

ZASTOSOWANIE METODY PRZEMIESZCZEŃ UOGÓLNIONYCH DO ANALIZY DRGAŃ POPRZECZNYCH KONSTRUKCJI MASZTOWYCH

Yevhen KHARCHENKO*, Volodymyr LEVRYNEC**, Stefan SOBKOWSKI*

*Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Polska
10-266 Olsztyn, ul. Okrzei 1A
E-mail: kharchen@poczta.onet.pl, stsob@moskit.uwm.edu.pl

**Użgorodski Uniwersytet Narodowy, Ukraina
88000 Użhorod, ul. Pidhima 46

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki modelowania matematycznego drgań poprzecznych konstrukcji masztowych, które w ogólnym przypadku charakteryzują się zmienną sztywnością, nierównomiernie rozłożoną masą i zawierają włączenia dyskretne w postaci ciężarów o skupionych masach i podpór sprężystych. Do składania równań ruchu stosuje się metodę przemieszczeń uogólnionych.

Słowa kluczowe: konstrukcja masztowa, dynamika, metoda przemieszczeń uogólnionych, diagnostyka.

THE USE OF METHOD OF DISLOCATIONS GENERALIZED TO ANALYSIS OF TRANSVERSE TREMBLINGS OF POLE CONSTRUCTIONS

Summary

The results of mathematical modelling of transverse tremblings of pole constructions in work were introduced. In general case constructions be characterize variable stiffness, variable splitting mass and discreet inclusions contain - weights about collected masses and springy supports. The equation of movement the received with the help of methods of dislocations generalized.

Keywords: the pole construction, dynamics, method of dislocations generalized, the diagnostics.

1. WSTĘP

Konstrukcje nośne o dużej długości są szeroko stosowane w maszynach roboczych, dźwigowych, transportowych oraz w wiertnicach, robotach-manipulatorach, maszynach technologicznych. Od stanu technicznego konstrukcji nośnych w znacznym stopniu zależy skuteczność i bezpieczeństwo eksploatacji maszyn i urządzeń [1, 10]. Podczas rozwiązywania zagadnień diagnostyki technicznej konstrukcji nośnych na stadium projektowania i eksploatacji zachodzi potrzeba modelowania matematycznego procesów dynamicznych w celu podwyższenia dokładności obliczeń wytrzymałościowych i trwałościowych oraz usunięcia zjawisk rezonansowych [4, 8, 9]. W analizie dynamicznej konstrukcji nośnych o dużej długości są szeroko używane modele obliczeniowe w postaci prętów lub układów prętowych.

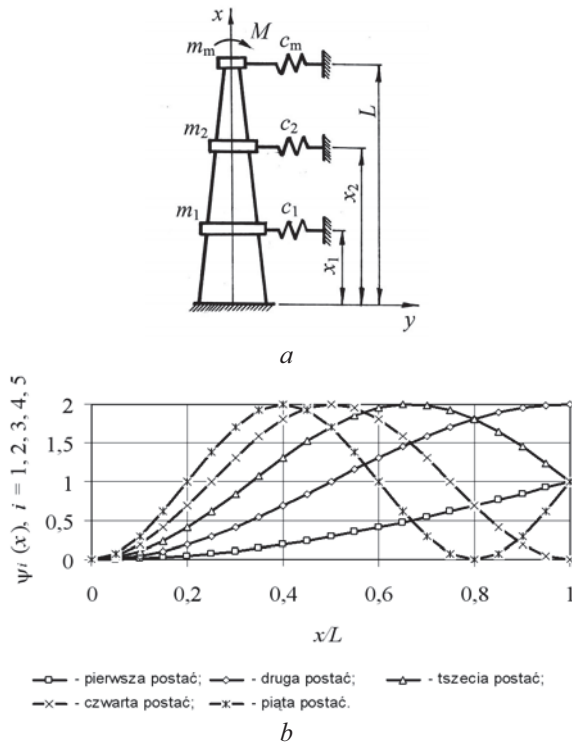
Podczas badań swobodnych i wymuszonych drgań harmonicznym wykonuje się bezpośrednie całkowanie równań w częściowych pochodnych, którymi opisuje się ruch odcinków konstrukcji, w połączeniu z metodą parametrów początkowych [2, 6, 7]. Trudności analizy procesów przejściowych są związane z nieobecnością skutecznych metod analitycznych rozwiązywania niestacjonarnych (liniowych oraz nieliniowych) zagadnień dynamiki

kontynuwno-dyskretnych układów mechanicznych. W związku z tym racjonalnym podejściem do obliczeń procesów niestacjonarnych można uważać dyskretyzację układu mechanicznego za pomocą metody uogólnionych przemieszczeń [12], która może być stosowana do całościowego opisywania ruchu konstrukcji nośnej [5, 12], jak również do opisywania ruchu poszczególnych elementów skończonych [3, 11].

