

Jerzy MARGIELEWICZ¹

NUMERYCZNE BADANIA TRAJEKTORII ŁADUNKU W SUWNICY POMOSTOWEJ

Streszczenie. Artykuł zawiera badania trajektorii ruchu ładunku suwnicy pomostowej. Ruch ładunku zamodelowano w przestrzennym układzie współrzędnych. Wymuszenia dynamiczne działające na transportowany ładunek pochodzą od układów napędowych mechanizmów jazdy wózka wciągarki oraz mostu suwnicy. Wózek wciągarki zamodelowano jako bryłę sztywną, która posiada pięć stopni swobody, natomiast ładunek masą punktową podwieszoną na końcu ciężna. Wyniki symulacji komputerowych przedstawiono w postaci odpowiedzi czasowych: prędkości mechanizmów wykonawczych, wychylenia ładunku od pionu oraz trajektorii ładunku w przestrzeni roboczej.

NUMERICAL ANALYSING OF THE TRAJECTORY OF THE LOAD OF THE BRIDGE CRANE

Summary. Numerical analysing of the trajectory of the move of the charge of the bridge crane was carried out at work. The move of the load was described as the three-dimensional arrangement. Of forcing dynamic affecting the transported load drivings are deriving from arrangements of driving mechanisms of the winch and the bridge crane. The carriage of the winch was characterised with the inflexible solid which possesses five degrees of free. Results of computer simulations were presented in the form of time response: of the speed of executive mechanisms, bending the load from true and the trajectory of the load in working space.

1. WPROWADZENIE

Współczesny rozwój techniki sprawia, że maszyny robocze charakteryzują się coraz to większymi prędkościami roboczymi. Wzrost szybkości działania maszyn roboczych, w szczególności dźwignic, jest jedną z cech świadczących o ich przydatności w transporcie. Dźwignice charakteryzujące się dużymi prędkościami mechanizmów wykonawczych umożliwiają w krótszym czasie przetransportowanie ładunku z pozycji zadanej do pozycji docelowej. Zwiększanie prędkości roboczej wpływa jednak niekorzystnie na trajektorie ruchu ładunku, który ulega wytrąceniu z położenia równowagi, przez co utrudnione staje się manewrowanie nim [4, 5, 6]. Znajomość trajektorii, po jakiej przemieszcza się ładunek, jest istotnym elementem umożliwiającym sterowanie ruchem suwnicy. Ograniczenie wahań ładunku podczas transportu poprawia zdolności manipulacyjne, dzięki czemu można uniknąć kolizji z nieruchomymi przeszkodami. Jeżeli przy transporcie ładunku bierze udział jeden z mechanizmów jazdy, to wahań odbywają się w płaszczyźnie ruchu, a tego typu ruch

¹ Katedra Modelowania Procesów i Inżynierii Medycznej, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, j.margielewicz@chello.pl

bardzo dobrze opisać można modelem wahadła matematycznego. W przypadku gdy przy transporcie uczestniczą mechanizmy jazdy wciągarki i mostu suwnicy, najdogodniej posłużyć się modelem wahadła sferycznego. Wiarygodne odzwierciedlenie zachowania rzeczywistego obiektu w symulacji komputerowej wymaga uwzględnienia wielu czynników. Takie podejście prowadzi jednak do sformułowania bardzo rozbudowanego modelu, którego rozwiązanie metodami numerycznymi nastęrcza określone trudności. Z tego też względu prowadząc obliczenia na modelach wirtualnych, modelujący ogranicza się do uwzględnienia najistotniejszych czynników. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki symulacji komputerowych, w których uwzględniono przestrzenny ruch wózka wciągarki, natomiast ruch ładunku opisano modelem wahadła sferycznego. Zakłócenia wpływające na przestrzenny ruch ładunku wywołane są głównie działającymi mechanizmami wykonawczymi oraz nierównością torów.

