



XVII Warsztaty Projektowania
Mechatronicznego
Kraków, w dniach 01 i 02 czerwca 2017

OPRACOWANIE KONCEPCJI ORAZ PROGRAMÓW PILOTOWYCH MODYFIKACJI MAPY OPTYMALNYCH PRĘDKOŚCI OBROTOWYCH WRZECIONA

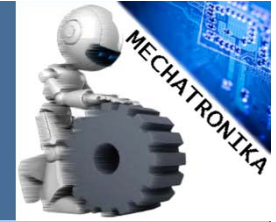
Krzysztof J. KALIŃSKI, Michał MAZUR, Jan Kapliński,



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**
WYDZIAŁ MECHANICZNY



BR
Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju



Celem jest minimalizacja poziomów drgań narzędzie-przedmiot obrabiany uwzględniając:

- **własności dynamiczne urządzenia**
- **własności procesu skrawania**
- **zmiany związane z konfiguracją układu**
- **zmiany w czasie położenia przedmiotu oraz narzędzia**

Ocena **symulowanych** drgań przedmiotu obrabianego na podstawie:

- wartości RMS przemieszczeń (przyspieszeń) w dziedzinie czasu
- wartości dominujących „szczytów” w widmie amplitudowym
- spełnienia warunku optymalności



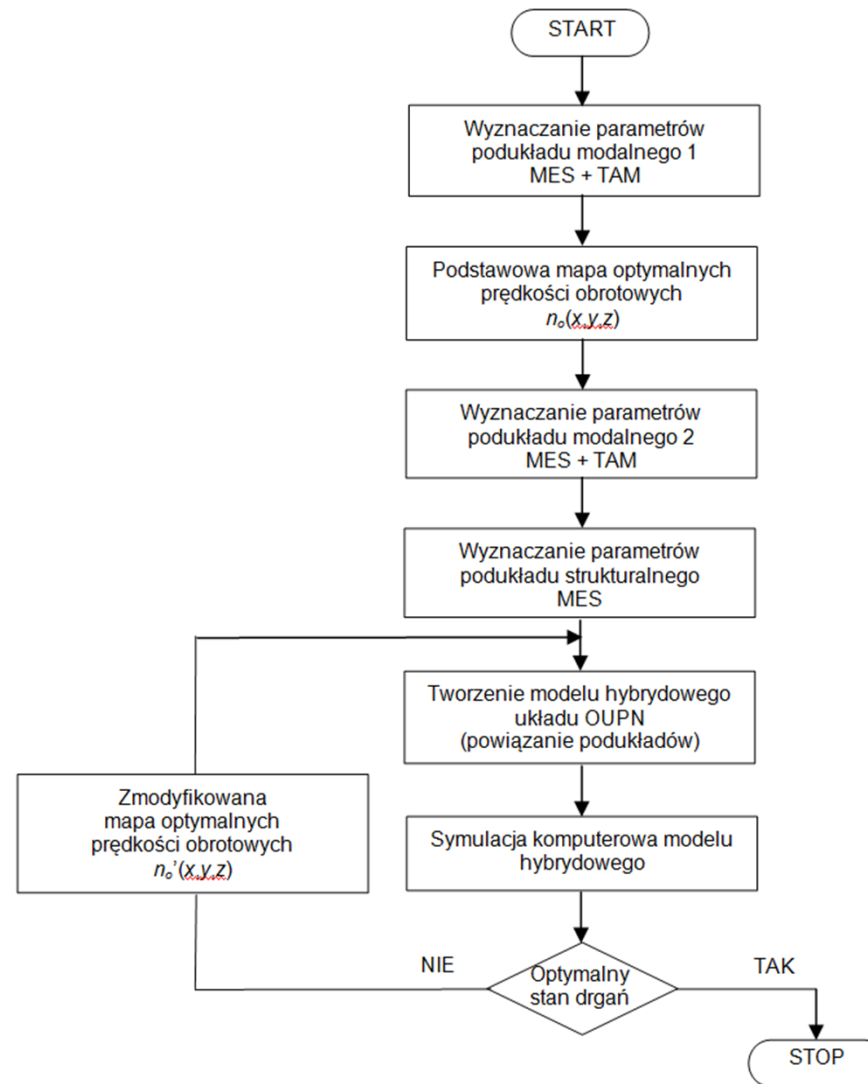
**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Obrabiarka
wielkogabarytowa –
MIKROMAT 20V



XVII Warsztaty Projektowania Mechatronicznego, Kraków 01-02 czerwca 2017 r.

