

## WPLYW CECH GEOMETRYCZNYCH USTROJU NOŚNEGO DŹWIGNICY NA OBCIĄŻENIA DYNAMICZNE WYWOŁANE JAZDĄ PO NIERÓWNOŚCIACH

**Marcin JASIŃSKI\***

\* Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska  
e-mail: marcin.jasinski@pwr.wroc.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 22.02.2012 r., Zweryfikowaną i poprawioną wersję po recenzjach i korekcie otrzymano w sierpniu 2012 r.

*W artykule omówiono wpływ cech geometrycznych ustroju nośnego dźwignicy torowej na jego obciążenia dynamiczne wywołane jazdą po nierównościach. Badania eksperymentalne przeprowadzono na dwóch dźwignicach o odmiennych geometriach ustroju nośnego. Na podstawie wyników pomiarów wyznaczono wartość tzw. współczynnika proporcjonalności dla każdego z ustrojów tych dźwignic i porównano je z obliczonymi na podstawie wymiarów ustroju. Wyznaczone współczynniki proporcjonalności, wynikające ze wspomnianych cech geometrycznych, wprowadzono do wzoru na obciążenia dynamiczne przedstawionego w aktualnej normie obliczeniowej dźwignic. Wartości tych obciążeń otrzymane z obliczeń nie odbiegały znacząco od tych wyznaczonych podczas badań eksperymentalnych, co potwierdziło słuszność stosowania współczynnika proporcjonalności zależnego od geometrii ustroju nośnego dźwignicy.*

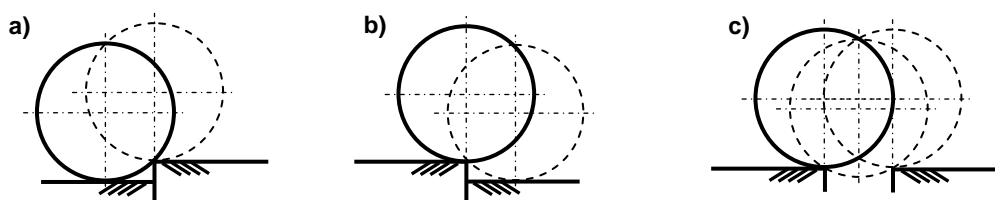
**Słowa kluczowe:** dźwignice, obciążenie dynamiczne, jazda po nierównościach

### WSTĘP

W miejscach połączeń szyn dźwignicowych torów jezdnych mogą wystąpić nierówności typu próg (różnica wysokości między główkami szyn) i szczelina (rys. 1). Wielkości nierówności typu próg mogą dochodzić do 5 mm, a w skrajnych przypadkach nawet do 10 mm, natomiast szczeliny do 20-30 mm [1].

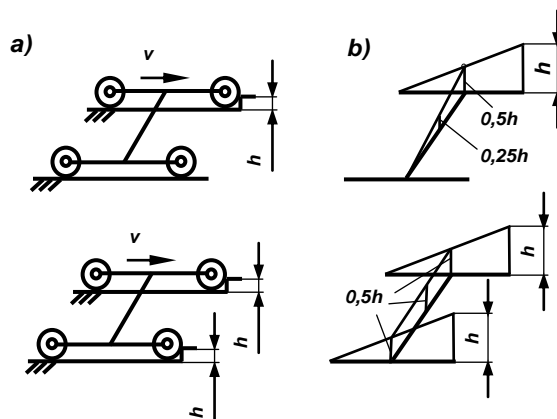
Wymienione imperfekcje połączeń szyn są przyczyną powstawania pionowych obciążeń dynamicznych ustroju nośnego dźwignicy podczas jazdy. Znajomość ww. obciążeń jest istotna do ich prawidłowego wymiarowania dźwignic. Na wartość tych obciążeń wpływa wiele czynników, które wynikają m.in. z cech konstrukcyjnych ustroju nośnego i układów jezdnych dźwignic (złożoności zestawów kołowych, rozkładu kół itp.), a także podatność kół jezdnych [6 – 8].