2. MODEL FENOMENOLOGICZNY BADANEGO UKŁADU

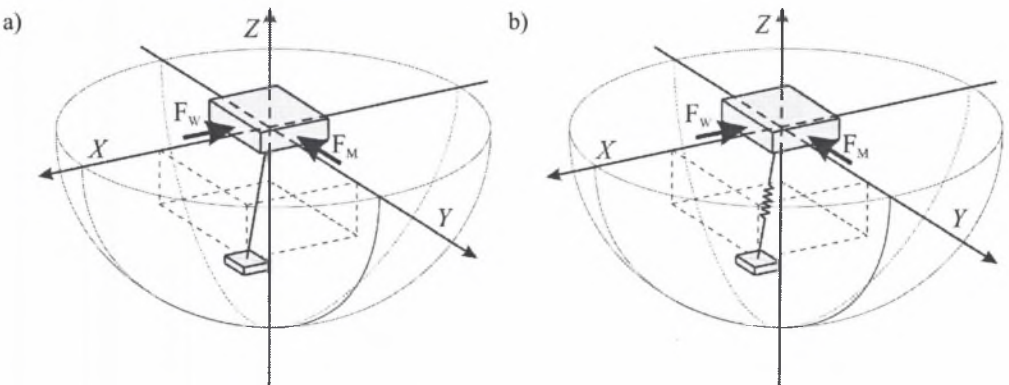
Jako obiekt badań przyjęto układ wózek-ładunek suwnicy pomostowej. Zagadnienie modelowania systemu wózek-ładunek sformułowano w klasie zadań dynamiki maszyn z nieliniowościami geometrycznymi, wynikającymi z położenia ładunku w przestrzeni roboczej. Poruszające się po szynach podzespoły suwnicy są źródłem drgań, w wyniku których następuje wytrącenie ładunku z położenia równowagi. W przeprowadzonych symulacjach numerycznych uwzględniono oddziaływanie wymuszeń kinematycznych, wywołanych nierównością torów jazdy. Wielkości wymuszeń kinematycznych przyjęto jako superpozycję nierówności torów mostu i wciągarki:

$$q_i = A_w \sin(2\pi\omega_w t) + A_M \sin(2\pi\omega_M t), \quad (1)$$

gdzie:

A_w - nierówność toru, po którym przemieszcza się wózek wciągarki, ω_w - prędkość jazdy wózka wciągarki, A_M - nierówność toru, po którym przemieszcza się most suwnicy, ω_M - prędkość jazdy mostu suwnicy.

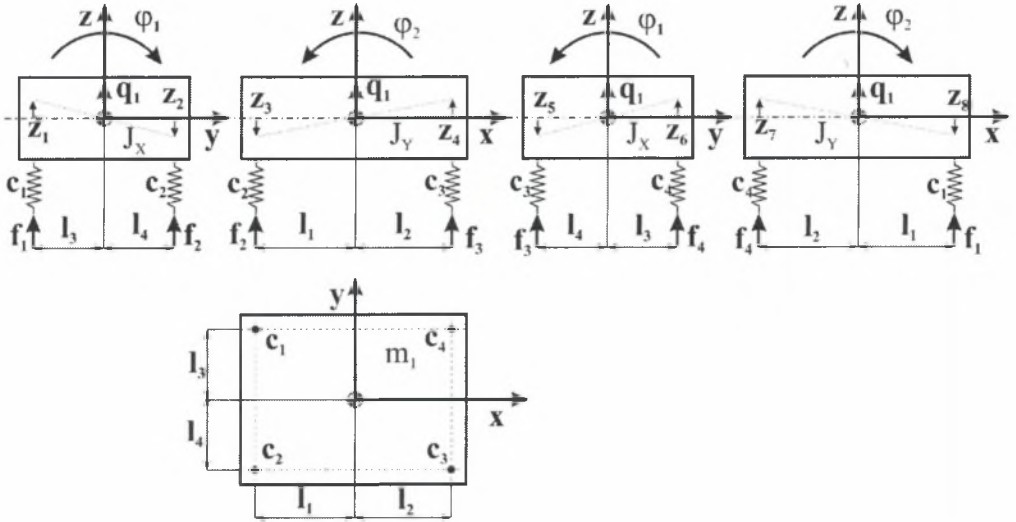
Rzeczywisty obiekt badań będący układem o ciągłym rozkładzie parametrów fizycznych poddano dyskretyzacji, zgodnie z formalizmem metody sztywnych elementów skończonych (SES). Przyjęte do dalszych badań numerycznych modele fenomenologiczne, opisujące zachowanie analizowanego układu, przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przejrzyste modele fenomenologiczne systemu wózek-ładunek: z nieważkim i nierozciągliwym cięgnem, b) z podatnym cięgnem