Celem danej pracy jest opracowanie modelu matematycznego drgań poprzecznych konstrukcji masztowych, które w ogólnym przypadku charakteryzują się zmienną sztywnością, nierównomiernie rozłożoną masą i zawierają włączenia dyskretne w postaci ciężarów o skupionych masach i podpór sprężystych. Do składania równań ruchu stosuje się metodę przemieszczeń uogólnionych. Ograniczenie liczby stopni swobody kontynuwno-dyskretnego układu mechanicznego osiąga się poprzez zadawanie postaci drgań elementów o parametrach rozłożonych. Współczynniki funkcji amplitudowych odgrywają rolę uogólnionych współrzędnych. Całkowanie otrzymanych układów równań różniczkowych wykonuje się za pomocą metod numerycznych.

2. MODEL MATEMATYCZNY PROCESÓW DYNAMICZNYCH

Zbudowano model matematyczny drgań wymuszonych masztu, którego schemat przedstawiono na rys. 1 a, gdzie L – wysokość konstrukcji; m_1, m_2, \dots, m_m – skupione masy zamocowanych na maszcie elementów (wskazane elementy rozpatrujemy jako ciała całkowicie sztywne); c_1, c_2, \dots, c_m – współczynniki sztywności mocujących lin w kierunku poziomym; M – obciążenie podane w postaci momentu, który może być dowolną funkcją czasu, $x_1, x_2, \dots, x_{m-1}, L$ – współrzędne środków ciężkości odpowiednich elementów; x, y – kartezjański układ współrzędnych, w którym są rozpatrywane drgania poprzeczne maszyn. Ponieważ masztowe konstrukcje projektuje się przy wielkim zapasie statyczności i mają wielką sztywność w kierunku osiowym, to wpływ osiowych obciążeń na drgania poprzeczne pomija się.



Rys. 1. Schemat obliczeniowy konstrukcji masztowej (a) oraz wykresy pięciu niższych postaci drgań poprzecznych (b)

Dla ograniczenia liczby stopni swobody kontynuacyjno-dyskretnego układu mechanicznego masztu skorzystano z metody przemieszczeń uogólnionych [12].

Funkcję, która opisuje ugięcie masztu, przedstawiono w postaci:

$$y(x, t) = \sum_{j=1}^n Y_j(t) \psi_j(x), \quad (1)$$

gdzie $\psi_j(x)$ – postaci drgań, które należy dobierać w taki sposób, aby zostały spełnione warunki brzegowe na końcach masztu; $Y_j(t)$ – współczynniki amplitudowe.

Postacie drgań poprzecznych masztu (funkcje bazowe) określono wzorem:

$$\psi_j = 1 - \cos \frac{j\pi x}{2L}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Wykresy pierwszych pięciu funkcji (2) przedstawiono na rys. 1 b.

Liczba stopni swobody modelu obliczeniowego stanowi n . Uważając na uogólnione współrzędne Y_j ($j=1, 2, \dots, n$), zastosowano równanie de Lagrange'a drugiego rodzaju do opisywania ruchu układu mechanicznego:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = Q_j \quad (3)$$

$$(j=1, 2, \dots, n),$$

gdzie T i Π – kinetyczna i potencjalna energia; q_j – uogólniona współrzędna; Φ – funkcja Rayleigh'ta; Q_j – niekonserwatywna uogólniona siła.

Energie kinetyczną zapisujemy jako

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \mu(x) \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^m m_r \left[\frac{\partial y(x_r, t)}{\partial t} \right]^2 + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^m J_r \left[\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x \partial t} \right]_{x=x_r}^2, \quad (4)$$

gdzie $\mu(x)$ – masa jednostki długości masztu; J_r ($r=1, 2, \dots, m$) – momenty bezwładności elementów o masach m_r ; t – czas.