W dotychczasowych obliczeniach wspomnianych obciążeń dynamicznych analizowano najazd na nierówność kół jednej strony ustroju nośnego dźwignicy [3] oraz jednoczesny najazd dwóch kół jezdnych po obu stronach ustroju nośnego [1, 4] (rys. 2).



Rys. 1. Nierówności w miejscach styku szyn torów jezdnych dźwignicy: a) najazd na próg, b) zjazd z progu, c) przejazd przez szczelinę

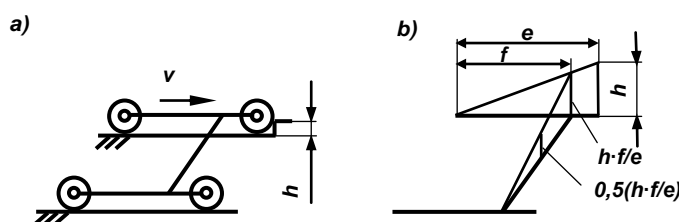
Źródło: [1]



Rys. 2. Pionowe quasi-statyczne przemieszczenia bisymetrycznego ustroju nośnego dźwignicy podczas najazdu na nierówność typu „ostry próg” o wysokości  $h$ :

a) schemat dźwignicy, b) rozkłady pionowych przemieszczeń ustroju nośnego

Źródło: [6, 8]



Rys. 3. Pionowe quasi-statyczne przemieszczenia asymetrycznego ustroju nośnego dźwignicy względem kół jezdnych podczas najazdu na nierówność typu „ostry próg” o wysokości  $h$ :

a) schemat dźwignicy, b) rozkłady pionowych przemieszczeń ustroju nośnego

Źródło: Opracowanie własne

W normach [9, 10] modelu założono, że na nierówność najeżdżają wszystkie koła dźwignicy równocześnie. Założenie takie jest jednak dyskusyjne, bo mało prawdopodobne jest, aby wszystkie koła jednocześnie przejeżdżały przez cztery nierówności (choć jest to najbardziej niekorzystny przypadek wymuszenia). Bardziej prawdopodobny jest przypadek równoczesnego najazdu obu kół po lewej i prawej stronie dźwignicy. Natomiast najbardziej prawdopodobny jest najazd jednego koła dźwignicy na jedną nierówność.

Wyznaczając obciążenia dynamiczne dźwignicy wywołane przejazdem jednego koła przez nierówność, należy przyjąć dodatkowe założenia i uproszczenia, co do wartości sztywności skrętnej ustroju nośnego oraz jego cech geometrycznych (rys. 3).

## 1. EKSPERYMENTALNE USTROJE NOŚNE DŹWIGNIC

Do określenia wpływu cech geometrycznych ustroju nośnego dźwignicy na wartość pionowych obciążeń dynamicznych wymuszanych podczas jazdy po nierównościach torowiska wykorzystano dwa doświadczalne ustroje nośne dźwignic (rys. 4 i rys. 5) z czterema kołami jezdnymi.



Rys. 4. Widok eksperymentalnego bisymetrycznego ustroju nośnego dźwignicy wraz z ładunkiem: a) widok z dołu, b) widok z poziomu torowiska

*Źródło: Opracowanie własne*

Przedstawiony na rysunku 4 doświadczalny ustrój nośny dźwignicy posiada dwie osie symetrii (ustrój bisymetryczny) – względem środka rozpiętości dźwigara oraz wzdłuż jego osi.

Natomiast drugi ustrój nośny (rys. 5) ma tylko jedną oś symetrii – względem jego środka rozpiętości. W tym ustroju nośnym punkt połączenia dźwigara z czołownicą jest przesunięty względem środka rozstawu jej kół jezdnych (rys. 5b).

W celu pomiarowego wyznaczenia maksymalnych obciążeń dynamicznych ustrojów nośnych w ich wybranych punktach naklejono rozety tensometryczne połączone w układzie pełnego mostka.

Wzorcowanie układów pomiarowych mierzących dynamiczne oddziaływania na ustrój nośny przeprowadzono z wykorzystaniem odważników o znanych masach. Zadany obciążeniom przypisywano wartości sygnału elektrycznego wychodzącego z mostka tensometrycznego.