Fig. 1. Three-dimensional phenomenological models of the system carriage-load: a) with the fixed rope, b) with susceptible rope

Podczas przeprowadzania symulacji numerycznych założono przemieszczenie wózka wciągarki po moście oraz jazdę mostu. Pominięto na tym etapie badań działanie mechanizmu podnoszenia. Wózek wciągarki suwnicy pomostowej zamodelowano bryłą sztywną o pięciu stopniach swobody, która ma możliwość przemieszczania się wzdłuż osi x , y , z oraz wykonuje wahnięcia względem osi x oraz y . Na rys. 2 przedstawiono model fenomenologiczny wózka, który posłużył w dalszym ciągu do wyprowadzenia równań ruchu wciągarki [7].

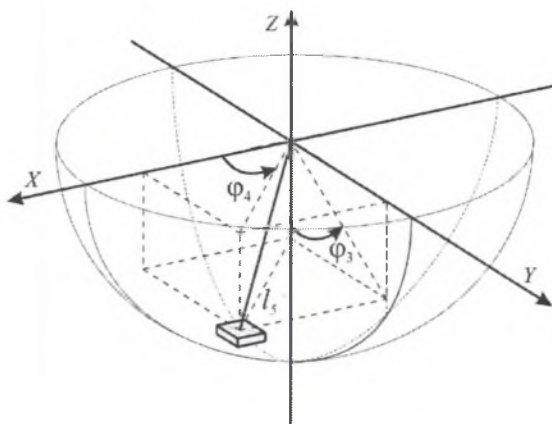


Rys. 2. Model fenomenologiczny wózka wciągarki
 Fig. 2. Phenomenological model of the winch

Równania więzów opisujące przemieszczenie poszczególnych elementów sprężystych przyjmują postać:

$$\begin{cases} w_1 = q_1 + z_1 - z_8 = q_1 + \varphi_1 l_3 - \varphi_2 l_1 \\ w_2 = q_1 - z_2 - z_3 = q_1 - \varphi_1 l_4 - \varphi_2 l_1 \\ w_3 = q_1 + z_4 - z_5 = q_1 + \varphi_2 l_2 - \varphi_1 l_4 \\ w_4 = q_1 + z_6 + z_7 = q_1 + \varphi_1 l_3 + \varphi_2 l_2 \end{cases} \quad (2)$$

Z kursu mechaniki powszechnie wiadomo, że położenie i orientację ciała w przestrzeni można określić w różnych współrzędnych uogólnionych. Najczęściej stosowanymi współrzędnymi w mechanice i robotyce są: współrzędne walcowe, biegunowe oraz Denavita-Hartenberga [1, 2]. Szerokie spektrum wyboru współrzędnych uogólnionych powoduje, że równania kinematyczne i dynamiczne różnią się strukturą oraz możliwością ich efektywnego rozwiązania numerycznego. W niniejszej pracy do określenia położenia ładunku w przestrzeni (rys. 3) wybrano współrzędne określające przemieszczenie kątowe względem osi z oraz wychylenie ładunku od osi z .



Rys. 3. Współrzędne stosowane do opisu położenia i orientacji ciała w przestrzeni
Fig. 3. Coordinates applied to locations the description and the orientation of the body in space

Położenie oraz orientację ładunku w przestrzeni otrzymano w wyniku złożenia dwóch obrotów i jednego przesunięcia układu współrzędno:

$$\mathbf{T} = \mathbf{P}_M \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_X \mathbf{P}_Z, \quad (3)$$

gdzie:

\mathbf{P}_M – macierz przemieszczeń wciągarki.

Analityczna zależność opisująca położenie oraz orientację ładunku w przestrzeni roboczej przyjmuje ostatecznie postać:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_4 & -\sin \varphi_4 \cos \varphi_3 & \sin \varphi_4 \sin \varphi_3 & -\sin \varphi_4 \sin \varphi_3 l_5 + q_2 \\ \sin \varphi_4 & \cos \varphi_4 \cos \varphi_3 & -\cos \varphi_4 \sin \varphi_3 & \cos \varphi_4 \sin \varphi_3 l_5 + q_3 \\ 0 & \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & -\cos \varphi_3 l_5 + q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

gdzie:

q_1 – przemieszczenie pionowe wózka wciągarki, q_2 – przemieszczenie mostu suwnicy, q_3 – przemieszczenie wózka wciągarki.

