



XVII Warsztaty Projektowania
Mechatronicznego
Kraków, 01 – 02 czerwca 2017

***OPTIMALIZACJA SZTYWNOŚCI ZAMOCOWANIA
PODCZAS FREZOWANIA PRZEDMIOTÓW
WIELKOGABARYTOWYCH Z WYKORZYSTANIEM
WIRTUALNEGO PROTOTYPOWANIA
WSPOMAGANEGO EKSPERYMENTEM***

*Krzysztof J. KALIŃSKI, Marek GALEWSKI,
Michał MAZUR, Natalia MORAWSKA*



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**
WYDZIAŁ MECHANICZNY



BR
Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju



Obrabiarki w EPG w Gdyni



5-osiowe karuzelowe centrum tokarsko
frezarskie FKD 80/60 Y CNC

5-osiowe płytowe centrum frezarsko-
wytaczarskie FLF 16 CNC



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Przykłady systemów obróbki wielkogabarytowej



GAFAKO Gdynia



Centrum frezarsko wytaczarskie

IN-BUL Sierakowice



Centrum frezarsko wytaczarskie SKODA



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Przykłady systemów obróbki wielkogabarytowej



Centrum Obróbki Elementów Wielkogabarytowych (**COEW**), P.H.S. HYDROTOR S.A.:



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



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Aktualne badania



Realizacja PROJEKTU TANGO1/266350/NCBR/2015

***„Zastosowanie wybranych rozwiązań mechatronicznych
do nadzorowania procesu skrawania przedmiotów
wielkogabarytowych na wieloosiowych centrach
obróbkowych”***



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



Założenie: niezmienna prędkość obrotowa wrzeciona

Dopasowanie sztywności zamocowania przedmiotu obrabianego do optymalnego kąta przesunięcia fazowego w kolejnych przejściach narzędzia



- Określenie optymalnej sztywności zamocowania przedmiotu
 - Sztywność optymalna – sztywność, przy której poziom drgań przedmiotu obrabianego jest najmniejszy
- Na częstotliwość i amplitudę drgań mają wpływ własności dynamiczne przedmiotu obrabianego
 - W różnych obszarach przedmiotu mogą dominować inne postacie drgań
 - Konieczne jest określenie „mapy” opisującej współczynniki sztywności dla każdego punktu przedmiotu



Założenie. W widmie amplitudowym drgań przedmiotu występuje jedna dominująca częstotliwość drgań własnych

- Minimalizacja pracy sił skrawania na kierunku grubości warstwy skrawanej – przekształcony warunek *Liao-Younga* (1996)

$$f_{\alpha} = \frac{zn_o}{60} (0,25 + k), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

- f_{α} – **poszukiwana** częstotliwość drgań własnych przedmiotu obrabianego [Hz],
 n_o – **niezmienna** prędkość obrotowa wrzeciona [obr/min],
 z – liczba ostrzy narzędzia

W przypadku obróbki przedmiotów wielkogabarytowych jest to jedynie **pierwsze przybliżenie**

Optymalnej sztywności zamocowania należy szukać w **warunkach dynamicznych**



**Uzasadnienie: sztywność zamocowania przedmiotu
obrabianego **wymaga modyfikacji****

1. Wirtualne Prototypowanie (WP)

**2. Wirtualne Prototypowanie Wspomagane
Eksperymentem (WPWE)**

3. Realizacja w Systemie Docelowym (RSD)

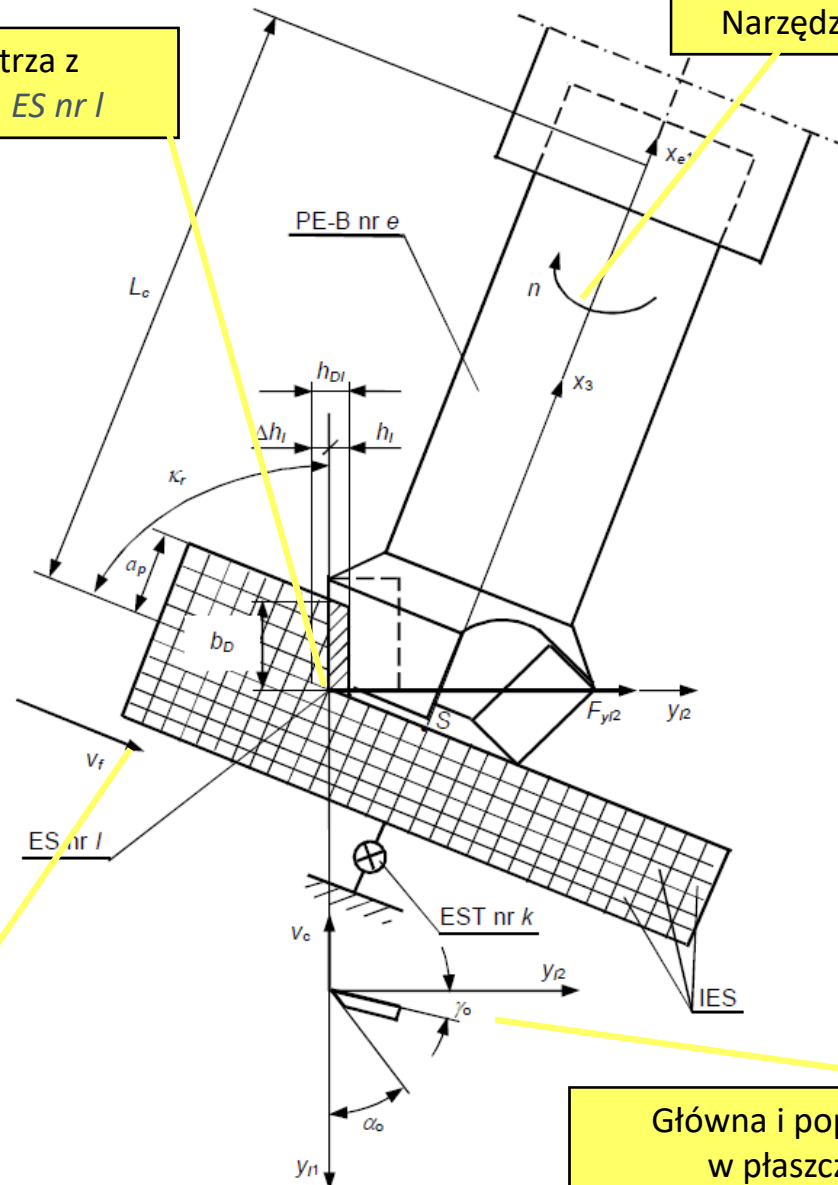


Dynamika skrawania głowicą frezową



Chwilowy punkt styku ostrza z
przedmiotem obrabianym *ES nr l*

Narzędzie wirujące z prędkością obrotową n



Prędkość posuwu v_f

Główna i poprzeczna siła skrawania
w płaszczyźnie ortogonalnej



Dynamiczny opór skrawania
powierzchniowy właściwy

$$F_{yl1}(t) = \begin{cases} k_{dl} [a_p(t) - \Delta a_p(t)] [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)], & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0 \\ 0, & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0 \end{cases}$$

