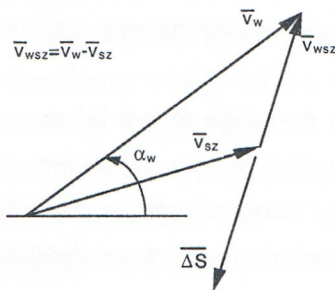
W tym przypadku krążek szczytowy jest prowadzony równoległe to toru ładunku ze stałym odchyleniem poziomym Δx_w w stosunku do środka masy ładunku, przeciwnym do wektora prędkości wiatru względem zadanej prędkości ładunku. Należy zauważyć, że poprawka położenia krążka szczytowego w stosunku do środka masy ładunku musi być uwzględniona także przed rozpoczęciem podnoszenia ładunku i korygowana przy jego podnoszeniu ze względu na zmianę położenia środka jego masy i zmianę sztywności poziomej zawieszenia ładunku.

W rzeczywistej eksploatacji mamy do czynienia ze zmienną co do wartości, a także i kierunku siłą wiatru. W opracowanej koncepcji funkcje sterujące wyznaczone są tak, jakby wiatru nie było. Zadane położenie i prędkość krążka szczytowego

korygowane są w sposób automatyczny tak, aby wiszący na linach ładunek poruszał się wzdłuż zadanego toru z zadaną prędkością.



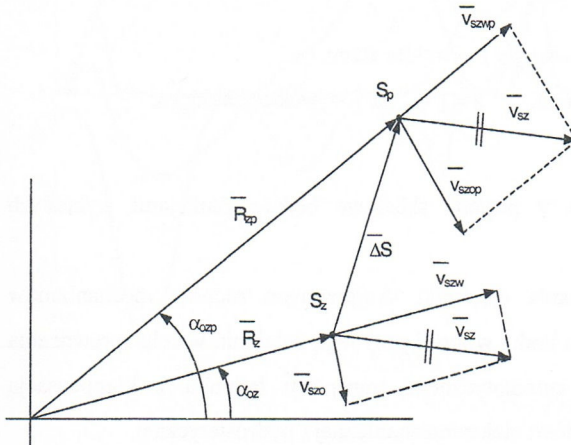
Rys. 2. Kompensacja zakłóceń wywołanych działaniem wiatru



Rys. 3. Zasada określania poprawki na

Wielkość poprawki korygującej położenie krążka szczytowego wyznaczana jest zależnie od względnej prędkości wiatru w stosunku do zadanej prędkości krążka szczytowego. Wyjaśnia to rys. 3. Symbole użyte na rysunku oznaczają: \bar{v}_w – wektor prędkości wiatru, \bar{v}_{sz} – wektor prędkości zadanej krążka szczytowego, \bar{v}_{wsz} – wektor prędkości wiatru względem prędkości zadanej krążka szczytowego, $\bar{\Delta S}$ – wektor poprawki na wiatr.

Znajomość poprawki $\Delta\bar{S}$ (co do wartości i kierunku) umożliwi określenie skorygowanego położenia i prędkości krążka szczytowego, które determinują skorygowane położenia i prędkości mechanizmu obrotu i wypadu. Wyjaśnia to rys. 4.



Rys. 4. Skorygowane położenie i prędkość krążka szczytowego

Symbole użyte na rysunku oznaczają: \bar{R}_z – zadany wysięg żurawia, \bar{R}_{zp} – skorygowany wysięg żurawia, α_{oz} – zadany kąt obrotu żurawia, α_{ozp} – skorygowany kąt obrotu żurawia.

Wprowadzenie poprawki $\Delta\bar{S}$ powoduje korektę położenia krążka szczytowego z punktu S_z do punktu S_p , natomiast zadana wypadkowa prędkość krążka szczytowego \bar{V}_{sz} pozostaje taka sama co do wartości i kierunku, należy jednak skorygować prędkość obrotu i wypadu żurawia stosownie do skorygowanego położenia. Wielkości skorygowanych położen i prędkości mechanizmu obrotu i wypadu wypracowywane są automatycznie w czasie rzeczywistym i podawane jako wielkości zadane do układów regulacji położenia związanych z tymi mechanizmami.

