

Andrzej NOWAK, Józef WOJNAROWSKI  
Katedra Mechaniki Robotów i Maszyn  
Politechnika Śląska

### WRAŻLIWOŚĆ ZJAWISKA ODBICIA SUWNICY ZE WZGLĘDU NA PARAMETRY PROJEKTOWE

Streszczenie. W pracy sformułowano zagadnienie oceny wrażliwości ruchu suwnicy pomostowej wywołanego zjawiskiem odbicia. W szczególności zbadano wpływ rozkładu masy i sztywności układu oraz imperfekcji geometrycznych jezdni na ukosowanie suwnicy oraz przebiegi sił bocznych.

### SENSITIVITY OF REFLECTION PHENOMENON OF BRIDGE CRANE REDEARD TO THE DESIGN PARAMETERS

Summary. In the paper the problem of estimate of sensitivity of crane motion by influence of reflection phenomenon has been formulated. In particular the influence of disposition of masses and stiffness and geometrical imperfections of track on bevel of crane and courses of side forces were investigated.

### ЧУСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЯВЛЕНИЯ ОТРАЖЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА ДЛЯ ПРОЙЕКТИРОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Резюме. В работе рассмотрено проблему оценки чувствительности движения мостового крана возникающего явлением отражения. В особенности исследовано влияние распределения массы и податливости системы а тоже геометрических имперфекций рельсов на движение крана и значения боковых сил.

#### 1. WSTĘP

W pracy sformułowano zagadnienie oceny wpływu parametrów projektowych na dynamikę jazdy suwnicy pomostowej z uwzględnieniem zjawiska odbicia. [1,2]. Oceny wpływu parametrów na ukosowanie i odbicie suwnicy dokonano metodą analizy wrażliwości, zarówno strukturalnej

jak i parametrycznej. W zakresie wrażliwości strukturalnej dokonano oceny wpływu asymetrii rozkładu masy i sztywności układu na ukosowanie suwnicy oraz pole obciążeń poziomych, uwzględniając imperfekcje geometryczne jezdni i charakterystyk napędowych mechanizmów jazdy suwnicy, z silnikami prądu stałego. Analiza tego rodzaju posiada znaczenie na etapie doboru układu regulacji ruchu suwnicy z kompensacją ukosowania [3].

## 2. MODEL MATEMATYCZNY RUCHU SUWNIICY

Schemat fizyczny suwnicy pokazano na rys.1 natomiast model kinematyczny układu napędowego jazdy na rys.2. Model drganiowy suwnicy opracowano zgodnie z metodą SES i przedstawiono na rys.3. W układzie napędowym jazdy suwnicy wyróżniono silnik elektryczny prądu stałego, którego schemat pokazano na rys.1. W modelu zaznaczono przez  $H_i$ ,  $T_x$ ,  $T_y$  siły boczne i siły tarcia poślizgowego kół. Przez  $k_{si}$ ,  $i = 1,2,3,4$  oznaczono zredukowane sztywności poprzeczne jezdni w punktach kontaktu kół z szyną.

Drgania suwnicy opisano układem równań różniczkowych w zapisie macierzowym:

$$M_m \ddot{q}_m + C_m \dot{q}_m + K_m q_m = F_w(t) + R_m, \quad (1)$$

gdzie  $F_w(t)$ ,  $R_m$  są macierzami kolumnowymi sił wymuszających i sił bocznych.

Ukosowanie mostu opisano układem równań różniczkowych dla modelu ciała sztywnego:

$$\begin{aligned} m_m \ddot{u}_c &= F_n + T_x - \psi (T_y + H), \\ m_m \ddot{w}_c &= \psi (F_n + T_x) + T_y + H, \\ J_c \ddot{\psi} &= M'_c + M_c^H + M'_{\alpha} + M'_{\gamma}, \end{aligned} \quad (2)$$