Zmienna w czasie głębokość skrawania $\Delta a_p(t) > 0$
 $\forall a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0$

$$F_{yl2}(t) = \begin{cases} \mu_2 k_{dl} [a_p(t) - \Delta a_p(t)] [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)], & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0 \\ 0, & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0 \end{cases}$$

$\wedge a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0,$
 $\forall a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0.$

$$F_{yl3}(t) = \begin{cases} \mu_3 k_{dl} [a_p(t) - \Delta a_p(t)] [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)], & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0 \\ 0, & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0 \end{cases}$$

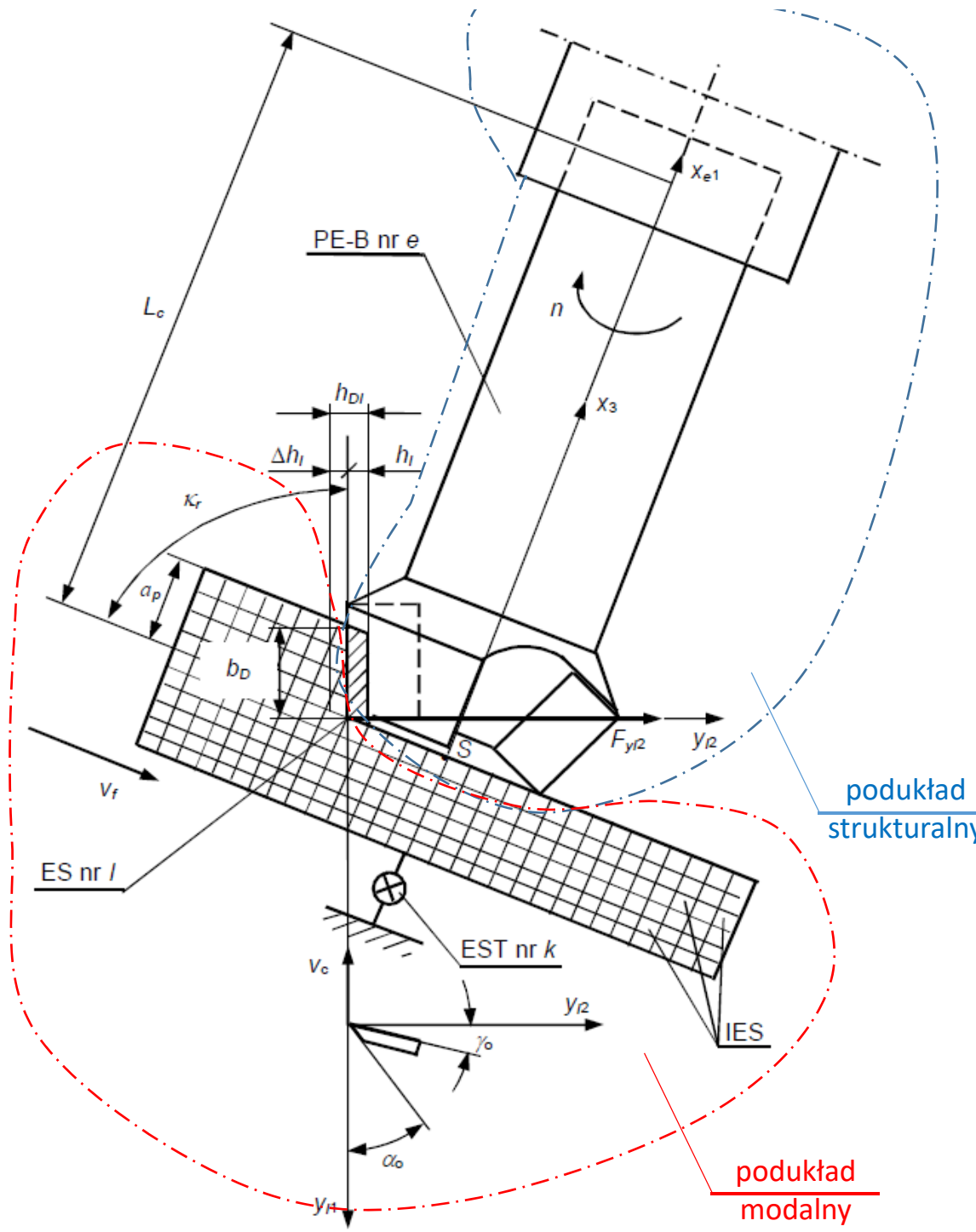
Zmienna w czasie grubość warstwy skrawanej $\Delta a_p(t) > 0$
 $\forall a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0.$

Współczynniki siły skrawania



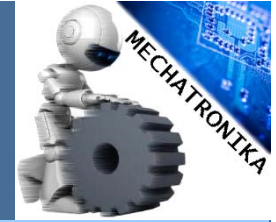
Ró

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{a}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{a}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{a} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^{i_l} \mathbf{T}_l^T(t) \mathbf{F}_l^0(t) \\ - \sum_{l=1}^{i_l} \mathbf{W}_{ml}^T(t) \mathbf{F}_l^0(t) \end{bmatrix}$$