3. MODELE DYNAMICZNE I WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Model dynamiczny układu złożonego z mechanizmów obrotu i wypadu oraz układów sterowania i regulacji działający w warunkach zakłóceń wywoływanych wiatrem opracowano przy przyjęciu odpowiednich dla etapu badań symulacyjnych założeń upraszczających. Wykorzystano równania ruchu dla elementów o zmiennej masie zredukowanej, zależności kinematyczne oraz wynikające z geometrii układu wypadowego, jak również równania automatyki. Opis matematyczny przedstawiono w przestrzeni zmiennych stanu jako dogodny dla

rozwiązania równań za pomocą komputera cyfrowego. Otrzymano nieliniowy stacjonarny układ równań różniczkowych I rzędu w postaci:

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

$x = [\alpha_{oz}, x_z, \omega_o, v_z, \alpha_o, x, v_{Qx}, v_{Qy}, x_Q, y_Q]$ – wektor stanu,

$u = [v_{sz0}, v_{szw}]$ – wektor sterowania, $z = [v_w, \alpha_w]$ – wektor zakłóceń,

Wektor wielkości wyjściowych y posiada składowe będące funkcjami wybranych zmiennych stanu.

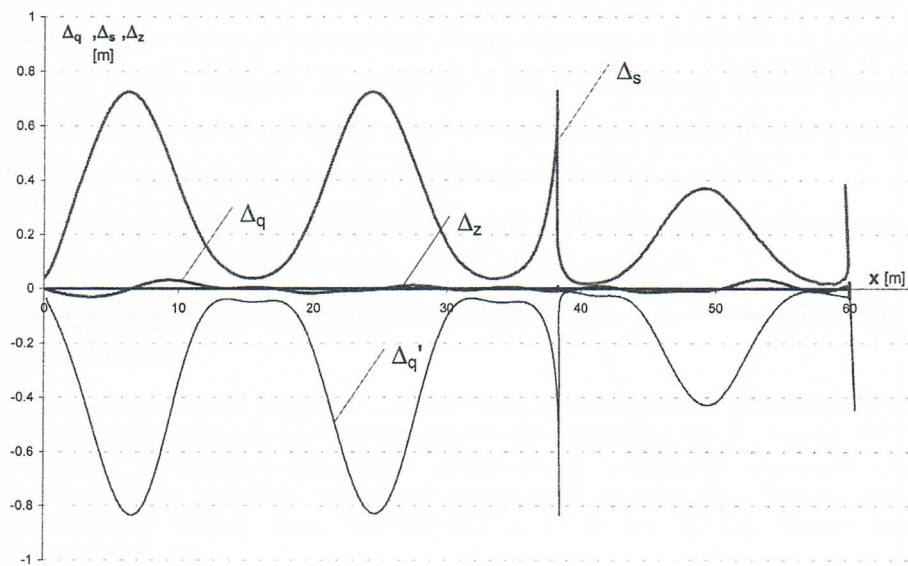
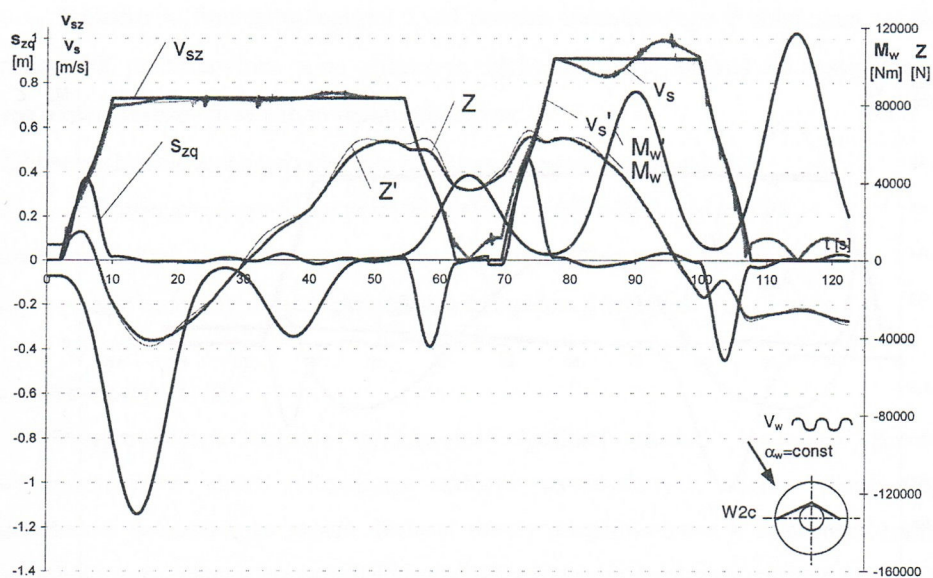
Przeprowadzono obszerne badania dynamiki skojarzonych ruchów mechanizmów obrotu i wypadu żurawia w warunkach braku wiatru i przy jego działaniu w celu sprawdzenia opracowanej koncepcji technologii automatycznego transportu ładunku z kompensacją zakłóceń wiatrem dla obu wersji napędów: elektromechanicznej i hydrostatycznej.