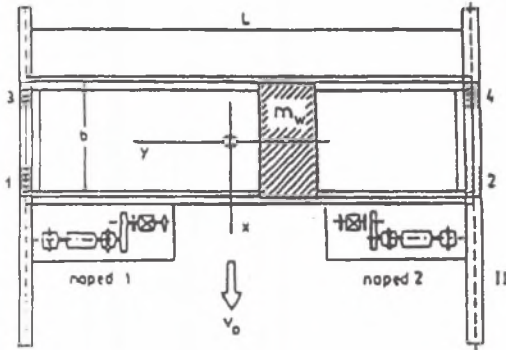
gdzie

$$F_n = F_{1n} + F_{2n}, \quad T_x = \sum_{i=1}^4 T_{ix}, \quad T_y = \sum_{i=1}^4 T_{iy}, \quad H = \sum_{i=1}^4 H_i,$$

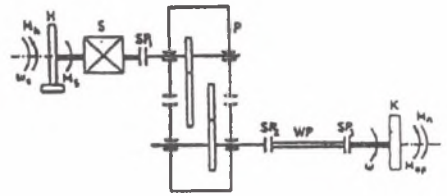
$$M'_{\alpha} = (T_{2x} + T_{\alpha}) d_2 - (T_{1x} + T_{\alpha}) d_1, \quad d_1 = y_w, \quad d_2 = L - y_w,$$

$$M'_{\gamma} = (T_{1y} + T_{\gamma} - T_{2y} - T_{\gamma}) b/2, \quad M_c^H = F_{2n} d_2 - F_{1n} d_1.$$

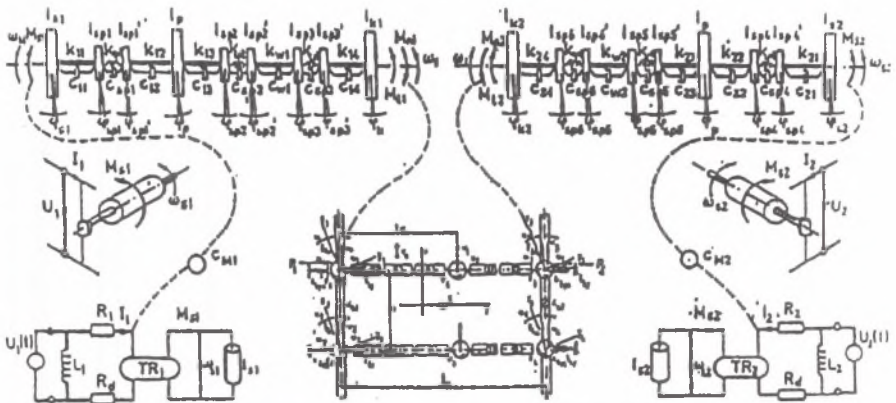
Siłę boczną określono jako wypadkową oddziaływań poprzecznych pomiędzy kołem a jezdnią:



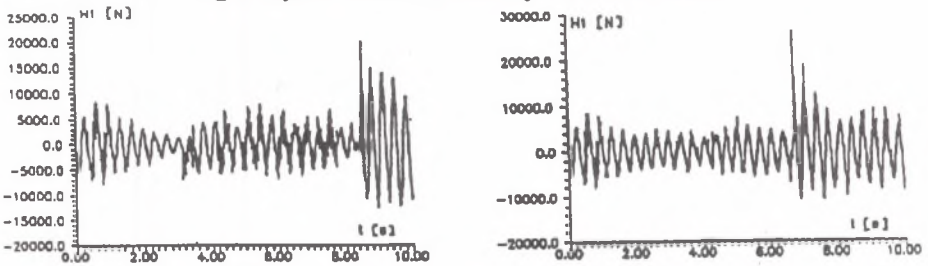
Rys. 1. Schemat fizyczny suwnicy  
Fig. 1. Scheme of physical model of crane



Rys. 2. Model kinematyczny mechanizmu jazdy  
Fig. 2. Kinematical model of drive mechanism



Rys. 3. Model dynamiczny suwnicy wg metody SES  
Fig. 3. Dynamic model of crane by use of SES method



Rys. 4. Siła boczna koła 1 dla obydwu położenia wózka  
Fig. 4. Side force of wheel 1 for both situation of car

$$H_i = S_i + (k_n w_i + c_n \dot{w}_i) , \quad (3)$$

gdzie  $w_i$  oznacza przemieszczenie jezdni,  $S_i$  jest siłą zderzeniową przy odbiciu.