Rys. 5. Widok eksperymentalnego ustroju nośnego dźwignicy z asymetrycznie usytuowanym dźwigarem względem kół jezdnych: a) widok z poziomu torowiska, b) widok geometrii ustroju nośnego względem kół jezdnych, c) punkt pomiarowy w środku rozpiętości ustroju nośnego

*Źródło: Opracowanie własne*

## 2. POMIARY PIONOWYCH OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH USTROJU NOŚNEGO

Pomiary obciążeń dynamicznych ustrojów nośnych przeprowadzono podczas przejazdu przez nierówność typu ostry próg o wysokości 2 mm, jednej strony dźwignicy. Badania realizowano przy dwóch prędkościach jazdy dźwignic, które wynosiły 0,5 m/s i 1 m/s. Oba ustroje posiadały taką samą częstotliwość drgań własnych wynoszącą  $f = 8$  Hz i identyczne koła jezdne ( $\varnothing 150$  mm).

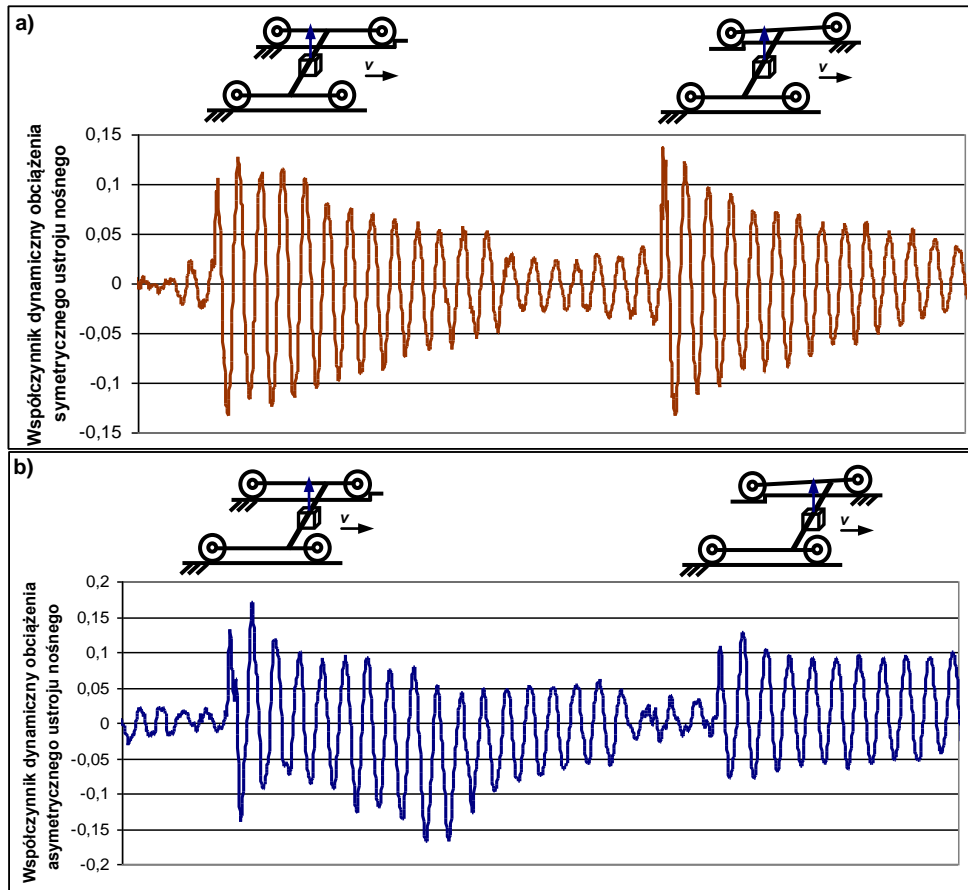
W pomiarach rejestrowano wskazania tensometrycznych układów pomiarowych mierzących pionowe obciążenia dynamiczne ustroju nośnego.