Energie potencjalną określa się wzorem

$$\Pi = \frac{1}{2} E \int_0^L I(x) \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right]^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^m c_r y^2(x_r, t), \quad (5)$$

gdzie $I(x)$ – osiowy moment bezwładności przekroju poprzecznego konstrukcji masztowej.

Funkcja Reyleigh'ta, za pomocą której uwzględniamy rozproszenie energii drgań, przedstawiono jako:

$$\Phi = \frac{1}{2} \nu \int_0^L I(x) \left[\frac{\partial^3 y}{\partial x^2 \partial t} \right]^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \nu_r \left[\frac{\partial y(x_r, t)}{\partial t} \right]^2, \quad (6)$$

gdzie ν – współczynnik dyssypacji, uwzględnianej zgodnie z hipotezą Foyght'a; ν_r ($r=1, 2, \dots, m$) – współczynniki dyssypacji dyskretnych podpór sprężystych.

Z uwzględnieniem (1) doprowadzono zależności (4)–(6) do postaci:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \dot{Y}_i \dot{Y}_j + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{rij} \dot{Y}_i \dot{Y}_j + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n J_{rij} \dot{Y}_i \dot{Y}_j ; \quad (7)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} Y_i Y_j + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{rij} Y_i Y_j ; \quad (8)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{ij} \dot{Y}_i \dot{Y}_j + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{rij} \dot{Y}_i \dot{Y}_j , \quad (9)$$

gdzie

$$m_{ij} = \int_0^L \mu(x) \psi_i(x) \psi_j(x) dx ;$$

$$m_{rij} = m_r \psi_i(x_r) \psi_j(x_r) ;$$

$$J_{rij} = J_r \psi_i'(x_r) \psi_j'(x_r) ;$$

$$c_{ij} = E \int_0^L I(x) \psi_i''(x) \psi_j''(x) dx ;$$

$$c_{rij} = c_r \psi_i(x_r) \psi_j(x_r) ;$$

$$v_{ij} = v \int_0^L I(x) \psi_i''(x) \psi_j''(x) dx ;$$

$$v_{rij} = v_r \psi_i(x_r) \psi_j(x_r) .$$

Wyrażenia do określenia m_{ij} , c_{ij} i v_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, n$), zgodnie z przyjętą terminologią [12], nazywają się odpowiednio: bezwładnościowymi, energetycznymi i dysypatywnymi iloczynami funkcji bazowych.

Wykonując różniczkowanie wzorów energii kinetycznej (7) i potencjalnej (8) a także funkcje Rayleigh'a (9) i podstawiając otrzymywane wyniki do równości (3), równania ruchu układu mechanicznego zapisano następująco:

$$\sum_{j=1}^n \left[m_{ij} + \sum_{r=1}^m (m_{rij} + J_{rij}) \right] \ddot{Y}_j + \sum_{j=1}^n \left(v_{ij} + \sum_{r=1}^m v_{rij} \right) \dot{Y}_j + \sum_{j=1}^n \left(c_{ij} + \sum_{r=1}^m c_{rij} \right) Y_j = Q_j \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (10)$$

Dla określenia uogólnionych sił układu zapisano obrotowe przemieszczenia wielokrażka jako:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n Y_i(t) \psi_i'(L) . \quad (11)$$

Wirtualną pracę obciążenia określono wzorem

$$\delta A = M \delta \varphi , \quad (12)$$

gdzie $\delta \varphi$ – wirtualne przemieszczenie, które określono zgodnie ze wzorem (11),

$$\delta \varphi = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi}{\partial Y_i} \delta Y_i = \sum_{i=1}^n \psi_i'(L) \delta Y_i , \quad (13)$$

przy czym δY_i ($i=1, 2, \dots, n$) – wariacje uogólnionych współrzędnych.