Ruch suwnicy bez zderzenia odbywa się w granicach luzu pomiędzy kołem a szyną, co stanowi więzy geometryczne w układzie.

Dla układu napędowego jazdy suwnicy, przy uwzględnieniu podatności wałków oraz modelu elektrycznego silnika prądu stałego można napisać równania:

$$J_n \ddot{q}_n + c_n \dot{q}_n + K_n q_n = M_n - M_{sp} , \quad (4)$$

$$L_n \dot{I}_n + R_n I_n = U_0 - k_n \omega_p , \quad M_n = i_p M_p , \quad M_p = K I_n . \quad (5)$$

W równaniu (5) przez  $I_n$ ,  $M_n$  oznaczono natężenie prądu i moment elektromechaniczny silnika.

### 3. MODEL WRAŻLIWOŚCI ZJAWISKA ODBICIA

Algorytm badania wrażliwości ruchu suwnicy i zjawiska odbicia sformułowano na podstawie modelu matematycznego jej dynamiki, opisanego równaniami (1),(2),(3),(4),(5). Różniczkując względem parametru projektowego  $p$  równania ruchu określono model wrażliwości:

$$\begin{aligned} M_n \ddot{w}_{pn} + C_n \dot{w}_{pn} + K_n w_{pn} &= H_p(t) , \\ m_n \ddot{w}_{pnc} &= F_{pn} + T_{pn} - \psi_p (T_p + H) - \psi (T_{pn} + H_p) , \\ m_n \ddot{w}_{pnc} &= H_p + T_{pn} + \psi_p (T_n + F_n) + \psi (T_{pn} + F_{pn}) , \\ J_n \ddot{w}_{pn} + C_n \dot{w}_{pn} + K_n w_{pn} &= M_{pn} - M_{sp} , \\ L_n \dot{w}_{ip} + R_n w_{ip} &= -k_n w_{sp} , \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie

$$\begin{aligned} w_{pn} &= \frac{\partial q_n}{\partial p} , \quad R_p = \frac{\partial R}{\partial p} , \quad w_{pc} = \frac{\partial u_c}{\partial p} , \quad w_{pn} = \frac{\partial w_c}{\partial p} , \\ F_{pn} &= \frac{\partial F_n}{\partial p} , \quad T_{pn} = \sum_{i=1}^4 T_{pi} , \quad T_{pn} = \sum_{i=1}^4 T_{pi} , \quad H_p = \sum_{i=1}^4 H_{pi} . \end{aligned} \quad (7)$$

Funkcję wrażliwości siły bocznej określono na podstawie zależności (3):

$$H_{lp} = S_{lp} + (K_{el} W_{wl} + C_{el} \dot{W}_{wl}) \quad (8)$$

Na podstawie zadanych tolerancji parametrów i współczynników wrażliwości można oszacować zmiany badanych wielkości:

$$\delta w = W_p \delta p \quad , \quad (9)$$

$$W_p = \left[ \frac{\partial q_p}{\partial p} \right] = [W_p] \quad , \quad \delta w = \text{col} [w_{pm}, w_{puc}, w_{pwo}] \quad ,$$

gdzie  $W_p$  oznacza macierz wrażliwości układu,  $q_p$  jest współrzędną uogólnioną.