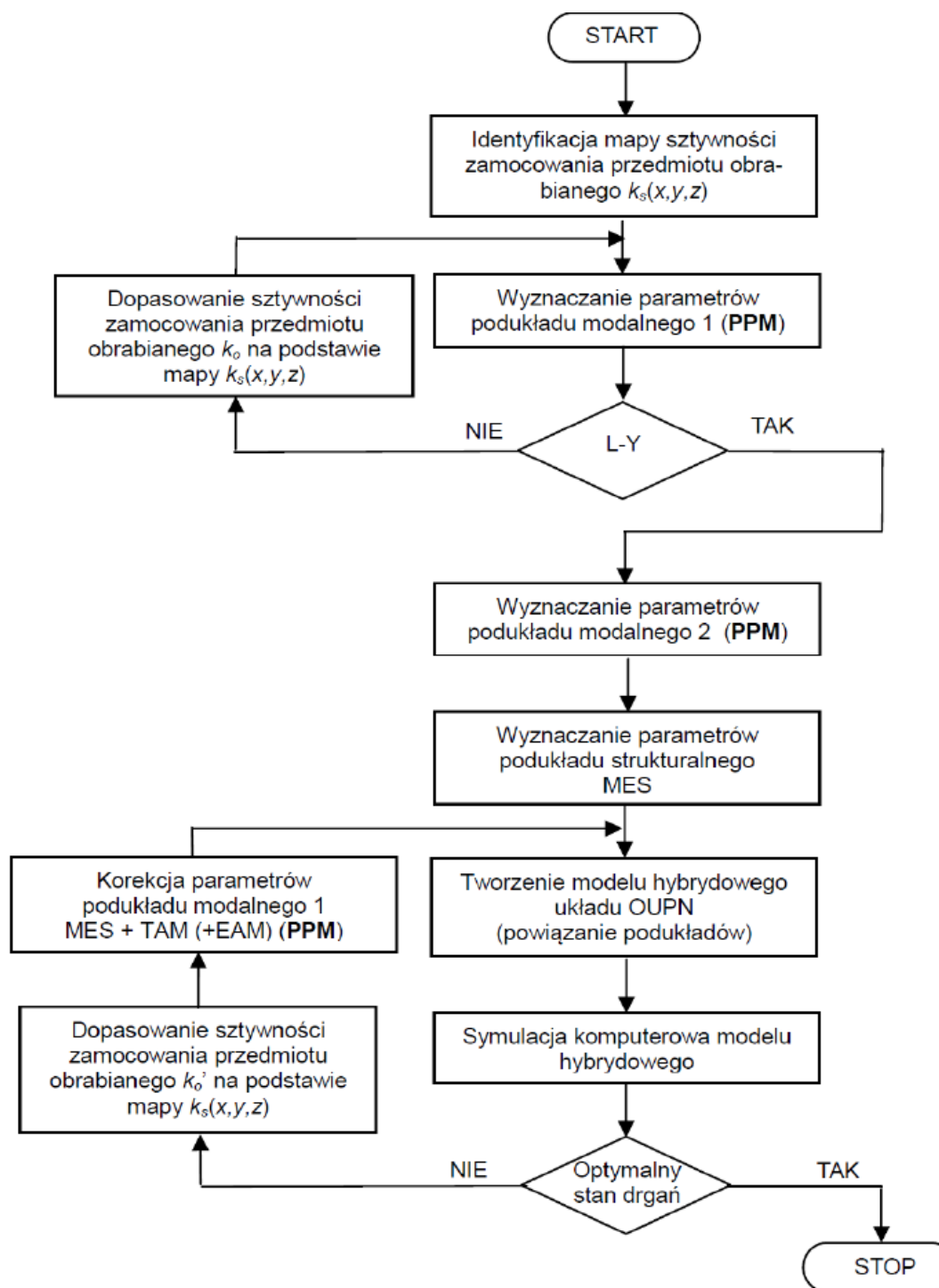
podukład strukturalny

podukład modalny



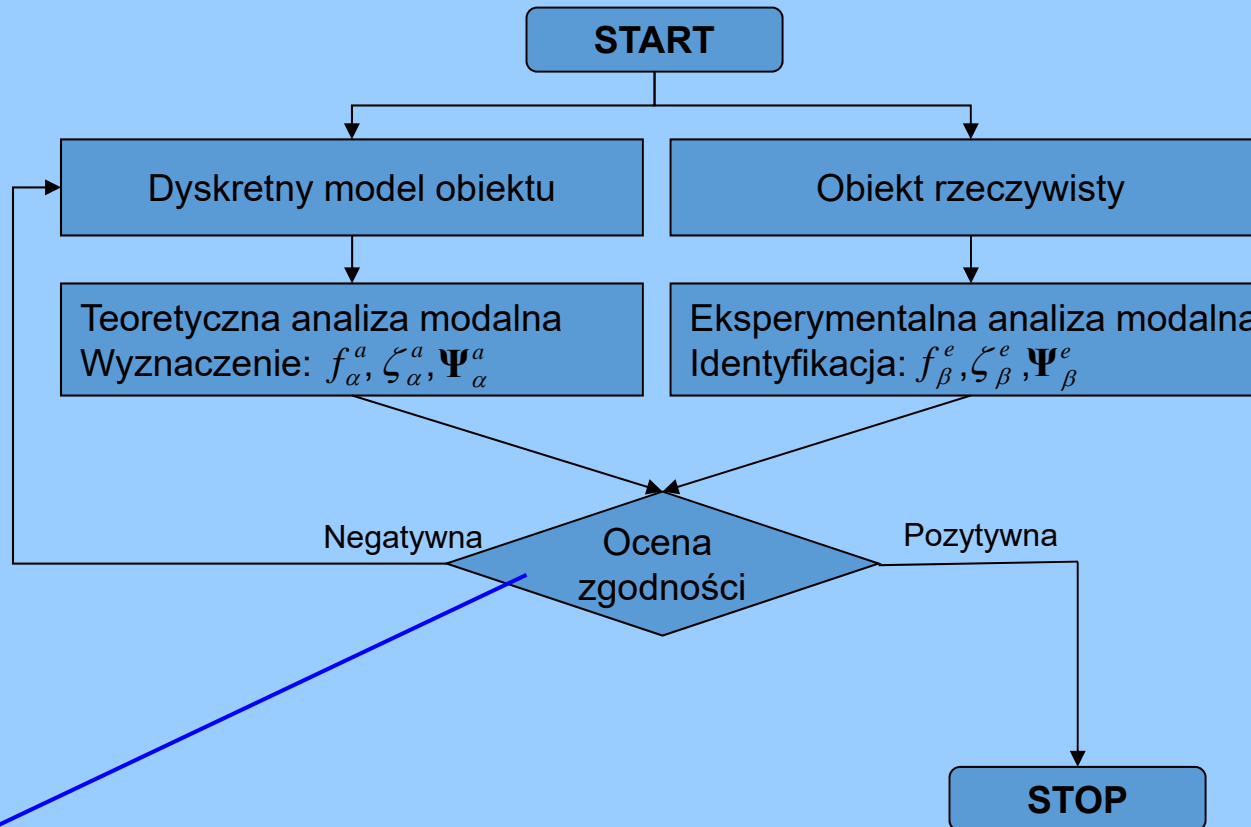
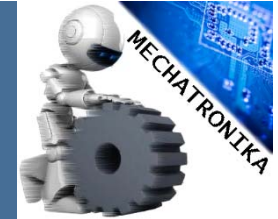
awania

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_{ml}(t) \\ \mathbf{W}_{ml}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{a} \end{Bmatrix} =$$





Wyznaczanie Parametrów Podukładu Modalnego



$$MAC^{e-a}(i, j) = \frac{(\Psi_{\alpha}^{aT} \cdot \Psi_{\beta}^e)^2}{(\Psi_{\alpha}^{aT} \cdot \Psi_{\alpha}^a) \cdot (\Psi_{\beta}^{eT} \cdot \Psi_{\beta}^e)}$$



Podstawa analizy.