Z uwzględnieniem (12), (13) zapisano wirtualną pracę w postaci

$$\delta A = \sum_{i=1}^n M \psi_i'(L) \delta Y_i = \sum_{i=1}^n Q_i \delta Y_i . \quad (14)$$

Jak wynika z zależności (14), uogólnione siły określają się zależnościami

$$Q_i(t) = M(t) \psi_i'(L) . \quad (15)$$

Tak więc niestacjonarne drgania poprzeczne masztu opisują się układem zwykłych równań różniczkowych (10). Całkowania tych równań wykonuje się z uwzględnieniem współzależności (15) przy określonych warunkach początkowych. Jeżeli przed uruchomieniem układ znajdował się w stanie spoczynku to początkowe wartości amplitudowych współczynników są równe zero.

3. WYNIKI OBLICZEŃ DRGAŃ SWOBODNYCH I WYMUSZONYCH

Praktyczne zastosowanie przedstawionego modelu matematycznego wymaga obliczania bezwładnościowych, energetycznych oraz dysypatywnych iloczynów zawartych we współczynnikach równań ruchu (10). Wyrażenia tych iloczynów mają postać oznaczonych całek. Dla uproszczenia i ułatwienia analizy drgań konstrukcji masztowych wymienione całki zostały wyznaczone analitycznie. Wzory do obliczeń bezwładnościowych i energetycznych iloczynów przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Analityczne wzory bezwładnościowych i energetycznych iloczynów funkcji bazowych

Oznaczenia	Wzór analityczny	Oznaczenia	Wzór analityczny
m_{11}	$\frac{3\pi-8}{2\pi} \mu L$	c_{11}	$EI \frac{\pi^4}{32L^3}$
m_{22}	$\frac{3}{2} \mu L$	c_{22}	$EI \frac{\pi^4}{2L^3}$
m_{33}	$\frac{9\pi+8}{6\pi} \mu L$	c_{33}	$EI \frac{81\pi^4}{32L^3}$
$m_{12}=m_{21}$	$\frac{3\pi-4}{3\pi} \mu L$	$c_{12}=c_{21}$	$EI \frac{\pi^3}{6L^3}$
$m_{13}=m_{31}$	$\frac{3\pi-4}{3\pi} \mu L$	$c_{13}=c_{31}$	0
$m_{23}=m_{32}$	$\frac{15\pi+28}{15\pi} \mu L$	$c_{23}=c_{32}$	$EI \frac{81\pi^3}{30L^3}$

Sprężysto-bezwładnościowe charakterystyki dyskretnego modelu obliczeniowego masztu wiertniczego MRUGU-18/20 przedstawiono w tab. 2. Badanie swobodnych oraz nierezonansowych wymuszonych drgań przeprowadzono bez uwzględnienia rozproszenia energii w układzie mechanicznym, w związku z czym parametry dysypacji w tab. 2 nie podano.

Tabela 2. Parametry dyskretnego modelu masztu wiertniczego

Parametr	Jednostka	Wartość
x_1	m	5,900
x_2	m	10,08
x_3	m	13,84
L	m	15,10
$I(x)$	m^4	$1,447 \cdot 10^{-3}$
$\mu(x)$	kg/m	57,21
m_1	kg	47,10
m_2	kg	69,30
m_3	kg	19,60
m_4	kg	42,90
E	MPa	$2,100 \cdot 10^5$
J_1	$kg \cdot m^2$	3,800
J_2	$kg \cdot m^2$	5,200
J_3	$kg \cdot m^2$	2,000
J_4	$kg \cdot m^2$	3,650
c_1	N/m	$2,993 \cdot 10^6$
c_2	N/m	0
c_3	N/m	$3,270 \cdot 10^5$
c_4	N/m	0

W tab. 3 przedstawiono wartości własnych częstotliwości masztu wiertniczego, otrzymane z zastosowaniem dyskretnego modelu obliczeniowego z uwzględnieniem jednej, dwóch lub trzech niższych postaci swobodnych drgań poprzecznych. W zależności od liczby uwzględnionych zgodnie z zależnością (2) postaci procesu drgającego, liczba stopni swobody układu mechanicznego równa się jeden, dwa lub trzy.