W zależności (4) pierwsze trzy wiersze i kolumny reprezentują macierz orientacji ładunku, natomiast czwarta kolumna położenie ładunku w przestrzeni roboczej. Jeżeli uwzględni się podatność cięgna, to położenie ładunku w przestrzeni dane jest zależnością (5), macierz orientacji pozostaje taka sama:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_4 \sin \varphi_3 (l_5 + q_4) + q_2 \\ \cos \varphi_4 \sin \varphi_3 (l_5 + q_4) + q_3 \\ -\cos \varphi_3 (l_5 + q_4) + q_1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

gdzie:

q_4 – przemieszczenie ładunku wzdłuż osi cięgna.

Disponując wyznaczonymi zależnościami opisującymi położenie w przestrzeni ładunku oraz równaniami więzów (rys. 2), można zapisać zależności analityczne na: energię kinetyczną, potencjalną, dyssypacji, które są podstawą do wyprowadzenia równań różniczkowych ruchu badanego układu.

3. WYNIKI EKSPERYMENTU NUMERYCZNEGO

Tak sformułowany model fenomenologiczny badanego układu umożliwia przeprowadzenie badań ilościowych i jakościowych. Przyjęcie różnych parametrów geometrycznych określających zaczepienie elementów sprężystych pozwala na zbadanie wpływu położenia środka masy wózka na ruch ładunku. W celu przeprowadzenia eksperymentu numerycznego, należy przyjąć parametry fizyczne (tabl. 1).

Tablica 1

Parametry fizyczne badanego układu (wózka z ładunkiem suwnicy pomostowej)

Lp.	Elementy bezwładnościowe		Elementy sprężyste	Elementy dyssypacyjne	Wymiary geometryczne
	[kg]	[kgm ²]	[N/m]	[Ns/m]	[m]
1	m _A = 5055	J _X = 3506	c ₁ = 50·10 ⁴	b ₁ = 10.5·10 ³	l ₁ = 1.15
2	m _B = 12500	J _Y = 3506	c ₂ = 50·10 ⁴	b ₂ = 10.5·10 ³	l ₂ = 1.15
3	-	-	c ₃ = 50·10 ⁴	b ₃ = 10.5·10 ³	l ₃ = 0.85
4	-	-	c ₄ = 50·10 ⁴	b ₄ = 10.5·10 ³	l ₄ = 0.85

m_A-masa wózka suwnicy, m_B-masa ładunku, J_X, J_Y-masowe momenty bezwładności wózka suwnicy, c_i- sztywności zawieszenia wózka suwnicy, b_i-elementy dyssypacyjne zawieszenia wózka suwnicy

Szywność cięgna oszacowana z zależności:

$$c = n \frac{E_L A}{l} \tag{6}$$

gdzie:

n - liczba cięgien, A - pole przekroju poprzecznego cięgna, l - długość cięgna.

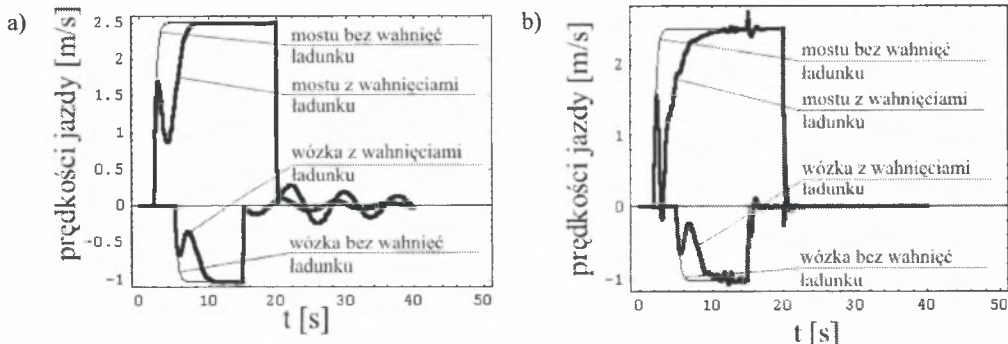
Moduł Younga liny nośnej przyjęto na podstawie danych literaturowych [3],

$$E_L = (0.4 \div 0.65) E \tag{7}$$

gdzie:

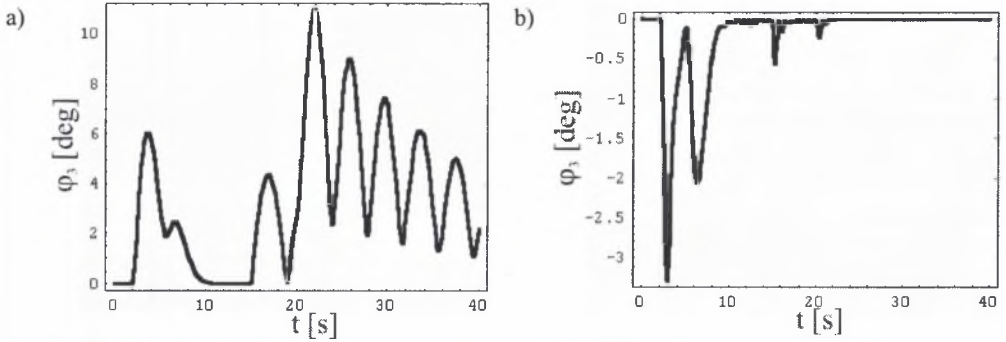
E - moduł Younga materiału, z którego wykonano linę.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabl. 1 przeprowadzono symulacje numeryczne dla modelu z nierozciągliwym i podatnym cięgmem. Ruch badanego układu rozpatrzono w ustalonym oraz niestalonym stanie pracy suwnicy pomostowej.



Rys. 4. Prędkości jazdy wciągarki oraz mostu, masa ładunku m_B=12 500 kg, długość cięgna l₅=15 m: a) dla układu z nierozciągliwym cięgmem, b) dla układu z podatnym cięgmem

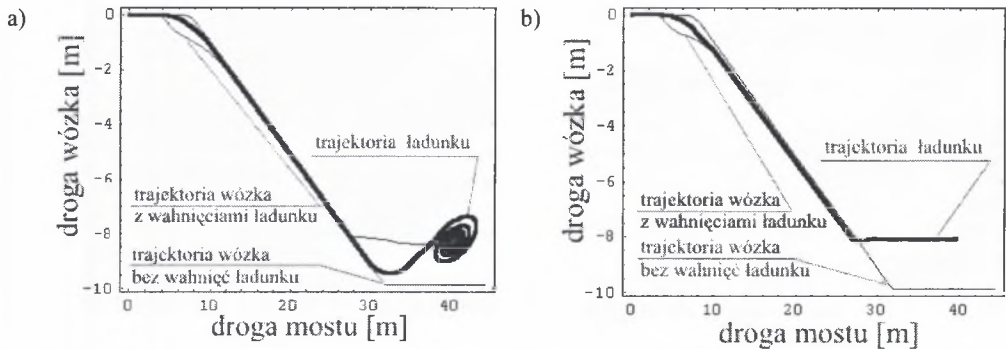
Fig. 4. Speeds of the driving of the winch and the bridge, the mass of the load m_B=12 500 kg, length of the rope l₅=15 m: a) with the fixed rope, b) with susceptible rope



Rys. 5. Wychylenia ładunku od pionu, masa ładunku $m_B=12\,500$ kg, długość cięgna $l_5=15$ m:

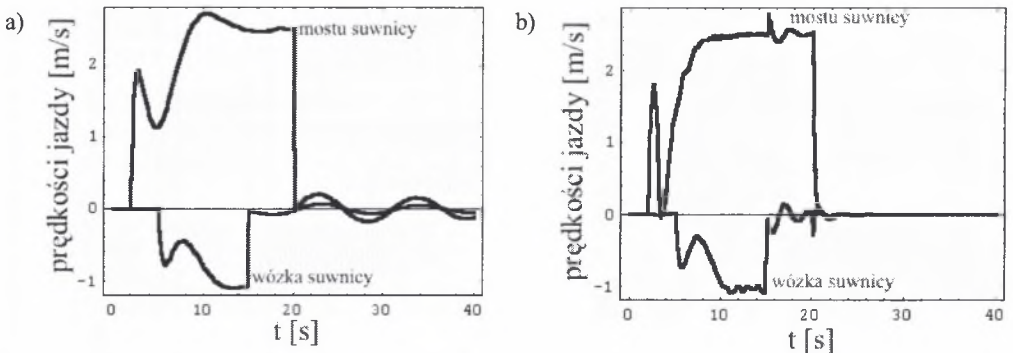
a) dla układu z nierozciągliwym cięgnem, b) dla układu z podatnym cięgnem