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

- wartości RMS przemieszczeń w dziedzinie czasu
- wartości dominujących „szczytów” w widmie amplitudowym

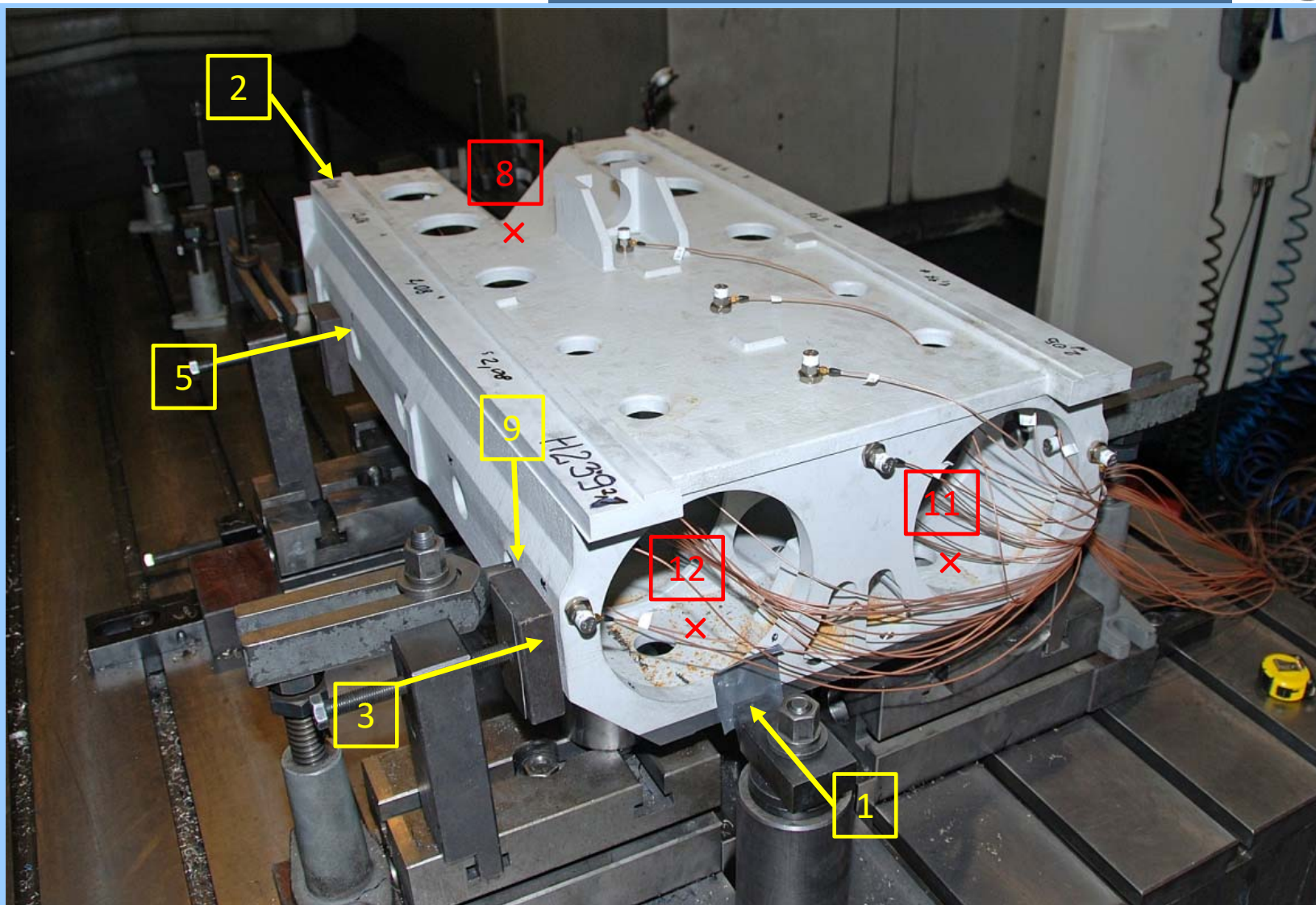
Potwierdzenie skuteczności nadzorowania drgań narzędzie-przedmiot obrabiany w procesie obróbki przedmiotów **testowych** dla **danych procesowych**, z wykorzystaniem **optymalizacji sztywności zamocowania przedmiotu** oraz techniki **WPWE**.



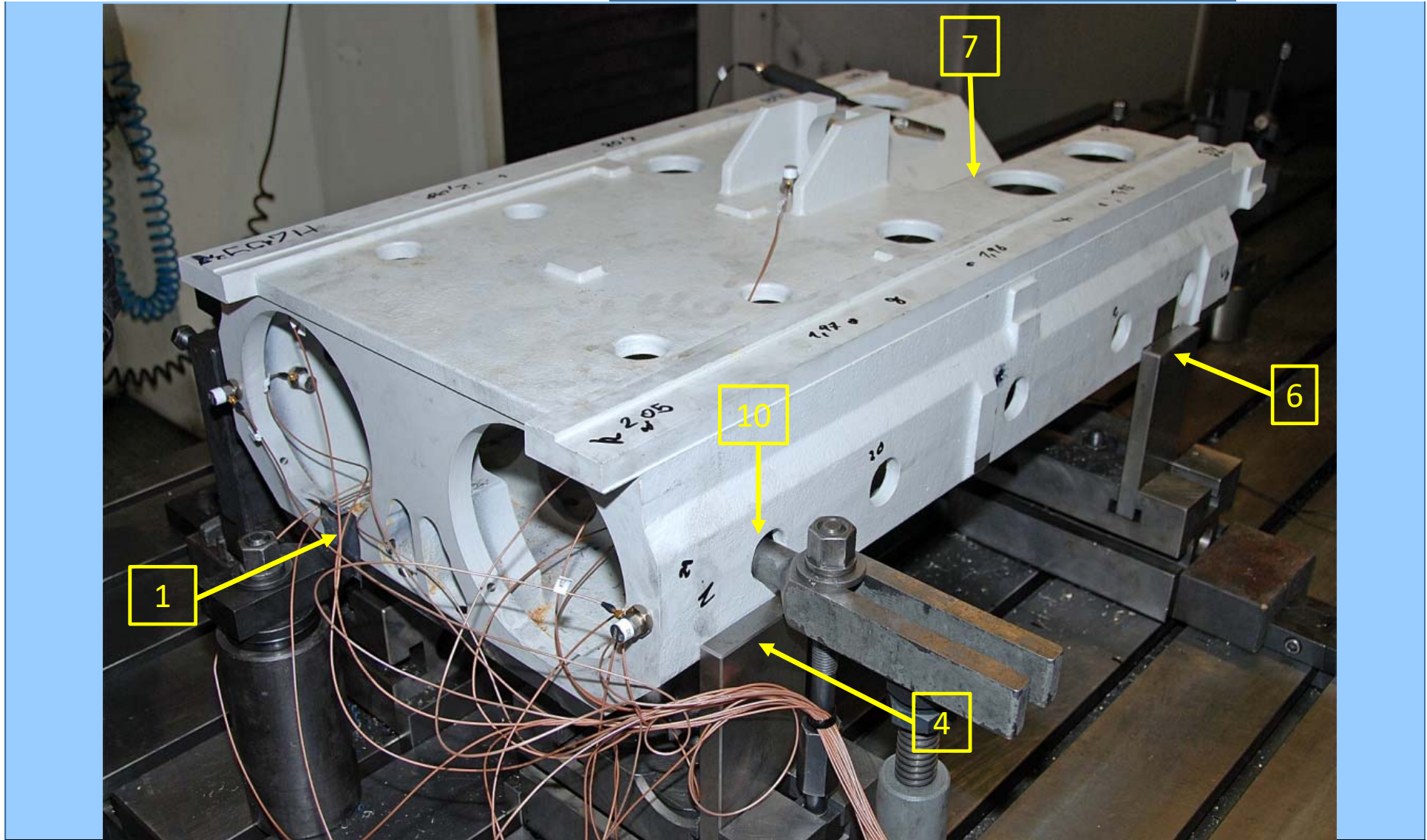
**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