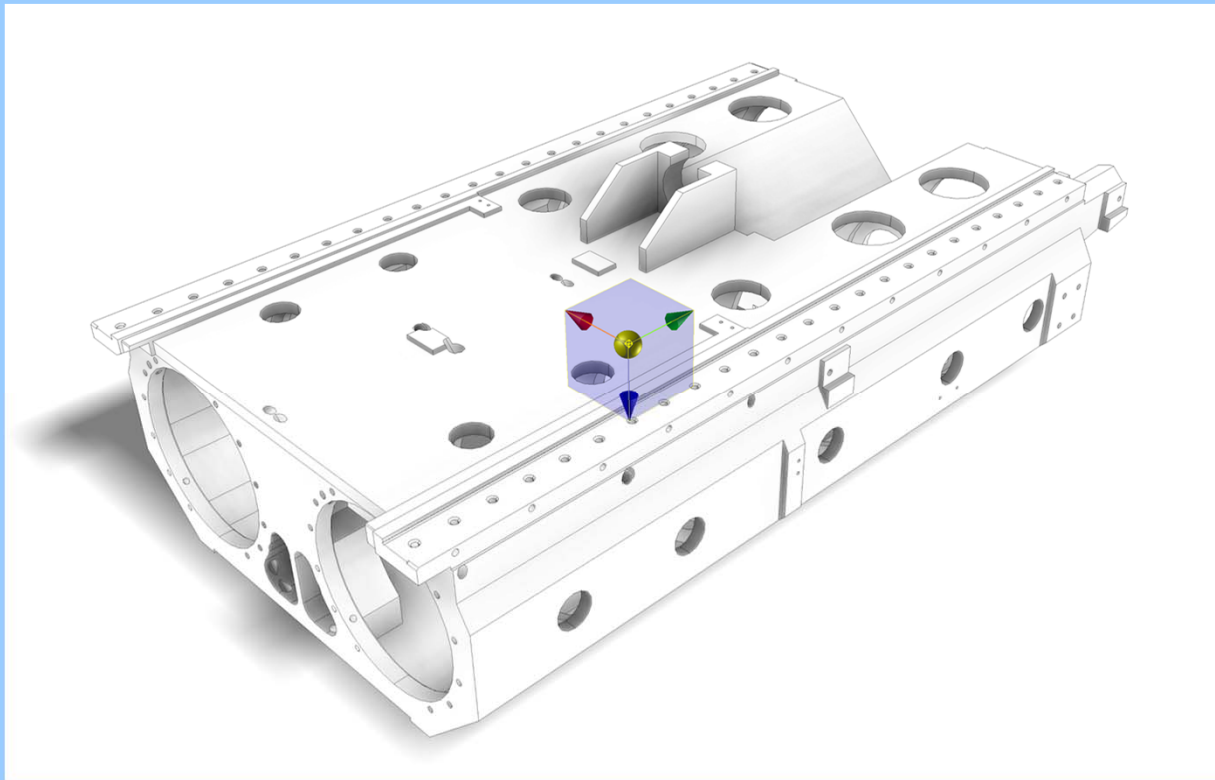




**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Przedmiot obrabiany



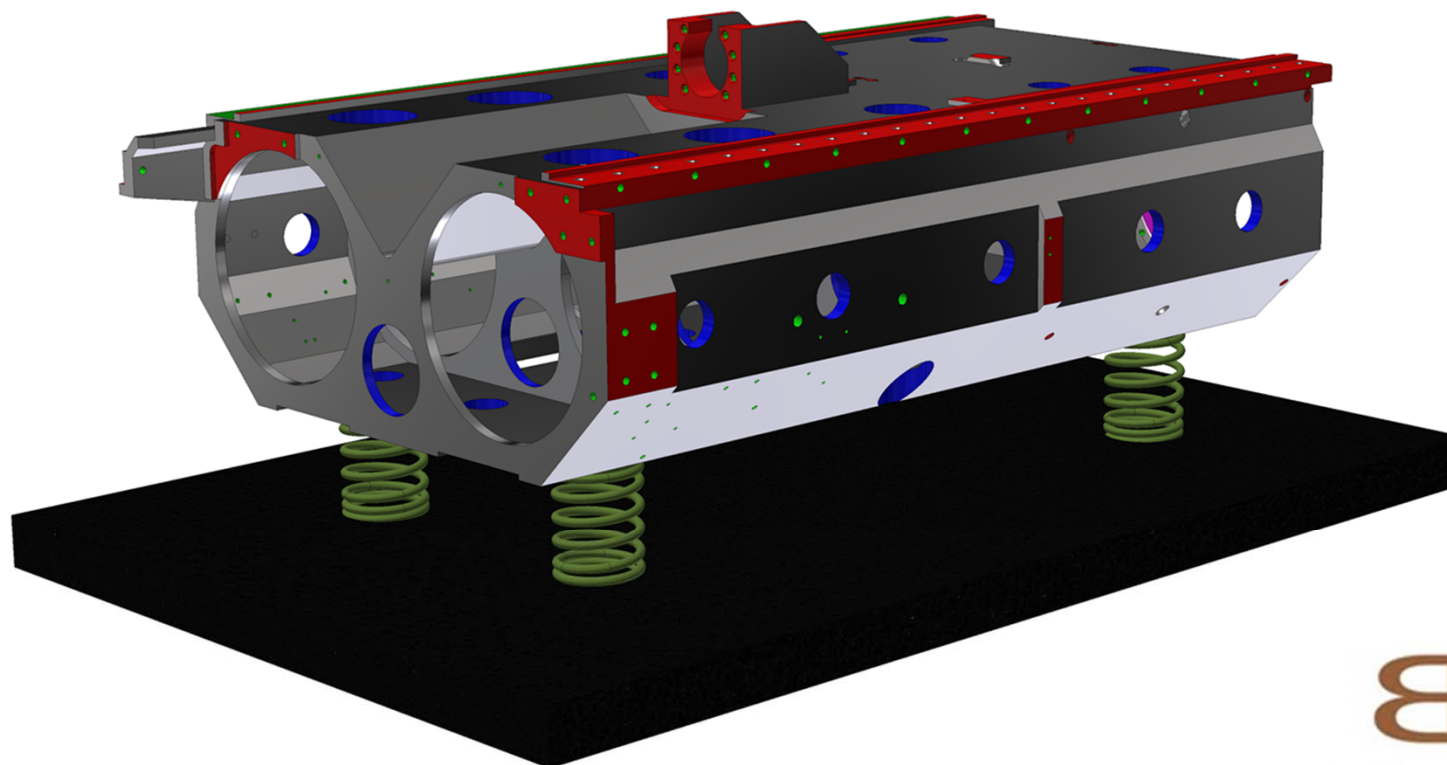
XVII Warsztaty Projektowania Mechatronicznego, Kraków 01-02 czerwca 2017 r.



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Zastosowanie
elementów sprężystych
mocyjących




Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju

XVII Warsztaty Projektowania Mechatronicznego, Kraków 01-02 czerwca 2017 r.