Fig. 5. Of bending the load, the mass of the load $m_B=12\,500$ kg, length of the rope $l_5=15$ m: a) with the fixed rope, b) with susceptible rope



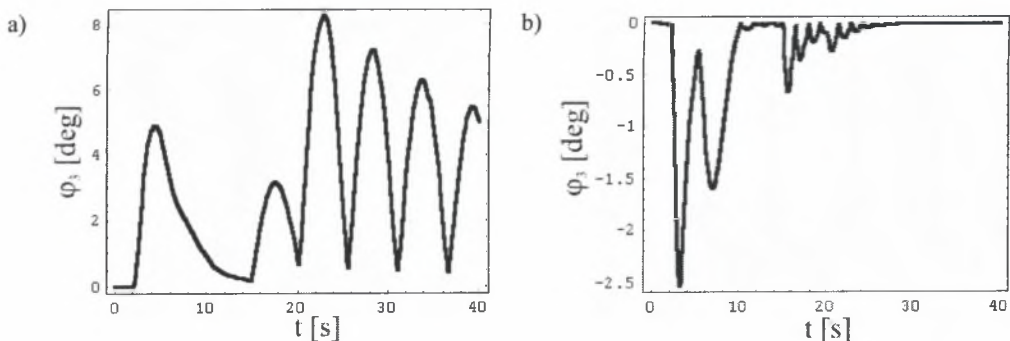
Rys. 6. Trajektorie ładunku i wózka wciągarki, masa ładunku $m_B=12\,500$ kg, długość cięgna $l_5=15$ m: a) dla układu z nierozciągliwym cięgnem, b) dla układu z podatnym cięgnem

Fig. 6. Trajectories of the load and winches, the mass of the load $m_B=12\,500$ kg, length of the rope $l_5=15$ m: a) with the fixed rope, b) with susceptible rope



Rys. 7. Prędkości jazdy wciągarki oraz mostu, masa ładunku $m_B=12\,500$ kg, długość cięgna $l_5=30$ m: a) dla układu z nierozciągliwym cięgnem, b) dla układu z podatnym cięgnem

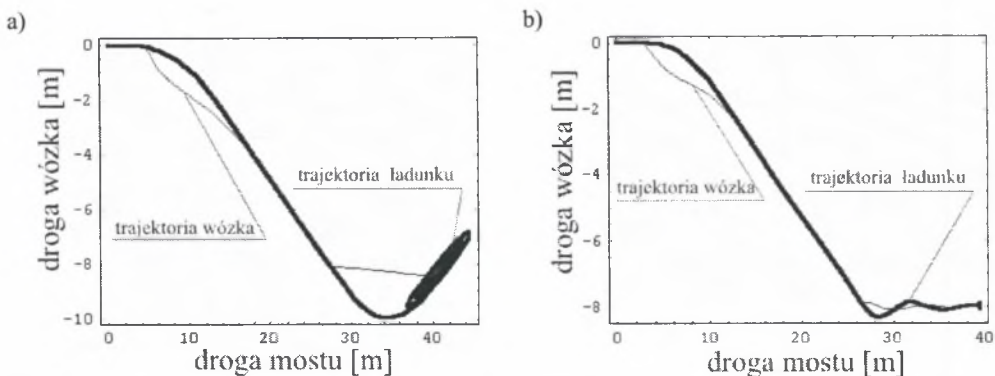
Fig. 7. Speeds of the driving of the winch and the bridge, the mass of the load $m_B=12\,500$ kg, length of the rope $l_5=30$ m: a) with the fixed rope, b) with susceptible rope



Rys. 8. Wychylenia ładunku od pionu, masa ładunku $m_B=12\ 500$ kg, długość cięgna $l_5=30$ m:

a) dla układu z nierozciągliwym cięgmem, b) dla układu z podatnym cięgmem

Fig. 8. Of bending the load, the mass of the load $m_B=12\ 500$ kg, length of the rope $l_5=30$ m: a) with the fixed rope, b) with susceptible rope