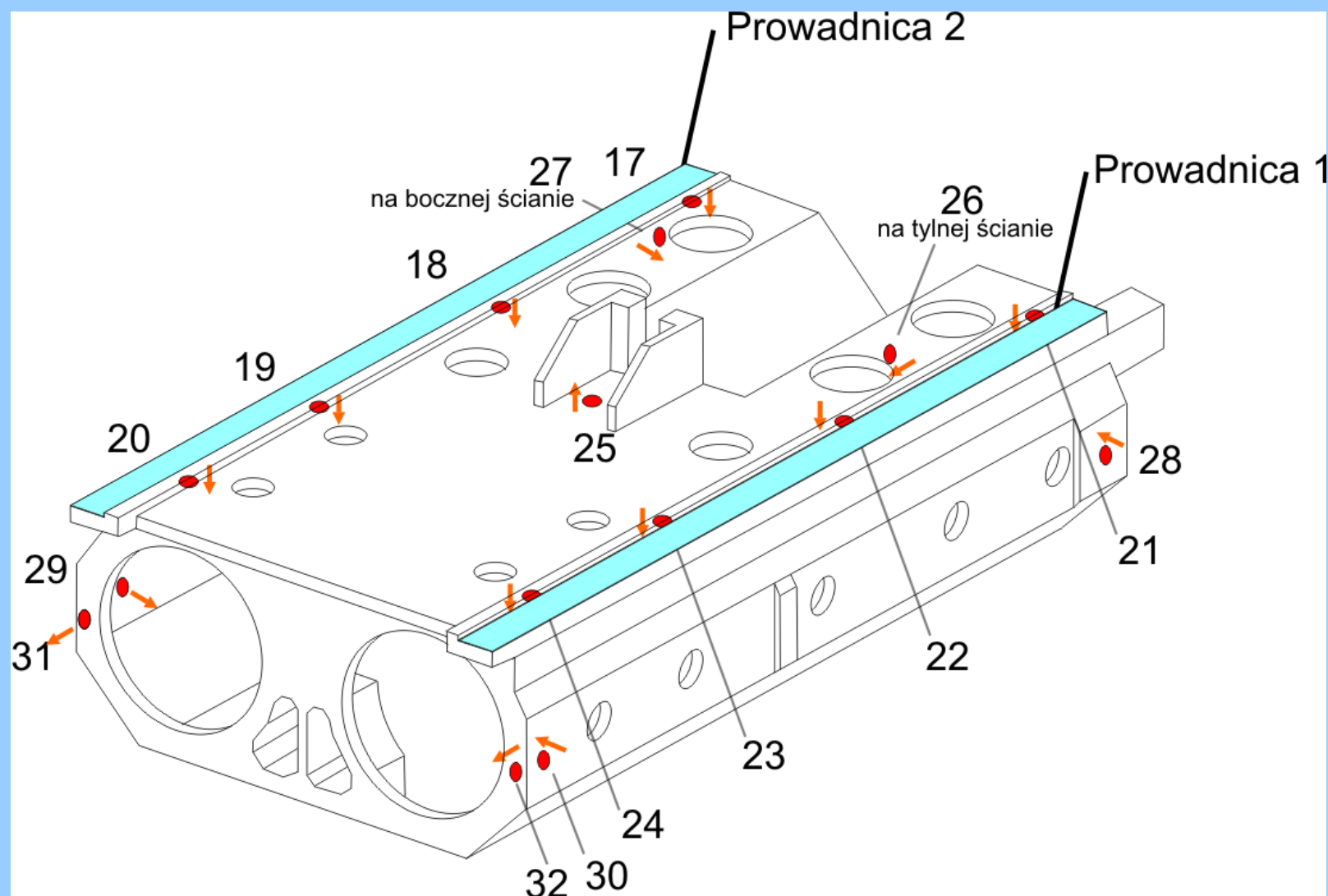
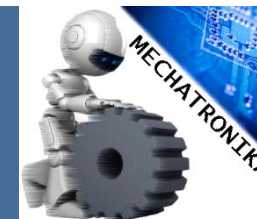
WYDZIAŁ MECHANICZNY

Przykład.
Przedmiot testowy 440424
PHS HYDROTOR w Tucholi



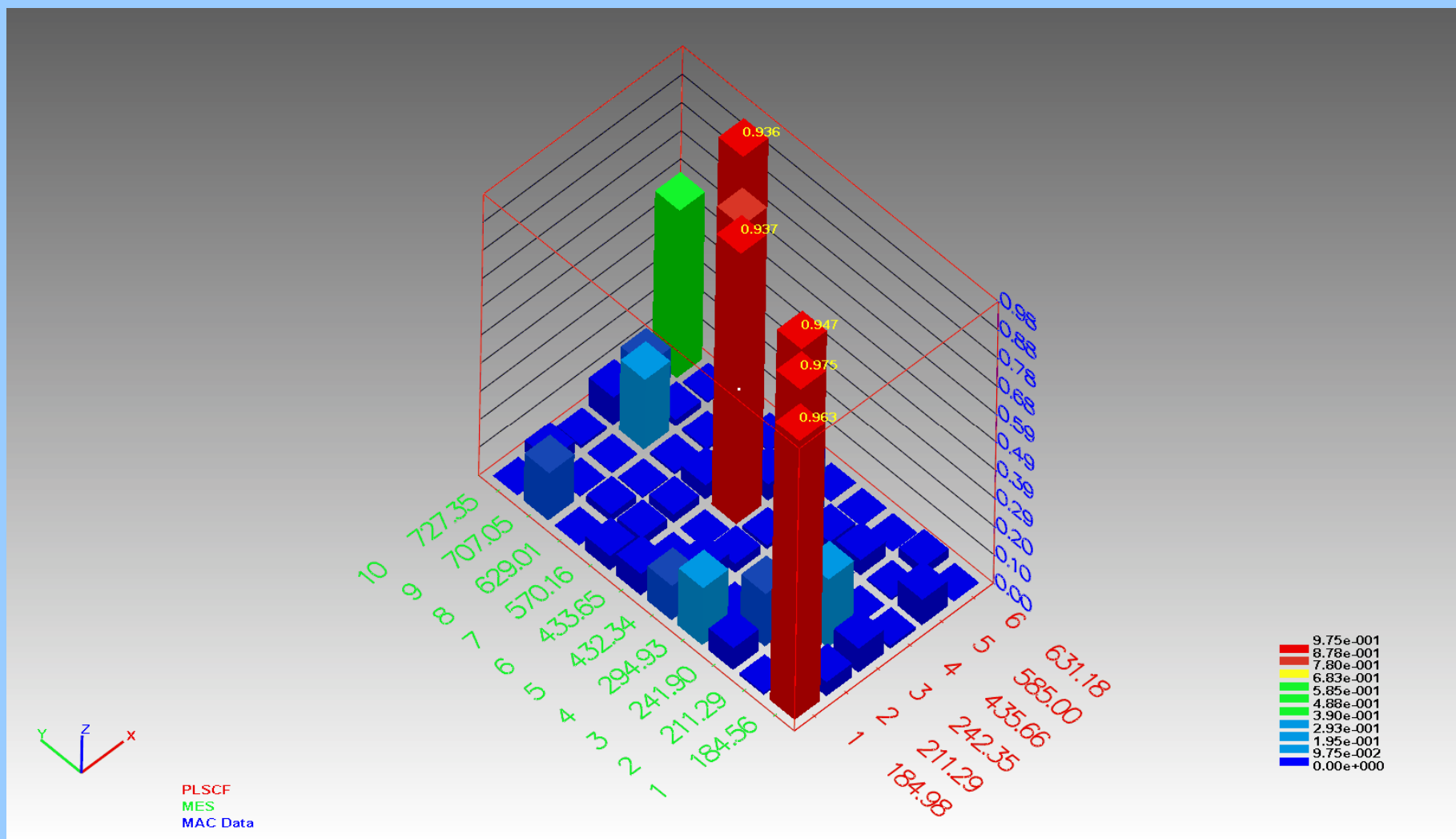
XVII Warsztaty Projektowania Mechatronicznego, Kraków 01-02 czerwca 2017 r.