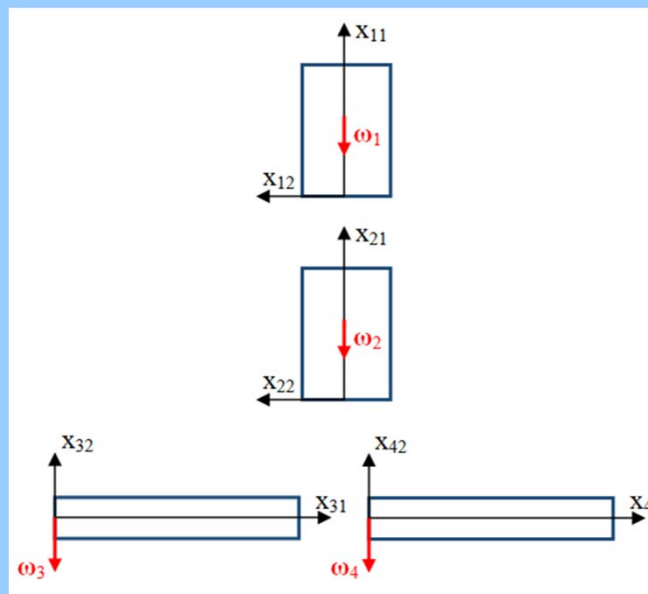
Jak bardzo prędkość obrotowa
narzędzia wpływa na jego
częstotliwość drgań własnych ?



Wytaczadło 130 z zaznaczonymi wymiarami



4 odkształcalne elementy skończone (OES) typu pręt Eulera-Bernoulliego



Model wytaczadła z wykorzystaniem OES, z zaznaczonymi lokalnymi układami współrzędnych

Nr OES	Długość l_e [mm]	Promień r_e [mm]
1	320	50
2	70	31,5
3	100	50
4	100	50



- 1 - obliczenia w środowisku Maxima
- 2 - obliczenia w środowisku Octave

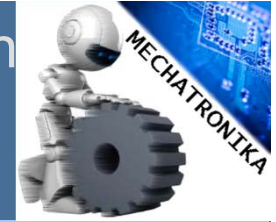
Za pomocą programu **Octave** wyznaczono cztery pierwsze postacie drgań swobodnych wytaczadła, wyznaczając wartości własne macierzy:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1}(\hat{\mathbf{L}} - \hat{\mathbf{L}}^T) & -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{K} - \hat{\mathbf{K}}) \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

- M** - globalna macierz bezwładności,
- K** - globalna macierz sztywności,
- $\hat{\mathbf{L}}$ - globalna macierz efektów żyroskopowych,
- $\hat{\mathbf{K}}$ - globalna macierz zależna od kwadratu prędkości kątowej.

Macierz funkcji kształtu dla translacyjnych stopni swobody:

$$\mathbf{N}_{e3}^T = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x_{e1}}{l_e} & 0 & 0 \\ -\frac{6x_{e1}\left(\frac{x_{e1}}{l_e} - 1\right)x_{e2}}{l_e^2} & \frac{2x_{e1}^3}{l_e^3} - \frac{3x_{e1}^2}{l_e^2} + 1 & 0 \\ \frac{6x_{e1}\left(1 - \frac{x_{e1}}{l_e}\right)x_{e3}}{l_e^2} & 0 & \frac{2x_{e1}^3}{l_e^3} - \frac{3x_{e1}^2}{l_e^2} + 1 \\ 0 & -\left(1 - \frac{x_{e1}}{l_e}\right)x_{e3} & \left(1 - \frac{x_{e1}}{l_e}\right)x_{e2} \\ \left(\frac{3x_{e1}^2}{l_e^2} - \frac{4x_{e1}}{l_e} + 1\right)x_{e3} & 0 & x_{e1}\left(-\frac{x_{e1}^2}{l_e^2} + \frac{2x_{e1}}{l_e} - 1\right) \\ -\left(\frac{3x_{e1}^2}{l_e^2} - \frac{4x_{e1}}{l_e} + 1\right)x_{e2} & -x_{e1}\left(-\frac{x_{e1}^2}{l_e^2} + \frac{2x_{e1}}{l_e} - 1\right) & 0 \\ \frac{x_{e1}}{l_e} & 0 & 0 \\ -\frac{6x_{e1}\left(1 - \frac{x_{e1}}{l_e}\right)x_{e2}}{l_e^2} & \frac{3x_{e1}^2}{l_e^2} - \frac{2x_{e1}^3}{l_e^3} & 0 \\ \frac{6x_{e1}\left(\frac{x_{e1}}{l_e} - 1\right)x_{e3}}{l_e^2} & 0 & \frac{3x_{e1}^2}{l_e^2} - \frac{2x_{e1}^3}{l_e^3} \\ 0 & -\frac{x_{e1}x_{e3}}{l_e} & \frac{x_{e1}x_{e2}}{l_e} \\ \left(\frac{3x_{e1}^2}{l_e^2} - \frac{2x_{e1}}{l_e}\right)x_{e3} & 0 & -\frac{x_{e1}^2\left(\frac{x_{e1}}{l_e} - 1\right)}{l_e} \\ -\left(\frac{3x_{e1}^2}{l_e^2} - \frac{2x_{e1}}{l_e}\right)x_{e2} & \frac{x_{e1}^2\left(\frac{x_{e1}}{l_e} - 1\right)}{l_e} & 0 \end{bmatrix}.$$



Macierz bezwładności:

$$\mathbf{M}_e = \int_V \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dV \xrightarrow{\substack{\{x_{e2}=r\cos(\varphi)\} \\ \{x_{e3}=r\sin(\varphi)\}}} \int_0^{l_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_e} r \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dr d\varphi dx_{e1} =$$