Na rysunkach 5 i 6 pokazano przykładowe wyniki badań symulacyjnych, odpowiednio dla ruchu wzdłuż linii łamanej przy wietrze pulsującym o prędkości maksymalnej $v_w = 22$ m/s i stałym kierunku (rys. 5) oraz dla ruchu wzdłuż prostej przy pojawiającym się pojedynczym sinusoidalnym porywie wiatru o prędkości maksymalnej $v_w = 22$ m/s (rys. 6).

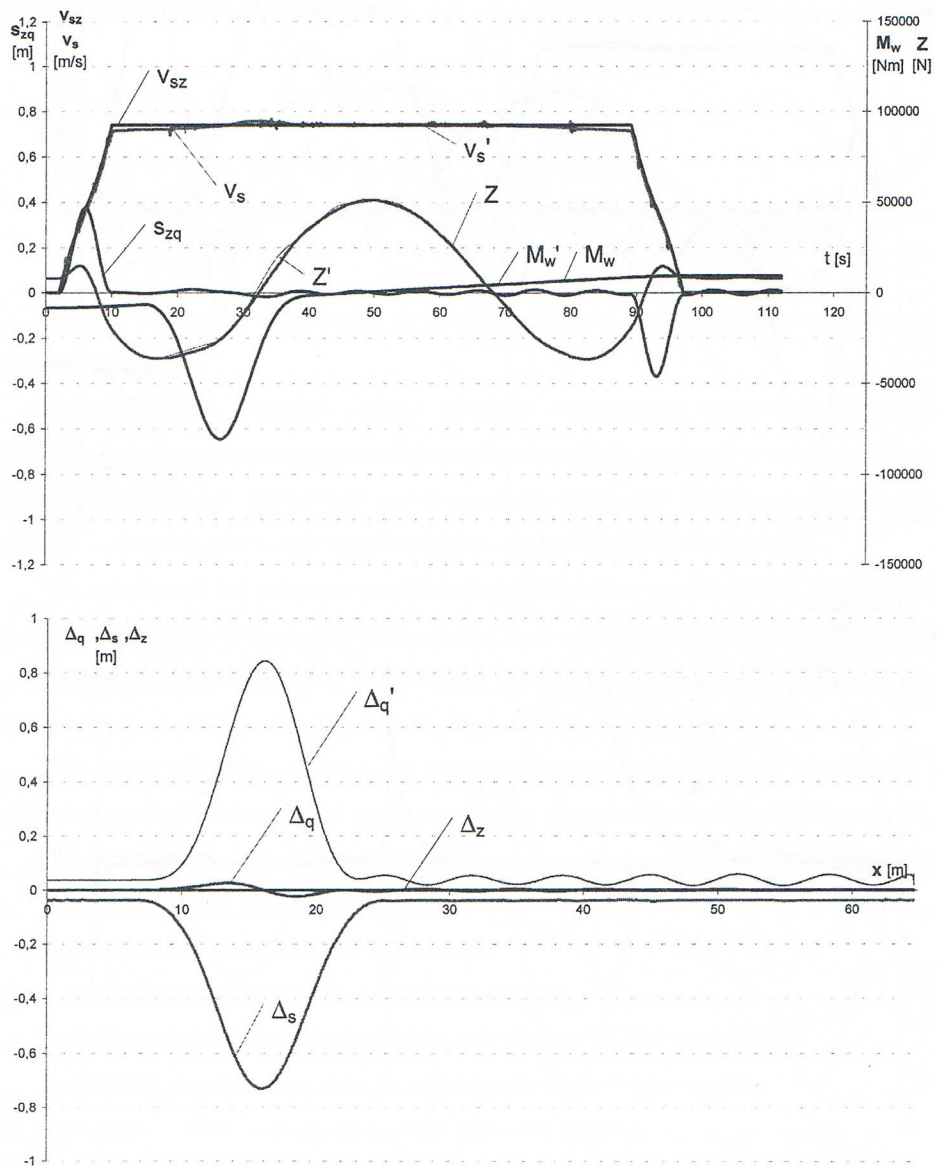
Dla oceny skuteczności koncepcji przeprowadzono również badania symulacyjne z wyłączonym układem kompensacji wiatru, oznaczając odpowiednie przebiegi indeksem „I”.

Na wykresach przedstawione są przebiegi czasowe następujących wielkości fizycznych:

- v_{sz} – prędkość zadana krążka szczytowego,
- v_s – prędkość rzeczywista krążka szczytowego,
- v_s^I – prędkość przy wyłączonym układzie kompensacji,
- s_{zq} – wychylenie ładunku względem krążka szczytowego wzdłuż prostej PK,
- Z – opór ruchu mechanizmu wypadu zredukowany do siłownika wypadu.
- M_w – moment, z jakim wiatr działa na część obrotową żurawia,
- M_w^I – moment przy wyłączonym układzie kompensacji.