Wartości współczynników MAC





Macierz współczynników MAC

0,96	0,05	0,08	0,01	0,09	0
0,01	0,98	0,24	0	0,01	0,03
0,08	0,18	0,95	0,03	0,05	0,01
0,2	0	0	0	0,03	0
0,13	0,08	0,03	0,01	0,18	0
0,08	0	0	0,94	0,06	0,01
0,05	0,03	0,03	0,05	0,87	0,01
0	0,03	0	0,01	0,01	0,94

Ocena zgodności częstotliwości drgań własnych

p-LSCFD	185,0	211,3	242,4	-	-	435,7	585,0	631,2	-	-
Model obliczeniowy MEDINA + PERMAS	184,6	211,4	242,2	295,5	434,3	434,4	571,5	630,2	710,5	729,5



Współczynniki sztywności podpór: 1-3 [N/mm], 4-6 [N mm]

1	1.283755e+05	1.919485e+05	4.389142e+03	1.984380e+08	1.000000e+15	1.412063e+14
2	2.159899e+03	5.326818e+03	7.436495e+04	9.452576e+14	3.162278e+07	1.000000e+05
3	5.312812e+02	2.148314e+04	1.330407e+05	8.904463e+14	8.117530e+07	2.585378e+01
4	4.914944e+03	1.055159e+00	1.000000e+00	1.000000e+15	2.662535e+07	1.000000e+05
5	6.897690e+03	3.795365e+03	1.123493e+04	9.234178e+14	1.665779e+09	2.194623e+01
6	7.572907e+04	1.014547e+00	2.333516e+05	1.064673e+09	2.310130e+01	3.162278e+07
7	4.648306e+04	1.994494e+04	2.895372e+04	1.769535e+07	2.581510e+01	1.237707e+01
8	1.401676e+04	2.619562e+03	2.046760e+07	1.516293e+06	1.281377e+01	2.869303e+01
9	1.002634e+00	1.059693e+00	1.252098e+04	8.972493e+14	3.792669e+06	4.827051e+06
10	1.143934e+04	7.780308e+01	3.000294e+05	9.969139e+06	5.388535e+06	7.969413e+00
11	8.683233e+04	5.900097e+03	7.599986e+04	3.162258e+07	1.098121e+09	1.163621e+02
12	4.849385e+04	1.476856e+05	5.126743e+05	3.964849e+08	3.359608e+08	8.724257e+01



Frezowanie czółowe prowadnicy 2.

Drgania względne w umownym punkcie styku narzędzia z przedmiotem S w kierunku normalnym do powierzchni obrabianej

Zespół narzędziowy T13, głowica frezowa SECO Z6 $\phi 63$

Głębokość skrawania $a_p = 1$ mm

Liczba ostrzy głowicy frezowej $z = 6$

Średnica podziałowa głowicy $D = 63$ mm

Prędkość obrotowa $n = 1112$ obr/min

Prędkość posuwu $v_f = 1112$ m/min

Długość prowadnicy $l_d = 956$ mm

Problem: Poszukiwanie optymalnej kombinacji zamocowania przedmiotu obrabianego poprzez usuwanie niektórych podpór



Nr podpory	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Nr symulacji													RMS [mm]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0019
2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0016
3	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0016
4	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0018
5	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0058
6	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0016
7	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0057
8	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0,0018
9	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0,0024
10	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0,0056
11	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0055
12	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0,0017
13	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0,0062
14	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0,0021
15	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0,002
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0,0018
17	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0,0025
18	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0,0027
19	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0,0019
20	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0,0037



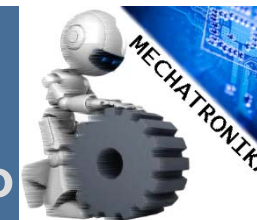
Nr podpory	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12											
Nr symulacji														f_{c1} [Hz]	q_1 [mm]	f_{c2} [Hz]	q_2 [mm]	f_{c3} [Hz]	q_3 [mm]	f_{c4} [Hz]	q_4 [mm]	f_{c5} [Hz]	q_5 [mm]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	8,90E-04	222,1951	7,75E-04	443,1693	4,68E-04	887,5595	2,26E-04		
2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	9,06E-04	222,1951	7,00E-04						
3	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	9,15E-04	222,1951	9,19E-04	443,1693	3,15E-04				
4	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	9,32E-04	222,1951	8,86E-04	443,1693	1,86E-04	554,2669	3,71E-04		
5	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0033	222,1951	0,0044						
6	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	8,91E-04	222,1951	7,76E-04	443,1693	4,50E-04	887,5595	2,16E-04		
7	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0033	222,1951	0,0043						
8	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	9,50E-04	222,1951	0,001	443,1693	4,43E-04	887,5595	1,32E-04		
9	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	9,53E-04	222,1951	0,0012	333,2926	0,0012	443,1693	1,32E-04	665,3644	6,81E-04
10	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,001	222,1951	0,002	333,2926	0,005				
11	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,004	222,1951	0,0029	333,2926	6,95E-04	346,722	0,0011		
12	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0011	222,1951	3,53E-04	289,342	8,72E-05	554,2669	2,05E-04		
13	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0073	222,1951	8,80E-04						
14	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	111,0975	8,89E-04	222,1951	0,0016	443,1693	4,06E-04				
15	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	111,0975	9,61E-04	222,1951	8,87E-04	443,1693	3,42E-04	887,5595	1,89E-04		
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	111,0975	9,04E-04	222,1951	7,82E-04	333,2926	1,26E-04	443,1693	4,35E-04		
17	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	111,0975	9,59E-04	222,1951	0,0022	443,1693	3,08E-04				
18	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	111,0975	9,02E-04	222,1951	0,0024	429,74	3,79E-04				
19	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	111,0975	9,78E-04	222,1951	8,96E-04	333,2926	1,38E-04	443,1693	3,22E-04		
20	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	111,0975	9,75E-04	222,1951	0,0041						