$$= \rho_e l_e \cdot$$

$\frac{\pi r_e^2}{3}$	0	0	0	0	0	$\frac{\pi r_e^2}{6}$	0	0	0	0	0
0	$\frac{21\pi r_e^4 + 26\pi l_e^2 r_e^2}{70 l_e^2}$	0	0	0	$\frac{21\pi r_e^4 + 44\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	$-\frac{42\pi r_e^4 - 18\pi l_e^2 r_e^2}{140 l_e^2}$	0	0	0	$\frac{21\pi r_e^4 - 26\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$
0	0	$\frac{21\pi r_e^4 + 26\pi l_e^2 r_e^2}{70 l_e^2}$	0	$-\frac{21\pi r_e^4 + 44\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	0	0	$-\frac{42\pi r_e^4 - 18\pi l_e^2 r_e^2}{140 l_e^2}$	0	$-\frac{21\pi r_e^4 - 26\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0
0	0	0	$\frac{\pi r_e^4}{6}$	0	0	0	0	0	$\frac{\pi r_e^4}{12}$	0	0
0	0	$-\frac{21\pi r_e^4 + 44\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	$\frac{7\pi l_e r_e^4 + 2\pi l_e^3 r_e^2}{210 l_e}$	0	0	0	$\frac{21\pi r_e^4 - 26\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	$-\frac{7\pi l_e r_e^4 + 6\pi l_e^3 r_e^2}{840 l_e}$	0
0	$\frac{21\pi r_e^4 + 44\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	0	0	$\frac{7\pi l_e r_e^4 + 2\pi l_e^3 r_e^2}{210 l_e}$	0	$-\frac{21\pi r_e^4 - 26\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	0	0	$-\frac{7\pi l_e r_e^4 + 6\pi l_e^3 r_e^2}{840 l_e}$
$\frac{\pi r_e^2}{6}$	0	0	0	0	0	$\frac{\pi r_e^2}{3}$	0	0	0	0	0
0	$-\frac{42\pi r_e^4 - 18\pi l_e^2 r_e^2}{140 l_e^2}$	0	0	0	$-\frac{21\pi r_e^4 - 26\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	$\frac{21\pi r_e^4 + 26\pi l_e^2 r_e^2}{70 l_e^2}$	0	0	0	$\frac{21\pi r_e^4 + 44\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$
0	0	$-\frac{42\pi r_e^4 - 18\pi l_e^2 r_e^2}{140 l_e^2}$	0	$\frac{21\pi r_e^4 - 26\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	0	0	$\frac{21\pi r_e^4 + 26\pi l_e^2 r_e^2}{70 l_e^2}$	0	$\frac{21\pi r_e^4 + 44\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0
0	0	0	$\frac{\pi r_e^4}{12}$	0	0	0	0	0	$\frac{\pi r_e^4}{6}$	0	0
0	0	$-\frac{21\pi r_e^4 - 26\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	$-\frac{7\pi l_e r_e^4 + 6\pi l_e^3 r_e^2}{840 l_e}$	0	0	0	$\frac{21\pi r_e^4 + 44\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	$\frac{7\pi l_e r_e^4 + 2\pi l_e^3 r_e^2}{210 l_e}$	0
0	$\frac{21\pi r_e^4 - 26\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	0	0	$-\frac{7\pi l_e r_e^4 + 6\pi l_e^3 r_e^2}{840 l_e}$	0	$-\frac{21\pi r_e^4 + 44\pi l_e^2 r_e^2}{840 l_e}$	0	0	0	$\frac{7\pi l_e r_e^4 + 2\pi l_e^3 r_e^2}{210 l_e}$



Macierz sztywności:

$$\mathbf{K}_e = \frac{E}{l_e} \cdot \begin{bmatrix}
 \pi r_e^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\pi r_e^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{3\pi r_e^4}{l_e^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{l_e^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{3\pi r_e^4}{2l_e} \\
 0 & 0 & \frac{3\pi r_e^4}{l_e^2} & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & 0 & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{l_e^2} & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{\pi r_e^4}{4(\nu + 1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\pi r_e^4}{4(\nu + 1)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & \pi r_e^4 & 0 & 0 & 0 & \frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & \frac{\pi r_e^4}{2} & 0 \\
 0 & \frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & 0 & 0 & \pi r_e^4 & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & 0 & 0 & \frac{\pi r_e^4}{2} \\
 -\pi r_e^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi r_e^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{l_e^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & \frac{3\pi r_e^4}{l_e^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{2l_e} \\
 0 & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{l_e^2} & 0 & \frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & 0 & 0 & \frac{3\pi r_e^4}{l_e^2} & 0 & \frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -\frac{\pi r_e^4}{4(\nu + 1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\pi r_e^4}{4(\nu + 1)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & \frac{\pi r_e^4}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & \pi r_e^4 & 0 \\
 0 & \frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & 0 & 0 & \frac{\pi r_e^4}{2} & 0 & -\frac{3\pi r_e^4}{2l_e} & 0 & 0 & 0 & \pi r_e^4
 \end{bmatrix}$$



M – globalna macierz bezwładności,
 K – globalna macierz sztywności,
 $\hat{\mathbf{L}}$ – globalna macierz efektów żyroskopowych,
 $\hat{\mathbf{K}}$ – globalna macierz zależna od kwadratu prędkości kątowej.

Macierz prędkości kątowych:

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{e3} & \omega_{e2} \\ \omega_{e3} & 0 & -\omega_{e1} \\ -\omega_{e2} & \omega_{e1} & 0 \end{bmatrix},$$