Rys. 5. Badania symulacyjne. Napęd hydrostatyczny. Ruch wzdłuż łamanej.
Wiatr pulsujący o stałym kierunku



Rys. 6. Badania symulacyjne. Napęd hydrostatyczny. Ruch wzdłuż prostej.
Pojedynczy sinusoidalny impuls wiatru

Ponadto w funkcji odległości x od punktu początkowego P mierzonej wzdłuż prostej PK przedstawione są na wykresach odchylenia od tej prostej dla następujących wielkości fizycznych w całym ruchu roboczym:

Δz – odchylenie zadanego położenia krążka szczytowego od prostej PK ,

Δs – odchylenie rzeczywistego położenia krążka szczytowego od prostej PK ,

Δq – odchylenie rzeczywistego położenia ładunku szczytowego od prostej PK .

Δq^1 – odchylenie przy wyłączonym układzie kompensacji zakłóceń.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania symulacyjne dynamiki ruchów roboczych żurawia wyposażonego w układ kompensacji zakłóceń wywoływanych wiatrem potwierdzają skuteczność działania tego układu. Badania zostały przeprowadzone w założonych bardzo ostrych warunkach atmosferycznych odpowiadających stanom granicznym ruchów roboczych. W tych warunkach odchylenia ładunku od założonego toru transportu nie przekraczały 4 cm, co można uznać za wynik zadowalający na tym etapie badań. Wyniki te otrzymano przy założeniu znanej i dokładnie określonej siły z jaką wiatr działa na ładunek. Dokładność określania tej siły może mieć pewien wpływ na skuteczność kompensacji. Należy zauważyć, że odchylenia ładunku przy wyłączonym układzie kompensacji sięgają 80 cm.

Włączenie układu kompensacji działania wiatru nie zakłóca skuteczności prowadzenia ładunku wzdłuż prostej z tłumieniem jego wahań i pozycjonowaniem.

5. LITERATURA

1. Bednarski S., Cink J., Tomczyk J.: *Wpływ parcia wiatru na prowadzenie ładunku w ruchu roboczym żurawia portowego*. Wydawnictwa Politechniki Szczecińskiej, czerwiec 1997.
2. Cink J., Tomczyk J.: *Rozwiązanie podstawowych problemów transportu wiotko podwieszonych ładunków suwnicami sterowanymi numerycznie*. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: TRANSPORT z. 33 Nr kol. XXXX, Gliwice, Ustroń, październik 1998.
3. Cink J., Tomczyk J.: *Zakłócenia działaniem wiatru w automatycznym sterowaniu maszyn roboczych*. XIII Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych. Zakopane, styczeń 2000.
4. Halusiak S.: *Wpływ sposobu obciążenia sieci na pracę generatora stałego ciśnienia*. Wydawnictwa Politechniki Szczecińskiej, czerwiec 1998.
5. Tomczyk J. i inni: *Praca dla Komitetu Badań Naukowych - Nr 7 T07C 001 15 pt. Eliminacja wahań ładunku i pozycjonowanie dźwignic o ruchach obrotowych i wypadowych sterowanych za pomocą mikroprocesorów*. Łódź, grudzień 1999.

6. 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, p.43-54, 1999.
7. Tomczyk J.: *Koncepcja transportu wiotko podwieszonych ładunków dla suwnic sterowanych numerycznie*. Wydawnictwa Politechniki Szczecińskiej, czerwiec 1998.
8. Tomczyk J.: *Tendencje rozwojowe w budowie dźwignic i maszyn transportowych*. Problemy Maszyn Roboczych. Kolegium Twórczości Technicznej Akademii Inżynierskiej w Polsce. s.23-40. Warszawa 1998.
9. Tomczyk J., Cink J.: *Badania dynamiki jako podstawa współczesnego projektowania hydrostatycznych układów napędowych maszyn*. Materiały Konferencji Napęd Hydrostatyczny Maszyn – Rozwój i Wytwarzanie. Gdańsk, listopad 1999.

THE COMPENSATION OF THE WIND DISTURBANCE OVER THE DUTY MOTION OF THE JIB CRANE

Summary

The wind considerably influences on the load oscillations and positioning for flexibly suspended load transportation by cranes working in the open air. In the paper the simulation tests of the automatic system of the wind disturbance compensation are presented. The tests confirmed that the conducting of the load by the shortest way along the straight line with automatic elimination of the load oscillation after the starting and braking periods and with simultaneous load positioning is possible for different atmospheric conditions.