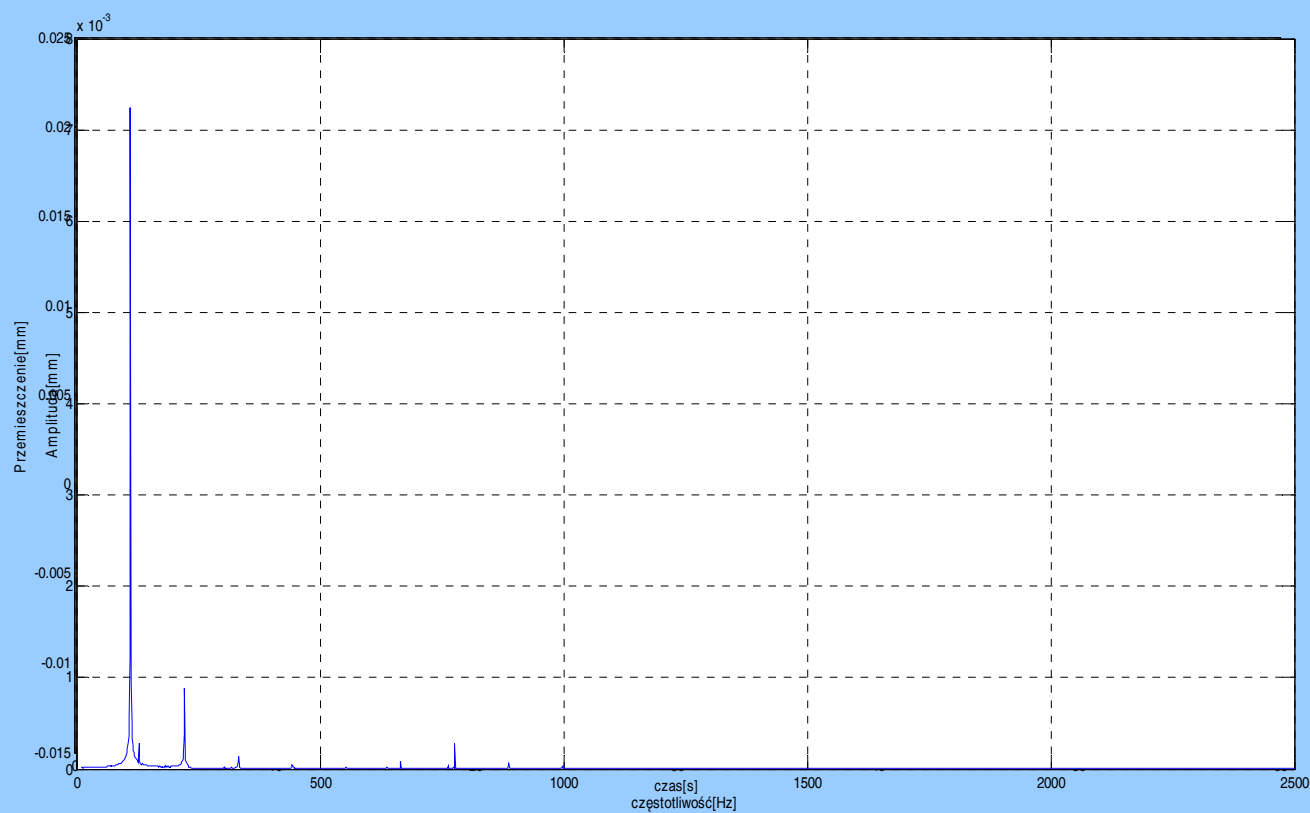
**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Przedmiot testowy 440424
PHS HYDROTOR w Tucholi.
Symulacje modelu hybrydowego



**Symulacja 13 – usunięte podpory 3, 4, 5, 6
konfiguracja **skrajnie niekorzystna****





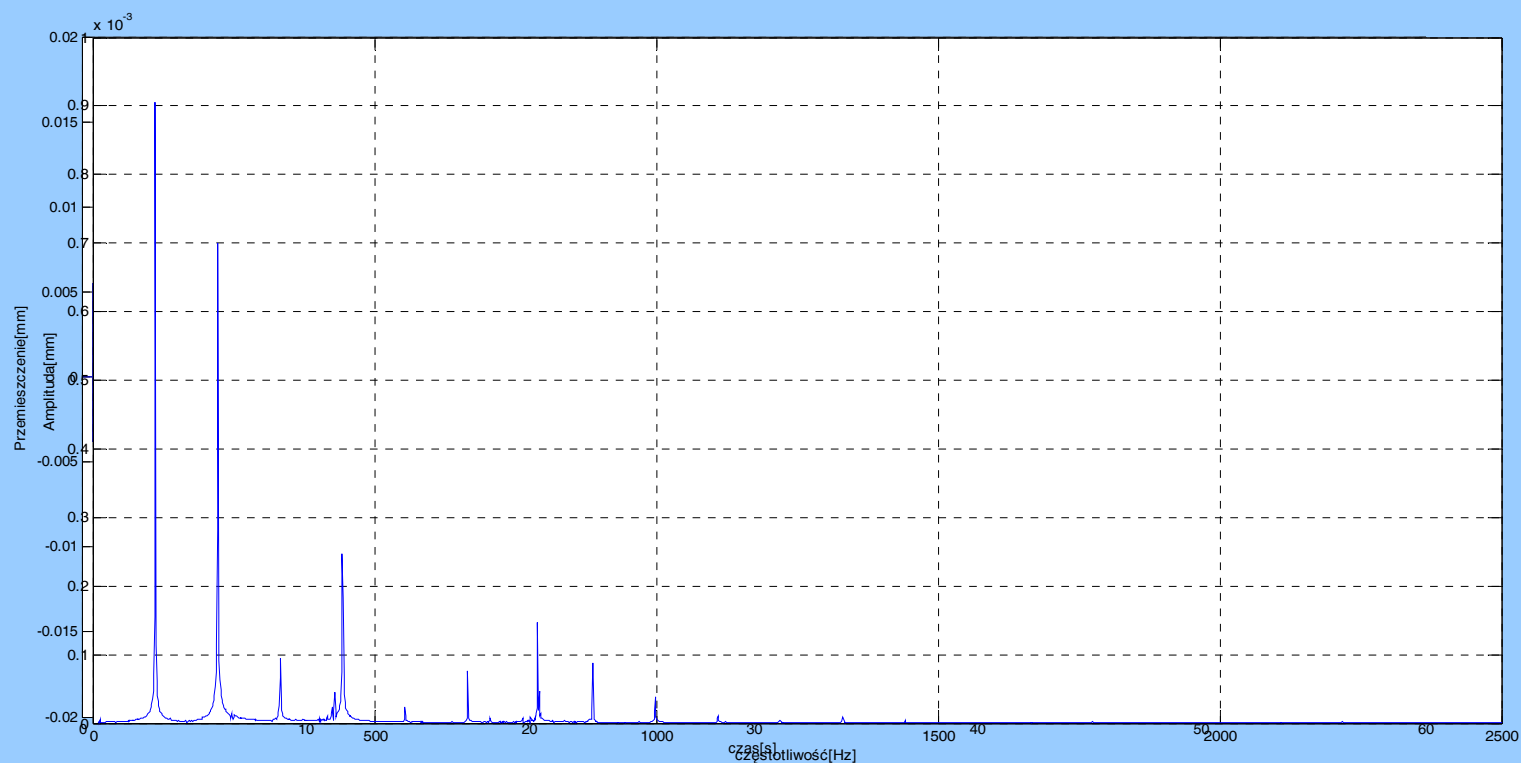
**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Przedmiot testowy 440424
PHS HYDROTOR w Tucholi.
Symulacje modelu hybrydowego