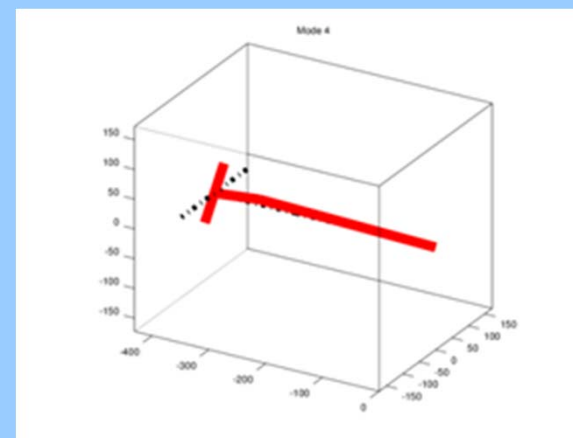
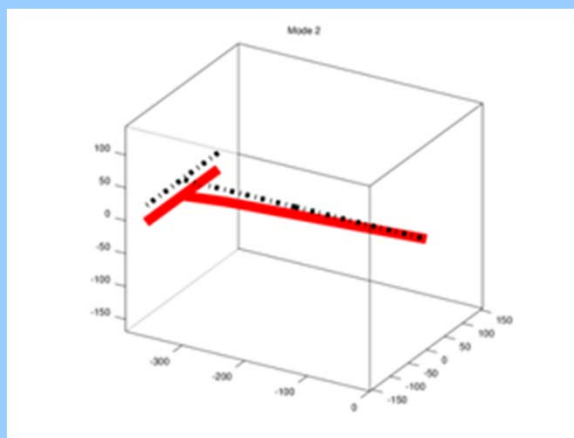
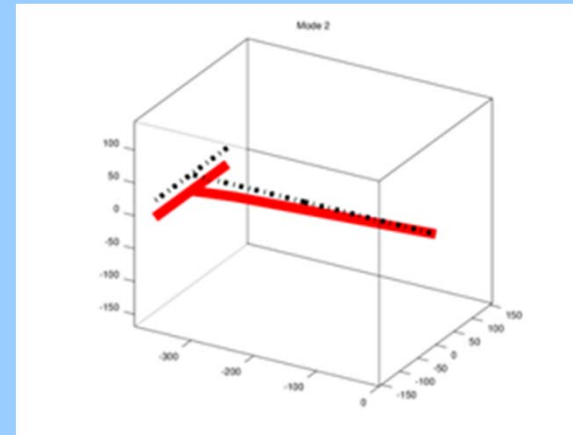
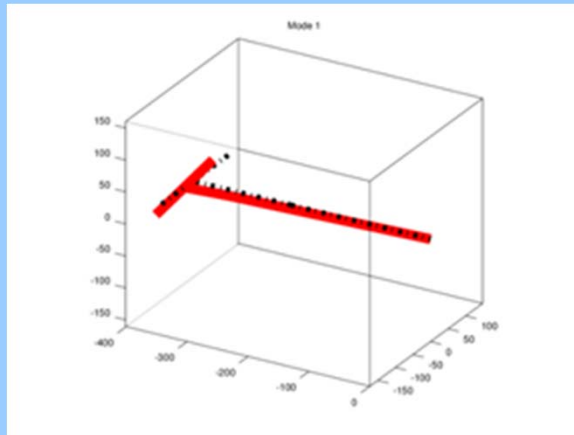
$$\hat{\mathbf{L}}_e = \int_V \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{\Omega} \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dV$$

$$\xrightarrow{\left. \begin{matrix} x_{e2} = r \cos(\varphi) \\ x_{e3} = r \sin(\varphi) \end{matrix} \right\}} \int_0^{l_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_e} r \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{\Omega} \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dr d\varphi dx_{e1},$$

$$\hat{\mathbf{K}}_e = \int_V \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{\Omega}^T \mathbf{\Omega} \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dV$$

$$\xrightarrow{\left. \begin{matrix} x_{e2} = r \cos(\varphi) \\ x_{e3} = r \sin(\varphi) \end{matrix} \right\}} \int_0^{l_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_e} r \rho_e \mathbf{N}_e^T(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) \mathbf{\Omega}^T \mathbf{\Omega} \mathbf{N}_e(x_{e1}, x_{e2}, x_{e2}) dr d\varphi dx_{e1}.$$







Postać	<i>n[obr/min]</i>					
	0	10	100	1000	2000	5000
1	277.86	277.85	277.85	264.15	248.09	199.46
2	283.13	283.13	283.13	296.80	312.74	360.60
3	721.81	721.81	721.81	721.62	721.04	716.95
4	1083.10	1083.10	1083.10	1083.00	1082.60	1080.20
5	1611.70	1611.70	1611.70	1611.80	1611.90	1612.90
6	2221.30	2221.30	2221.30	2221.30	2221.30	2221.30
7	3279.40	3279.40	3279.40	3279.00	3278.10	3271.60
8	3637.40	3637.40	3637.40	3637.40	3637.30	3636.50
9	3719.20	3719.20	3719.20	3719.60	3720.60	3727.90
10	6871.40	6871.40	6871.40	6871.40	6871.40	6871.10
11	8260.70	8260.70	8260.70	8260.60	8260.50	8260.00
12	8922.30	8922.30	8922.30	8922.30	8922.20	8921.70
13	10433.00	10433.00	10433.00	10433.00	10433.00	10434.00
14	12083.00	12083.00	12083.00	12082.00	12082.00	12078.00
15	12667.00	12667.00	12667.00	12667.00	12668.00	12672.00
16	14387.00	14387.00	14387.00	14387.00	14387.00	14387.00
17	19539.00	19539.00	19539.00	19539.00	19539.00	19538.00
18	21379.00	21379.00	21379.00	21379.00	21379.00	21379.00
19	22450.00	22450.00	22450.00	22450.00	22450.00	22450.00
20	27367.00	27367.00	27367.00	27367.00	27367.00	27367.00
21	39221.00	39221.00	39221.00	39221.00	39221.00	39221.00
22	39402.00	39402.00	39402.00	39402.00	39402.00	39402.00
23	53604.00	53604.00	53604.00	53604.00	53604.00	53603.00