Porównując wyniki, przedstawione w tab. 3, z wynikami dokładnych obliczeń, wykonanych zgodnie z metodą [13], można zauważyć, że wartość pierwszej częstotliwości własnej, obliczona z uwzględnieniem jednego stopnia swobody, odróżnia się od odpowiedniej wartości, otrzymanej z zastosowaniem kontynuualno-dyskretnego modelu bez uwzględnienia odkształceń ścinania, o 0,96 %. Dla dyskretnego modelu o dwóch stopniach swobody dana odchyłka stanowi 0,49 %, a dla modelu o trzech stopniach swobody – 0,47 %. Świadczy to o tym, że zależność (2) z wysoką dokładnością odzwierciedla podstawową postać giętych drgań masztu. Odchyłki wartości pierwszej własnej częstotliwości, otrzymanych z zastosowaniem dyskretnych modeli obliczeniowych o jednym, dwóch i trzech stopniach swobody od dokładnie obliczonej własnej

częstotliwości masztu z uwzględnieniem podatności zginania oraz ścinania [13] stanowią odpowiednio 3,11%; 2,63% i 2,61%.

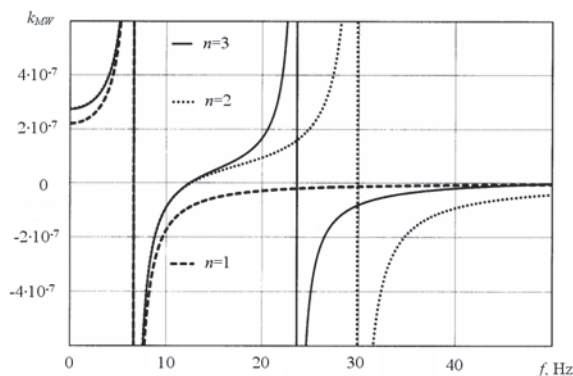
Zestawiając dane tab. 3 z wynikami, otrzymanymi na zasadzie wykorzystania najbardziej dokładnego modelu matematycznego podłużno-poprzecznych drgań konstrukcji [13], można zauważyć, że największe odchyłki określenia niższej częstotliwości własnej masztu, niepoddanego obciążeniu osiowemu, dla modeli o jednym, dwóch i trzech stopniach swobody są równe odpowiednio 7,86%; 7,36% i 7,33%. Świadczy to o możliwości zastosowania modeli obliczeniowych o ograniczonej liczbie stopni swobody do analizy nierezonansowych drgań konstrukcji masztowych. Wyniki obliczeń, przedstawione w tab. 3, są potwierdzeniem wystarczającej dokładności dyskretnych modeli analitycznych i charakteryzują wpływ sztywności elementów masztu oraz lin naciągowych na charakterystyki widma częstotliwościowego. Sztywność masztu na zginanie w większym stopniu wpływa na drugą własną częstotliwość, niż na pierwszą, natomiast sztywność lin naciągowych bardziej wpływa na pierwszą częstotliwość, niż na drugą.

Tabela 3. Przybliżone wartości częstotliwości swobodnych drgań poprzecznych zamocowanego w postawie masztu wiertniczego

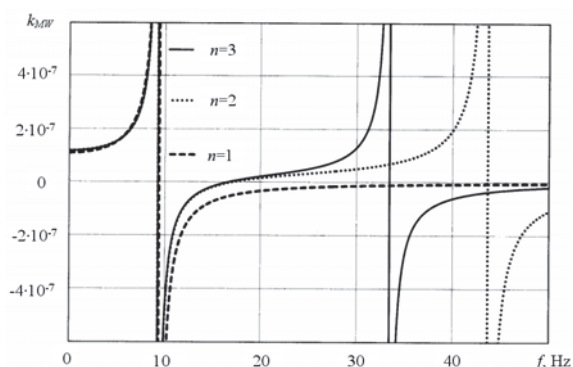
$I(x)$, m^4	$c_1; c_2; c_3; c_4$, N/m	n	Wartości częstotliwości, Hz		
			1	2	3
$1,447 \cdot 10^{-3}$	$c_1=29,93 \cdot 10^5$; $c_3=3,270 \cdot 10^5$; $c_2=c_4=0$	1	7,561	–	–
		2	7,526	43,12	–
		3	7,524	33,01	162,0
$1,447 \cdot 10^{-3}$	$c_1=29,93 \cdot 10^5$; $c_2=c_3=c_4=0$	1	5,849	–	–
		2	5,831	43,13	–
		3	5,830	32,90	162,0
$1,447 \cdot 10^{-3}$	$c_1=19,96 \cdot 10^5$; $c_2=c_3=c_4=0$	1	5,439	–	–
		2	5,387	42,76	–
		3	5,378	32,15	161,8
$6,608 \cdot 10^{-4}$	$c_1=29,93 \cdot 10^5$; $c_3=3,270 \cdot 10^5$; $c_2=c_4=0$	1	6,604	–	–
		2	6,600	29,84	–
		3	6,595	23,55	109,7
$1,447 \cdot 10^{-3}$	$c_1=29,93 \cdot 10^5$; $c_2=0; c_3=c_4=$ $=3,270 \cdot 10^5$	1	9,356	–	–
		2	9,236	43,63	–
		3	9,216	33,41	162,1
$1,447 \cdot 10^{-3}$	$c_1=29,93 \cdot 10^5$; $c_2=c_3=c_4=$ $=3,270 \cdot 10^5$	1	9,756	–	–
		2	9,671	43,75	–
		3	9,660	33,53	162,1