Do pomiarów oraz obliczeń przyjęto następujące założenia:

- dźwignica przejeżdża przez nierówność ze stałą prędkością  $v$  – zmiana prędkości podczas pokonywania nierówności jest pomijalnie mała;
- sztywność promieniowa kół jezdnych w kierunku pionowym jest liniowa,

masa zredukowana znajduje się w środku rozpiętości ustroju nośnego i stanowi sumę masy podniesionego ładunku, masy wciągarki i zredukowanej do tego środka połowy masy ustroju nośnego;

- dynamiczne oddziaływania lin pominięto – założono, że masa podniesionego ładunku znajduje się w najwyższym położeniu;
- sztywność skrętną względem wzdłużnej osi ustroju nośnego dźwignicy pominięto.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi współczynnika dynamicznego pionowych obciążeń dynamicznych ustroju nośnego podczas przejazdu przez nierówność: a) pionowe obciążenia dynamiczne symetrycznego ustroju nośnego względem kół jezdnych, b) pionowe obciążenia dynamiczne asymetrycznego ustroju nośnego względem kół jezdnych

Źródło: Opracowanie własne, [11]

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe przebiegi pionowych obciążeń dynamicznych ustrojów nośnych dźwignic. Prezentowane przebiegi zostały zarejestrowane podczas przejazdu bisymetrycznej i asymetrycznej dźwignicy o następujących parametrach:

- prędkość jazdy – 0,5 m/s;
- częstotliwość drgań własnych ustroju nośnego – 8 Hz;
- koła jezdne o średnicy 150 mm;
- nierówność typu ostry próg o wysokości 2 mm;

- częstotliwość próbkowania wynosiła 400 Hz.

Z przedstawionego na rysunku 6a wykresu wynika, że w dźwignicach o symetrycznym układzie ustroju nośnego względem kół jezdnych przejazd każdego koła przez nierówność powoduje porównywalne obciążenia dynamiczne ustroju, natomiast w przypadku układu niesymetrycznego (rys. 6b) większe są obciążenia ustroju znajdującego się bliżej koła najeżdżającego na nierówność.

### 3. WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA PROPORCJONALNOŚCI ZALEŻNEGO OD CECH GEOMETRYCZNYCH USTROJU NOŚNEGO

Należy zauważyć, że na wartość współczynnika proporcjonalności  $k$  nie wpływa tylko geometria ustroju nośnego, ale także ilości kół jezdnych przejeżdżających przez nierówność oraz ich sposób zamocowania (sztywne, układy wahaczowe) [8]. Przeprowadzana analiza dotyczy tylko geometrii ustroju nośnego, ponieważ badania prowadzone są na dźwignicach czterokołowych.

W przypadku najazdu jednego koła dźwignicy bisymetrycznej, w której masa zredukowana znajduje się w środku rozpiętości ustroju nośnego, wartość współczynnika  $k$  przyjęto równą 0,25 (rys. 2), natomiast dla drugiego ustroju współczynnik ten wynosi 0,37 (rys. 3).

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych obliczono wartości współczynników obciążeń dynamicznych ustrojów nośnych wywołanych jazdą po nierównościach oraz współczynników proporcjonalności w zależności od geometrii ustroju nośnego. Zestawienie wartości tych współczynników umieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wartości współczynników obciążeń dynamicznych ustrojów nośnych wywołanych jazdą po nierównościach oraz współczynników proporcjonalności w zależności od geometrii ustroju nośnego dla prędkości jazdy 0,5 [m/s]

Geometria ustroju nośnego	Wartości współczynnika obciążeń dynamicznych ustroju nośnego dźwignicy				Współczynnik proporcjonalności $k$ zależny od geometrii ustroju nośnego			
					wyznaczony z pomiarów		wyznaczony z geometrii ustroju	
	najazd pierwszego koła		najazd drugiego koła		najazd pierwszego koła	najazd drugiego koła	najazd pierwszego koła	najazd drugiego koła
symetryczna	0,127	±0,010	0,135	±0,009	0,27	0,23	0,25	0,25
asymetryczna	0,159	±0,008	0,095	±0,008	0,32	0,18	0,37	0,13

*Źródło: Opracowanie własne*

Wyznaczone podczas badań wartości ww. współczynnika w przypadku ustrojów symetrycznych są porównywalne z obliczonymi na podstawie geometrii, a w przypadku układów niesymetrycznych różnica między nimi wynosi 13% (dla większych wartości współczynnika).