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

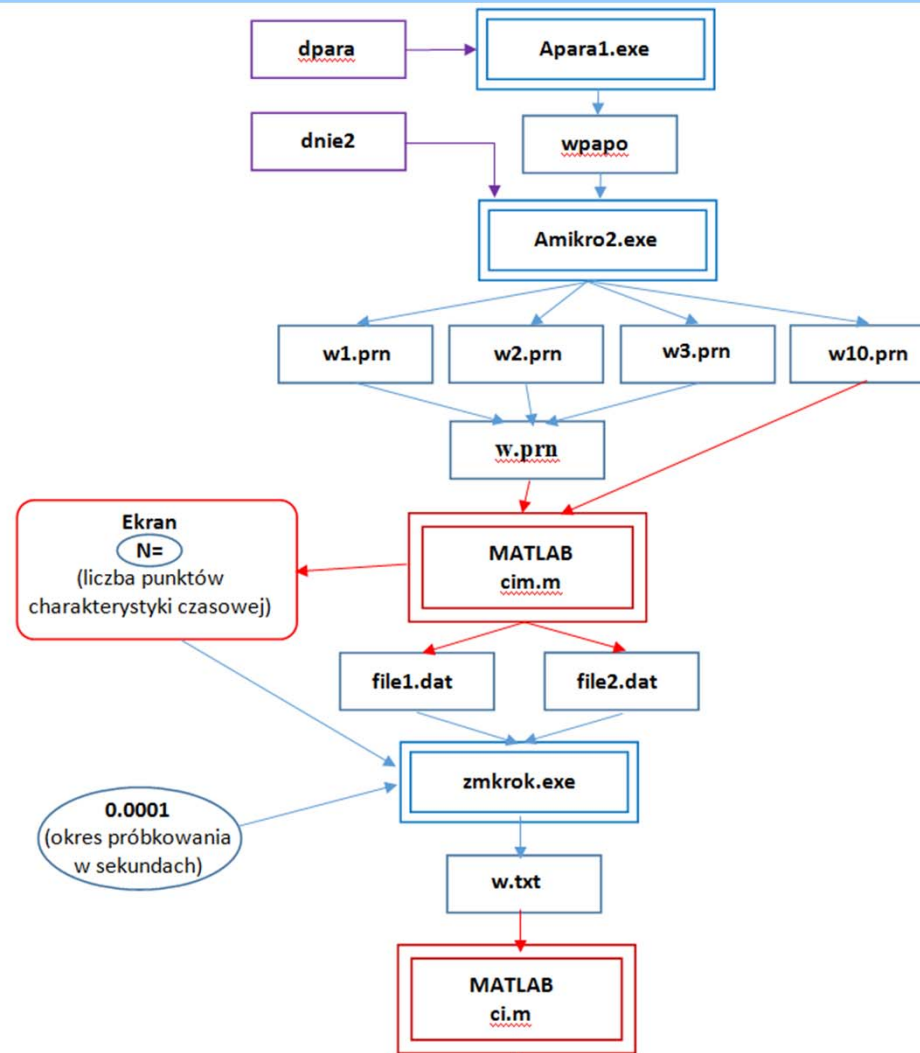
WYDZIAŁ MECHANICZNY

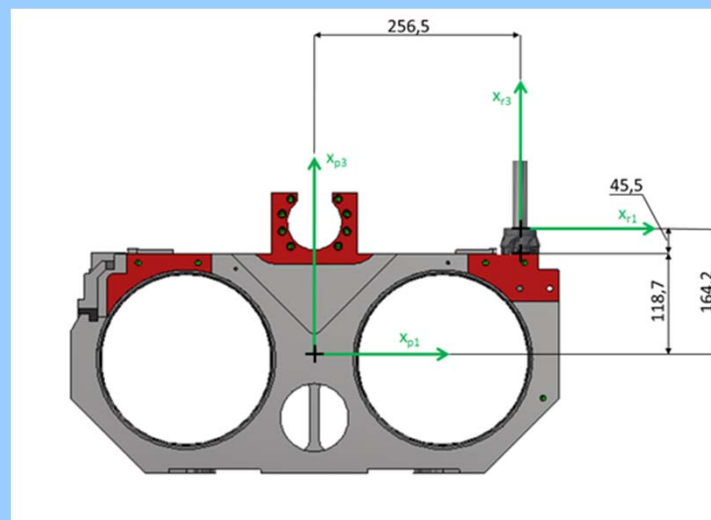
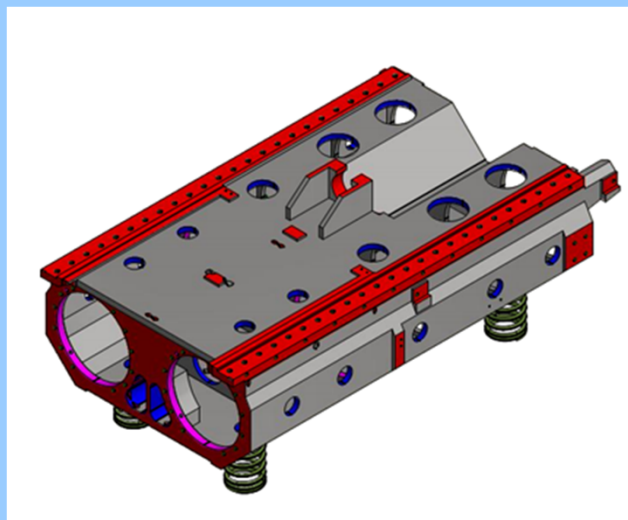
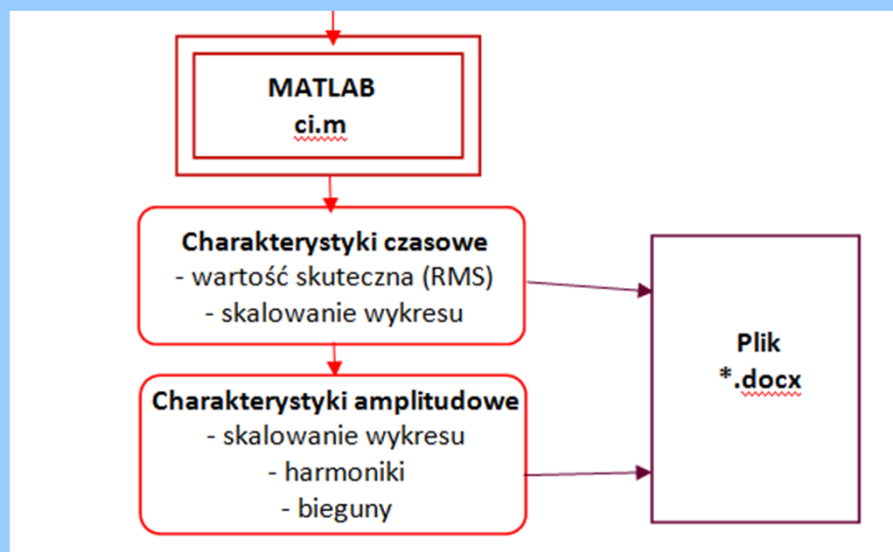