Na rys. 3 i 4 przedstawiono wykresy współczynnika podatności dynamicznej k_{MW} od częstotliwości drgań $f=\omega/2\pi$. Fizyczne traktowanie danego współczynnika polega na tym, że on jest stosunkiem amplitudy przemieszczenia górnego końca masztu w poziomym kierunku do amplitudy momentu, działającego na wielokrążek masztu. Jak widać z graficznych zależności, wartości współ-

czynnika podatności dynamicznej, otrzymane z uwzględnieniem dwóch oraz trzech postaci drgań konstrukcji o dużej wysokości, dla dorezonansowego zakresu częstotliwości i znacznej części międzyrezonansowego zakresu, ograniczonego pierwszą i drugą częstotliwością własną, prawie pokrywają się.



Rys. 3. Zależności współczynnika podatności dynamicznej k_{MW} od częstotliwości drgań f :
 $I=6,608 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$; $c_1=29,93 \cdot 10^5 \text{ N/m}$;
 $c_3=3,270 \cdot 10^5 \text{ N/m}$; $c_2=c_4=0$



Rys. 4. Zależności współczynnika podatności dynamicznej k_{MW} od częstotliwości drgań f :
 $I=1,447 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$; $c_1=29,93 \cdot 10^5 \text{ N/m}$; $c_2=0$;
 $c_3=c_4=3,270 \cdot 10^5 \text{ N/m}$

Zastosowanie opracowanej metodyki zestawienia dyskretnych modeli dynamicznych układów mechanicznych daje możliwość znacznego uproszczenia analizy drgań swobodnych i wymuszonych konstrukcji nośnych o dużej wysokości. Opracowana metodyka zapewne wystarczy dla praktyki inżynierskiej zapewniając wystarczającą dokładność analizy procesów drganiowych i może być wykorzystana podczas projektowania wiertnic, podnośników budowlanych, linii przesyłania energii elektrycznej oraz innych maszyn i urządzeń.

4. PODSUMOWANIE

Przy zastosowaniu metody uogólnionych przemieszczeń opracowano metodykę modelowania matematycznego swobodnych i wymuszonych drgań

konstrukcji masztowych. Określenie za pomocą zaproponowanej metodyki częstotliwości drgań własnych masztu wiertniczego i porównanie otrzymanych wyników z wynikami obliczeń drgań swobodnych danej konstrukcji z wykorzystaniem kontynuualno-dyskretnego modelu pokazuje wystarczającą dokładność budowanych dyskretnych modeli matematycznych. Największe odchyłki wartości pierwszej częstotliwości własnej, otrzymanych z wykorzystaniem dyskretnych modeli o jednym, dwóch oraz trzech stopniach swobody od wartości obliczonych z uwzględnieniem rozłożonego charakteru parametrów bezwładności i sprężystości konstrukcji oraz odkształceń zginania i ścinania, stanowią odpowiednio: 3,11%; 2,63% i 2,61%. Zauważono, że sztywność masztu na zginanie w większym stopniu wpływa na drugą własną częstotliwość, niż na pierwszą, natomiast sztywność lin naciagowych bardziej wpływa na pierwszą częstotliwość, niż na drugą.