Rys. 9. Trajektorie ładunku i wózka wciągarki, masa ładunku $m_B=12\ 500$ kg, długość cięgna $l_5=30$ m:

a) dla układu z nierozciągliwym cięgmem, b) dla układu z podatnym cięgmem

Fig. 9. Trajectories of the load and winches, the mass of the load $m_B=12\ 500$ kg, length of the rope $l_5=30$ m: a) with the fixed rope, b) with susceptible rope

W pracy przedstawiono wyniki numerycznych badań trajektorii ładunku w ruchu przestrzennym. Wyniki badań trajektorii ładunku modeli, w których cięgno potraktowano jako nierozciągliwe oraz podatne, porównano z trajektorią układu wózek ładunek, gdzie nie występują wahnięcia transportowanego ciężaru. Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych można stwierdzić:

- wahnięcia ładunku wpływają niekorzystnie na prędkość jazdy mostu oraz wciągarki, w wyniku czego teoretyczna pozycja docelowa nie zostaje osiągnięta (rys. 6, rys. 9). Na takie zachowanie układu decydujący wpływ ma stała czasowa opisująca fazę rozruchu (wychylenie ładunku powoduje, że układ po dłuższym czasie osiąga zadaną prędkość rys. 4 i rys. 7).
- Moment włączenia mechanizmu jazdy wózka i/lub mostu suwnicy pomostowej powoduje wytrącenie ładunku z położenia równowagi do chwili zatrzymania mechanizmów wykonawczych (rys. 5, rys. 8).
- Uwzględnienie podatności cięgna sprawia, że wahnięcia ładunku zostają szybciej wytłumione (rys. 5a, rys. 5b, rys. 8a, rys. 8b).

- Uwzględnienie podatności cięgna istotnie wpływa na wartość wychylenia ładunku od położenia równowagi (rys. 5, rys. 8).
- Długość cięgna ma znaczący wpływ na wartość wychylenia ładunku od pionu, zarówno dla modelu z nierozciągliwym cięgnem, jak i również z podatnym cięgnem (rys. 5 i rys. 8).

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych można stwierdzić, że wybór modelu fenomenologicznego przyjętego do przeprowadzenia symulacji komputerowej ma istotne znaczenie dla odwzorowania rzeczywistych warunków pracy badanej maszyny roboczej. Należy w dalszym ciągu prowadzić badania numeryczne mające na celu badanie trajektorii ładunku. Ponadto istotnym elementem badań prowadzonych w przyszłości jest określenie wpływu trajektorii na wartość oddziaływań dynamicznych przenoszonych na kabinę maszyny roboczej.

Literatura

1. Craig J.: Wprowadzenie do robotyki. Mechanika i sterowanie. WNT, Warszawa 1995.
2. Morecki A., Knapczyk J.: Podstawy robotyki, Teoria i elementy manipulatorów i robotów. WNT, Warszawa 1993.
3. Piątkiewicz A., Sobolski R.: Dźwignice. Warszawa, WNT 1977, t. 1 i 2.
4. Szpytko J., Schab J., Smoczek J.: Badania modeli suwnic pomostowych dla potrzeb eksploatacyjnych. Kwartalnik – Transport Przemysłowy 4(10), 2002. s.40÷44.
5. Tomczyk J., Bednarski S.: Własności energetyczne żurawia portowego o napędzie elektromechanicznym i hydrostatycznym. Kwartalnik – Transport Przemysłowy nr 2, 2000. s.30÷34.
6. Uciński J. (red): Badania teoretyczne i doświadczalne możliwości zmniejszenia obciążeń dynamicznych w układach napędowych nawrotnych mechanizmów dźwignic. Prace Naukowe Centralnego Programu Badań Podstawowych 02.05. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1990.
7. Wojnarowski J., Żochowski L., Banaś W.: Badania numeryczne mechanizmu zawieszenia układu samochodowego grafami wiązań. XVII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Dydaktyczna Teorii Maszyn i Mechanizmów. Warszawa - Jachranka 2000, s.431÷436.

Recenzent: Dr hab. inż. Manfred Chmurawa