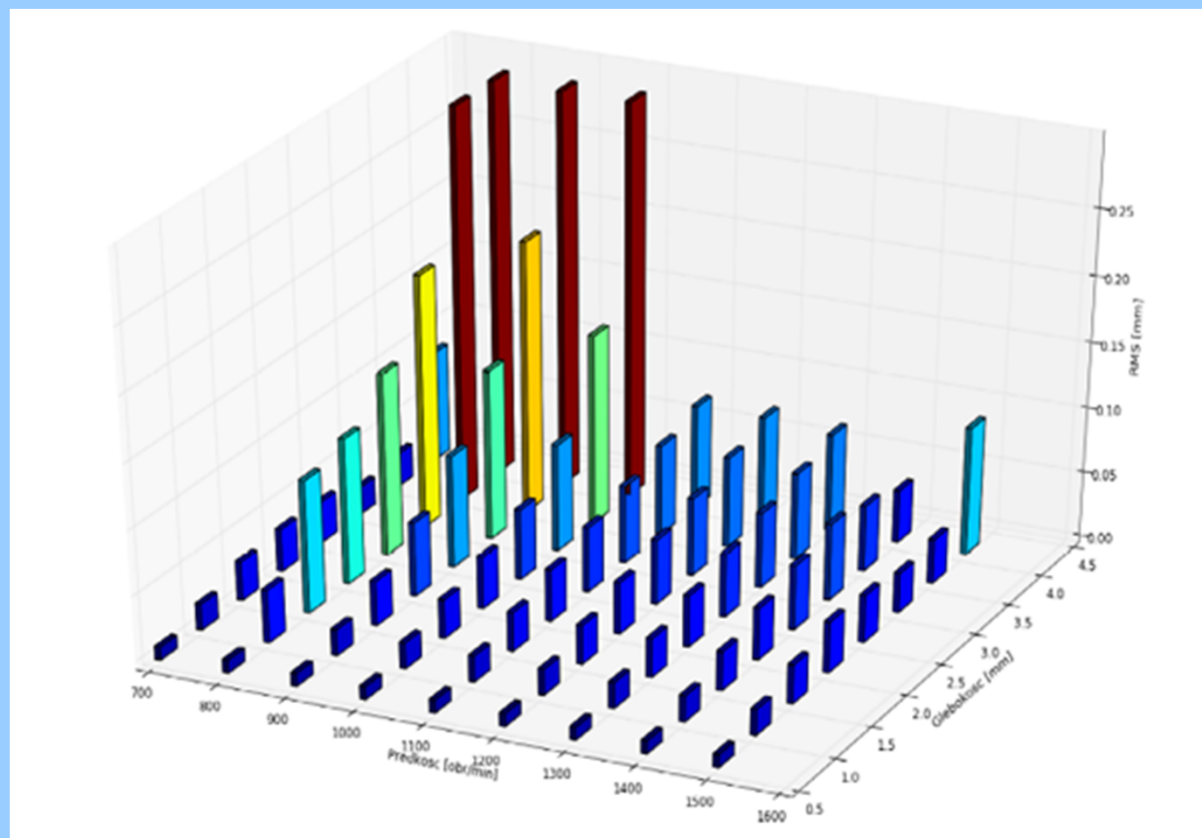
Pilotowy program symulacji komputerowej nadzorowania procesu frezowania czołowego



XVII Warsztaty Projektowania Mechatronicznego, Kraków 01-02 czerwca 2017 r.







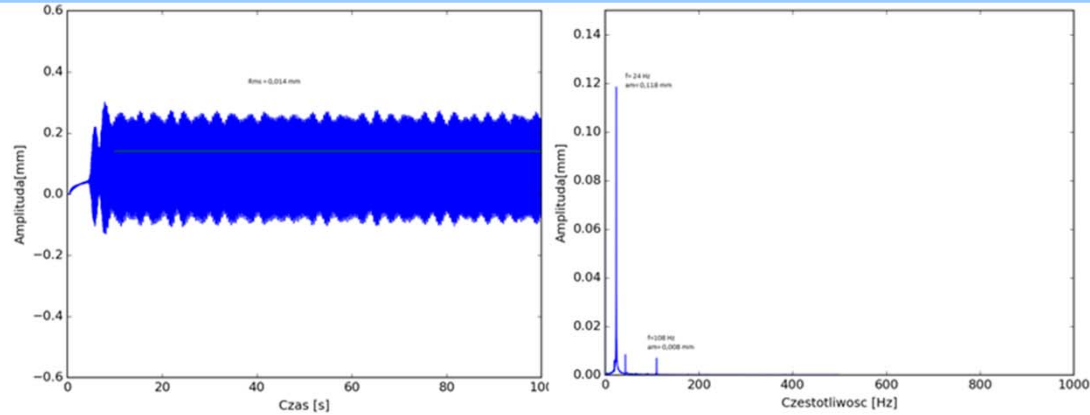
Wartości RMS przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi x3 w zależności od prędkości obrotowej narzędzia i głębokości skrawania