#### 4. OBLICZANIE OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH USTROJU NOŚNEGO NA PODSTAWIE NORM I LITERATURY Z UWZGLĘDNIENIEM JEGO CECH GEOMETRYCZNYCH

Obecnie obciążenia dynamiczne ustroju nośnego dźwignicy przejeżdżającej przez nierówność, wyrażone bezwymiarowym współczynnikiem  $\phi_4$ , wyznacza się wg norm europejskich i międzynarodowych [9, 10]. W publikacjach naukowych pojawiły się krytyczne oceny założeń przyjętych do wyznaczenia ww. współczynnika dynamicznego oraz zaproponowano inny sposób jego obliczania [6, 7].

W obliczeniach posłużono się bezwymiarowym współczynnikiem dynamicznym, który jest równy stosunkowi siły dynamicznej do obciążenia statycznego pochodzącego od mas własnych.

Wartość nadwyżki dynamicznej  $\alpha_4$ , gdzie  $\alpha_4 = \phi_4 - 1$ , obliczono zgodnie ze wzorami z norm [9, 10] z uwzględnieniem ww. współczynnika proporcjonalności  $k$ :

$$\delta_4 = \phi_4 - 1 = k \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{v^2}{gR} \cdot \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} \cdot 2 \cos\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right), \quad (1)$$

przy czym 
$$\alpha = \frac{\omega}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2Rh}}{v}, \quad (2)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik proporcjonalności zależny od geometrii ustroju nośnego [–],

$v$  – prędkość jazdy dźwignicy [m/s],

$R$  – promień koła jezdnego [m],

$h$  – wysokość nierówności [m],

$\omega$  – częstość drgań własnych [rad/s]

$g$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>].

Wzory na obliczenie wartości nadwyżki dynamicznej  $Fi$  wg [7]:

$$Fi = k \cdot \frac{v^2}{gR} \cdot 2 \sin\left(\frac{\omega t_s}{2}\right), \quad (3)$$

przy czym 
$$t_s \cong \frac{\sqrt{2Rh}}{v}, \quad (4)$$

gdzie:

$t_s$  – czas przejazdu przez nierówność [s].

Do wyznaczenia obciążeń dynamicznych według norm i literatury użyto wartość współczynnika proporcjonalności  $k$  obliczonego na podstawie geometrii ustroju nośnego, jednocześnie przy ustroju asymetrycznym w obliczeniach uwzględniano większą wartość tego współczynnika (tabela 2).

Zastosowanie w obliczeniach ww. współczynnika wyznaczonego na podstawie wymiarów ustroju nośnego ma na celu sprawdzenie słuszności założeń upraszczają-

cych, które są niezbędne w praktyce inżynierskiej do szybkiego szacowania omawianych obciążeń.

Podczas analizowania wyników badań eksperymentalnych, w celu oszacowania pionowych obciążeń dynamicznych ustroju nośnego, brano pod uwagę największe wartości obciążeń występujących podczas najazdu na nierówność.

Tabela 2. Wartości współczynników dynamicznych obciążeń ustrojów nośnych dźwignic wywołanych przejazdem przez nierówność typu ostry próg o wysokości 2 mm z uwzględnieniem cech geometrycznych ustroju

Geometria ustroju nośnego	Częstotliwość drgań własnych ustroju nośnego Hz	Prędkość jazdy dźwignicy m/s	Wartość współczynnika $k$ zależnego od geometrii ustroju nośnego –	Obliczone wartości współczynnika dynamicznego		Wartości współczynnika dynamicznego wyznaczonego na podstawie badań
				ze wzoru (1)	ze wzoru (3)	
symetryczna	8	1	0,25	0,13	0,28	0,17
asymetryczna			0,37	0,19	0,42	0,20
symetryczna	8	0,5	0,25	0,12	0,13	0,13
asymetryczna			0,37	0,17	0,19	0,16

*Źródło: Opracowanie własne*

Wartości współczynnika dynamicznego obliczonego wg norm europejskich [9, 10] ze wzoru (1) z wykorzystaniem współczynnika proporcjonalności  $k$  zależnego od cech geometrycznych ustroju nośnego są zbliżone do wartości uzyskanych z badań eksperymentalnych.