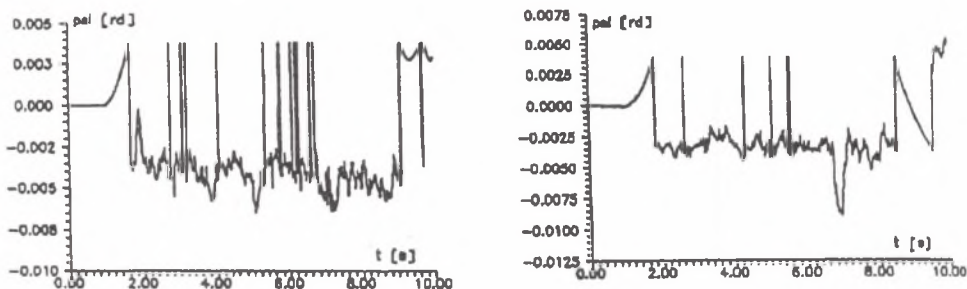
Wrażliwość parametryczna jest miarą oceny wpływu zmian wartości parametrów układu na badane wielkości. Stosując tę metodę możliwa jest minimalizacja sił bocznych suwnicy ze względu na sztywność układu: most - jezdni. W pracy istotne znaczenie posiada również wrażliwość strukturalna, która dotyczy wpływu zmian struktury układu na jego charakterystyki. W tym zakresie zmiany struktury dotyczą:

- rozkładu masy układu uwzględniając zmienne położenie wózka na moście oraz różną masę nosiwa,
- rozkładu sztywności układu, uwzględniając zmienną sztywność jezdni wzdłuż toru,
- struktury układu napędowego mechanizmu jazdy w sensie jednego lub dwóch niezależnych układów napędowych z silnikami prądu stałego lub asynchronicznymi,
- imperfekcji geometrycznych jezdni w sensie odstępstwa od prostoliniowości.

#### 4. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Szczegółowe obliczenia przeprowadzono na przykładzie suwnicy pomostowej o rozpiętości  $L = 32$  [m] oraz udźwigu  $Q = 50$  [kN]. Analizę przeprowadzono dla dwóch stacjonarnych położen wózka na moście, przyjmując położenie środkowe na moście  $y_w = 16$  [m] oraz poł ożenie asymetryczne  $y_w = 24$  [m]. Imperfekcje geometryczne jezdni wyrażono funkcją: harmonicznie zmienną, która uwzględnia odchyłkę od prostoliniowości:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \sin(\lambda x) \quad , \quad \varepsilon_0 = 0.01 \text{ [m]} \quad , \quad \varepsilon_1 = 0.005 \text{ [m]} \quad , \quad \lambda = 2\pi f_0 \quad , \quad f_0 = 1 \text{ [1/m]} \quad .$$



Rys.5. Przebiegi kąta ukosowania suwnicy dla jazdy nieprostoliniowej  
 Fig.5. Courses of bevel angel of crane for nonlinear track

W wyniku obliczeń wyznaczono przebiegi siły bocznej koła 1 w obydwu położeniach wózka przy uwzględnieniu imperfekcji geometrycznych jezdni (rys.4 a,b) oraz znaną kąta ukosowania suwnicy (rys.5a,b). Wartości kąta ukosowania są ograniczone przez więzy geometryczne w układzie i wynikające z luzu pomiędzy obrzeżem koła a szyną.

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Wyniki obliczeń potwierdziły istotny wpływ asymetrii rozkładu masy oraz imperfekcji geometrycznych jezdni na ukosowanie oraz zjawisko odbicia suwnicy. Czynniki te powinny być uwzględnione przy realizacji zadania związanego z regulacją ruchu suwnicy. Wnioski w zakresie wpływu sztywności jezdni na ruch suwnicy sformułowano w pracy [2].

## LITERATURA

- [1] Wojnarowski J., Oziemski S., Nowak A.: Modelling of reflection phenomenon during the bridge crane drive. Wydawn.Nauk. Politechn. Warsz.,Warszawa 1990
- [2] Nowak A., Wojnarowski J.: Wrażliwość obciążeń poziomych suwnicy ze względu na sztywność układu. Zbiór refer. VII Konfer." Problemy rozwoju maszyn roboczych", Warszawa-Zakopane 1994, s. 113-120
- [3] Nowak A.: Eliminacja ukosowania suwnicy wywołanego zjawiskiem odbicia. ZN Polit. Sl., s. Mechanika, nr 115, Gliwice 1993, s.279-286

Praca realizowana jest w projekcie badawczym nr 3 P402 055 04 finansowanym przez KBN

Recenzent: prof. dr hab. J.Maryniak

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1994 r.