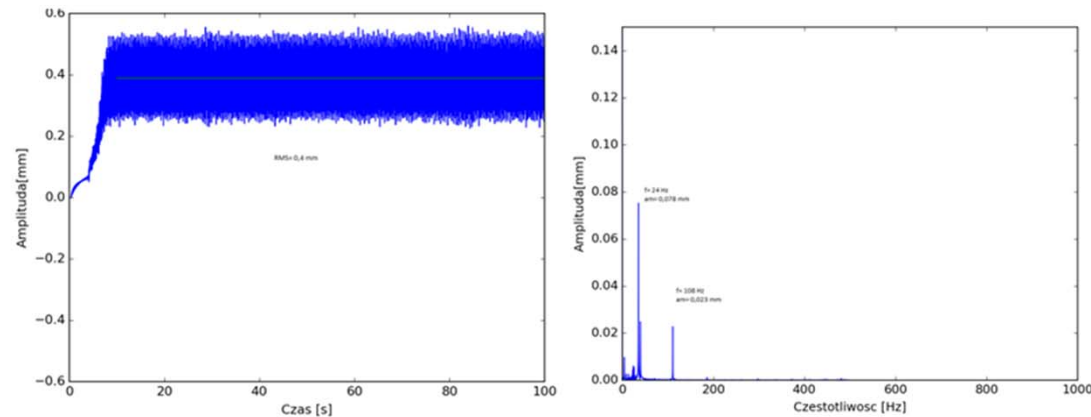


	Głębokość skrawania a_p [mm]								
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Prędkość obrotowa narzędzia n_0 [obr/min]	700	0.010	0.020	0.030	0.033	0.032	0.021	0.026	0.084
	800	0.010	0.041	0.102	0.112	0.140	0.194	0.304	0.600
	900	0.010	0.020	0.034	0.057	0.086	0.131	0.208	0.389
	1000	0.010	0.020	0.030	0.040	0.054	0.082	0.145	0.435
	1100	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.069	0.079
	1200	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.069	0.079
	1300	0.010	0.020	0.030	0.040	0.049	0.058	0.066	0.075
	1400	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.059	0.051	0.041
	1500	0.010	0.020	0.030	0.039	0.036	0.031	0.034	0.098



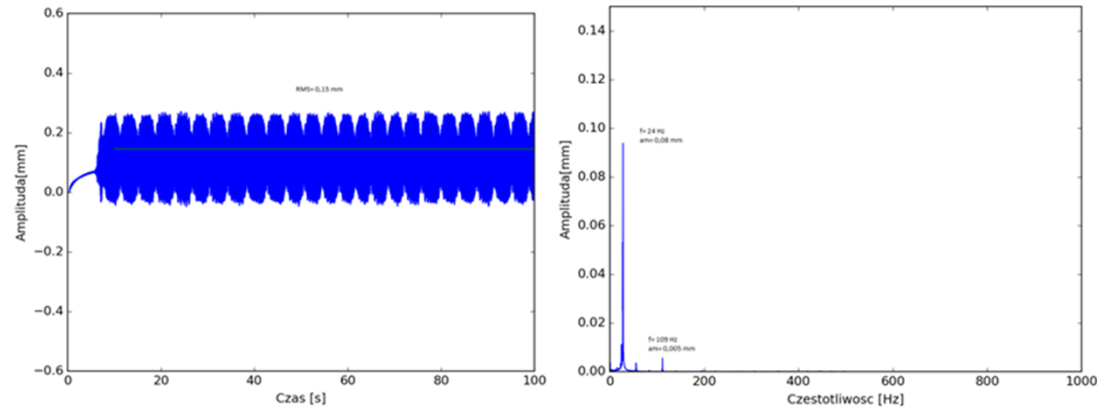
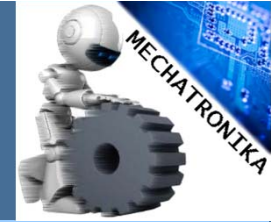


Rys. 30. Przebiegi czasowe oraz widma amplitudowe przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi x_3 , $n_0=800$ obr/min, $a_p=2.5$ mm, $k_1=1000$ N/mm, $k_2=20000$ N/mm, $k_3=20000$ N/mm

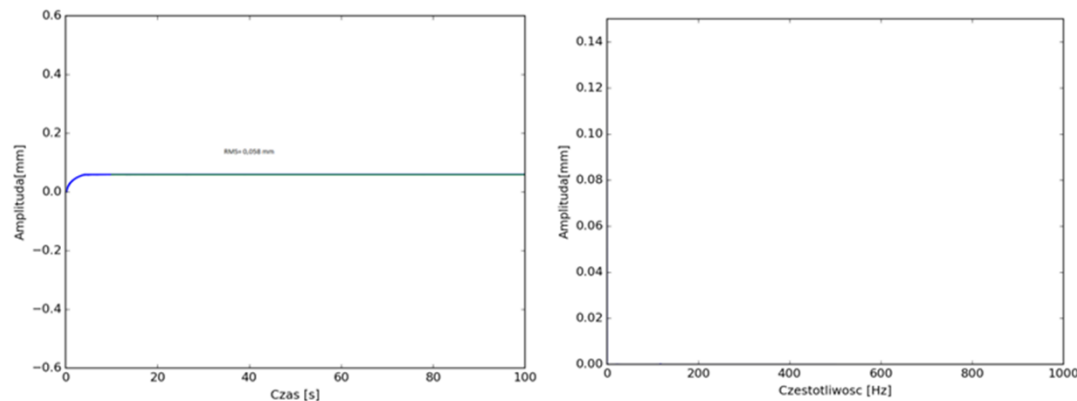


Przebiegi czasowe oraz widma amplitudowe przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi x_3 , $n_0=900$ obr/min, $a_p=4$ mm, $k_1=1000$ N/mm, $k_2=20000$ N/mm, $k_3=20000$ N/mm





Rys. 33. Przebiegi czasowe oraz widma amplitudowe przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi x_3 , $n_0=1000$ obr/min, $a_p=3.5$ mm, $k_1=1000$ N/mm, $k_2=20000$ N/mm, $k_3=20000$ N/mm



Przebiegi czasowe oraz widma amplitudowe przemieszczeń przedmiotu obrabianego w kierunku osi x_3 , $n_0=1400$ obr/min, $a_p=3$ mm, $k_1=1000$ N/mm, $k_2=20000$ N/mm, $k_3=20000$ N/mm





**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY



Dziękuję za uwagę

Projekt jest współfinansowany z NCBIR