Wyniki obliczeń współczynnika obciążeń dynamicznych na podstawie wzoru (3) przy prędkości jazdy wynoszącej 0,5 m/s są również zbliżone do tych uzyskanych z badań eksperymentalnych, jednak przy wyższej prędkości jazdy równej 1 [m/s] występuje znaczna rozbieżność (przeszacowanie).

## PODSUMOWANIE

Wartości pionowych obciążeń dynamicznych obliczone z uwzględnieniem współczynnika proporcjonalności zależnego od cech geometrycznych ustroju nośnego są zbliżone do wartości wyznaczonych na podstawie badań eksperymentalnych.

Wyznaczenie ww. współczynnika proporcjonalności na podstawie wymiarów ustroju nośnego jest wystarczające do oszacowania pionowych obciążeń dynamicznych wywołanych jazdą po nierównościach.

Pominięcie odkształceń wskutek skręcania ustroju nośnego podczas przejazdu przez nierówność nie wpłynęła znacząco na wartość pionowych obciążeń dynamicznych.





Zadanie współfinansowane przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

## LITERATURA

1. Kazak S.A., *Dinamika mostowych kranov. Mašinostroenie*, Moskva 1968.
2. Piątkiewicz A., Sobolski R., *Dźwignice*. WNT, Warszawa 1978.
3. Goetzlinger J., Johnsson S., *Dynamic forces in cranes*, [in:] "Acta Polytechnica", Mech. Engg. Series 3, No 7, 175 (1955).
4. Scheffler M., Dresig H., Kurth F., *Unstetigförderer 2*, VEB Verlag Technik, Berlin 1977.
5. Ramakoteswara Rao K., Parameswaran M.A., *Dynamische Belastung eines Laufkrans durch Schienenstoße*, [w:] „Fördern und Heben”, Nr 5/6, 28, (1978).
6. Grabowski E., Kulig J., *Wyznaczanie obciążeń dźwignic wywołanych jazdą po nierównościach według nowych norm międzynarodowych*, [w:] „Transport Przemysłowy”, nr 1/2007, Wrocław 2007, s. 38-40.
7. Grabowski E., Kulig J., *Metoda obliczania obciążeń dźwignic wywołanych jazdą po nierównościach*, [w:] „Transport Przemysłowy”, nr 1/2008, Wrocław 2008, s. 33-37.
8. Jasiński M., *Zagadnienia obliczeniowego wyznaczania obciążeń dźwignic wywołanych jazdą po nierównościach*, [w:] „Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze”, nr 2 (8)/2010, Wrocław 2010, s. 24-27.
9. Norma PN-EN 13001-2: 2004: *Bezpieczeństwo dźwignic. Ogólne zasady projektowania. Część 2: Obciążenia*.
10. Norma PN-ISO 8686-1: 1999 – *Dźwignice. Zasady obliczania i kojarzenia obciążeń. Postanowienia ogólne*.
11. Jasiński M., Dudziński P., Grabowski E., *Wpływ podatności kół jezdnych na obciążenia dynamiczne ustrojów nośnych dźwignic*, Referat konferencyjny, XXV konferencja – Problemy rozwoju maszyn roboczych, Zakopane 2012.

## INFLUENCE OF GEOMETRICAL FEATURES OF SUPPORTING STRUCTURE OF CRANE ON DYNAMIC LOADS CAUSED BY DRIVING OVER UNEVEN RAILS

### Summary

*The article discusses the influence of geometrical features of the supporting structure of the crane track dynamic loads caused by driving over uneven rails. Experimental studies were performed on two cranes with different geometries of the supporting structure. Based on the results of measurements, the value of the proportionality coefficient for each of the supporting structure of cranes was determined and compared with calculated values based on the dimensions of*

*the supporting structure. The calculated coefficients of proportionality arising from these geometric features were introduced into the model of dynamic loads presented in the current standard cranes. The values of these loads obtained from the calculations did not differ significantly from those identified in experimental studies, which confirmed the validity of the proportionality coefficient dependent on the geometry of the crane support superstructure.*

**Keywords:** *cranes, dynamic load, driving over uneven surfaces*