Dla przypadków obciążenia harmonicznego otrzymano charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe drgań wymuszonych masztu. Pokazano, że wartości współczynników podatności dynamicznej, określone z uwzględnieniem dwóch oraz trzech postaci drgań konstrukcji o dużej wysokości, dla dorezonansowego zakresu częstotliwości i znacznej części międzyrezonansowego zakresu, ograniczonego pierwszą i drugą częstotliwością własną, prawie pokrywają się. Świadczy to o możliwości zastosowania otrzymywanych na zasadzie metody uogólnionych przemieszczeń dyskretnych modeli matematycznych drgań konstrukcji masztowych w praktyce inżynierskiej.

LITERATURA

- [1] Borkowski W., Konopka S., Prochowski L.: *Dynamika maszyn roboczych*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1996.
- [2] Giergiel J. *Drgania układów mechanicznych*. Kraków, AGH, 1980.
- [3] Kharchenko Y.: *Finite element of rod immovable coordinate system*. Tenth International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering, Proceedings of SPAS jointly with UWM. Olsztyn, Poland, UWM, 2006. Pp. 179–181.
- [4] Kharchenko Y., Dendyuk T.: *Analysis of Vibroacoustics Activity of Electro-Mechanical Drive Systems*. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Dydaktyczna "Teoria maszyn i mechanizmów". Białystok-Białowieża, 1996. S. 133–138.
- [5] Kharchenko Y., Sobkowski S.: *Mathematical Modeling of Movements of Intelligent Transport Devices of the Automated Warehouses*. 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. Vol. 1. Saint-Etienne, France, ENSM SE, 2006. Pp. 223–228.

- [6] Kharchenko Y., Sobkowski S.: *Zastosowanie analizy modalnej w diagnostyce stanu technicznego konstrukcji masztowych dźwigów budowlanych*. Diagnostyka, vol 27, 2002, pp. 75-81.
- [7] Osiński Z.: *Teoria drgań*. Warszawa, PWN, 1978.
- [8] Uhl T.: *Zastosowanie analizy modalnej w diagnostyce maszyn*. Diagnostyka, vol 23, 2000. Pp. 87-92.
- [9] Morel J.: *Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego*. Warszawa, Polskie Towarzystwo diagnostyki technicznej, 1992.
- [10] Бурдаков С. Ф., Дьяченко В. А., Тимофеев А. Н.: *Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов*. Москва, Машино-строение, 1986.
- [11] Зенкевич О., Морган К.: *Конечные элементы и аппроксимация*. Москва, Мир, 1986.
- [12] Клаф Р., Пензиен Дж.: *Динамика сооружений*. Москва, Стройиздат, 1979.
- [13] Харченко С. В., Левринец В. М.: *Математична модель кінематично зв'язаних поздовжньо-поперечних коливань бурової щогли з пакетом свічок бурильних труб*. Вісник Національного університету "Львівська політехніка" №434. Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. Львів, Видавництво НУЛП, 2001. С. 110–117.



Prof. dr hab. inż. **Yevhen KHARCHENKO** – prof. nadzwyczajny Katedry Materiałów Funkcjonalnych i Nanotechnologii Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. W pracy naukowej zajmuje się problemami dynamiki i wytrzymałości maszyn. Prowadzi badania z zakresu teorii drgań nieliniowych układów mechanicznych dyskretno-ciągłych. Jest autorem i współautorem ponad 200 prac naukowych, w tym 2 monografii. Publikacje poświęcone problemom analizy procesów niestacjonarnych w układach napędowych i konstrukcjach nośnych oraz problemom diagnostyki maszyn i urządzeń.



Doc. dr inż. **Volodymyr LEVRYNEC** – docent Użgorodzkiego Uniwersytetu Narodowego, Ukraina. Prowadzi badania dotyczące problemów dynamiki i wytrzymałości wież wiertniczych oraz układów napędowych wiertnic. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami analizy procesów przejściowych w układach maszynowych oraz praktycznym zastosowaniem metod numerycznych w celach diagnostycznych. Jest autorem 15 artykułów naukowych.



Mgr **Stefan SOBKOWSKI** – st. wykładowca w Zakładzie Edukacji Techniczno-Informatycznej Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie. Prowadzi badania dotyczące problemów dynamiki i diagnostyki podnośników oraz maszyn roboczych. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami teorii drgań konstrukcji masztowych oraz praktycznym zastosowaniem analizy dynamicznej w celach diagnostycznych. Jest autorem kilku artykułów naukowych.