Symulacja 2 – usunięta podpora 1 konfiguracja **optymalna**

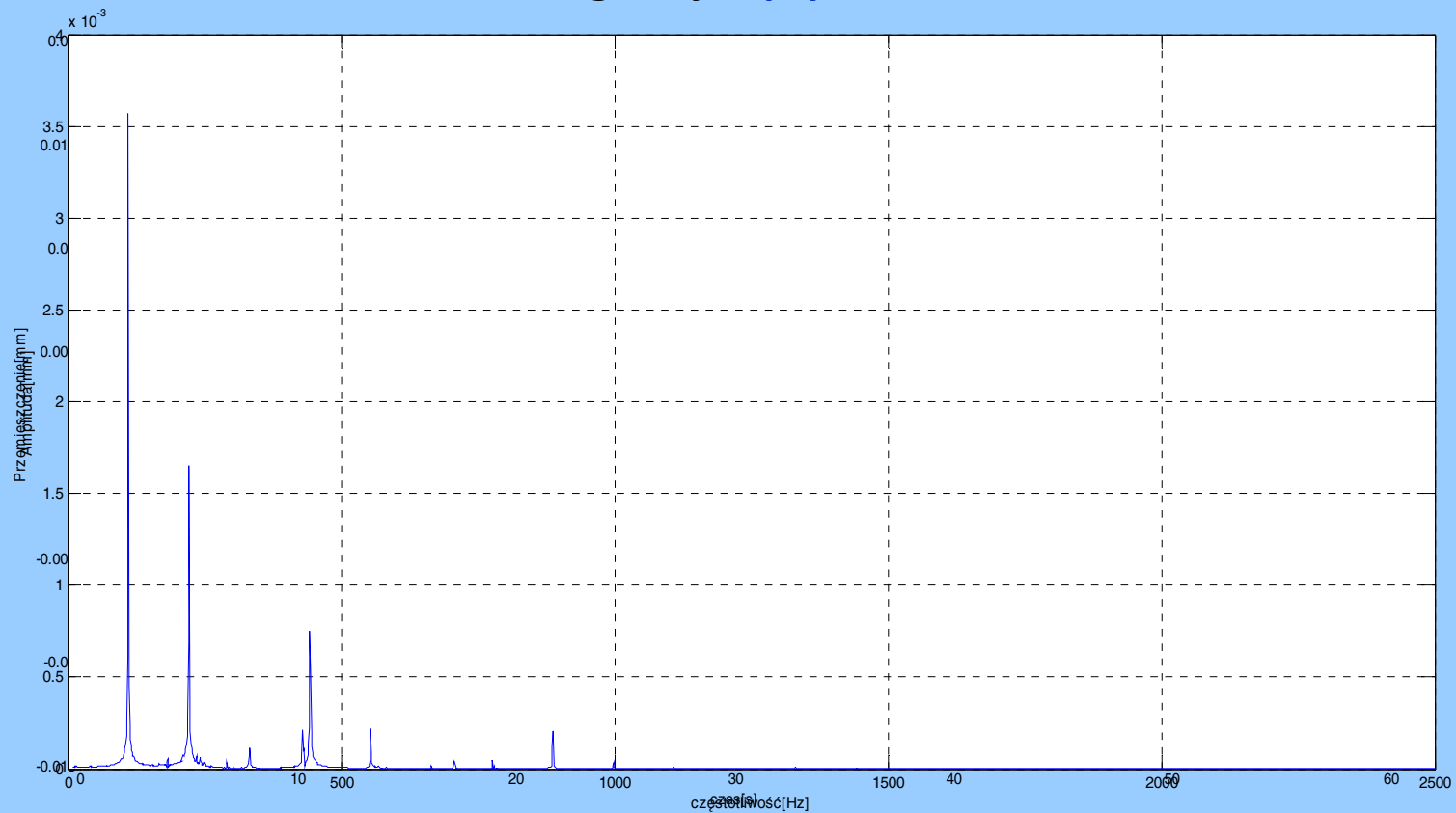




Nr podpory	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12										
Nr symulacji													$t_{p2}=50\text{ s}$									
													f_{c1} [Hz]	q_1 [mm]	f_{c2} [Hz]	q_2 [mm]	f_{c3} [Hz]	q_3 [mm]	f_{c4} [Hz]	q_4 [mm]	f_{c5} [Hz]	q_5 [mm]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0035	222,195	0,0016	443,169	7,96E-04				
2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0036	222,195	0,0045	443,169	4,09E-04				
3	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,004	222,195	0,0025	554,267	9,59E-04				
4	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0041	222,195	0,0073	554,267	0,0026				
5	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0048	222,195	0,0053	443,169	7,04E-04				
6	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0036	222,195	0,0017	443,169	7,50E-04				
7	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0048	222,195	0,0053	443,169	6,73E-04				
8	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0047	222,195	0,0024	443,169	5,35E-04				
9	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0046	222,195	0,0031	333,293	0,0011	443,169	7,50E-04	665,364	0,0026
10	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0065	222,195	0,0055	333,293	0,0056	443,169	5,30E-04	665,364	0,0011
11	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0062	222,195	0,0077	346,722	9,29E-04	554,267	0,0018		
12	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0099	222,195	0,0019						
13	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	111,0975	0,0084	222,195	7,18E-04						
14	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	111,0975	0,0036	222,195	0,0051	443,169	7,20E-04				
15	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	111,0975	0,0036	222,195	0,0018	443,169	7,66E-04				
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	111,0975	0,0044	222,195	0,0017	333,293	8,57E-04	554,267	0,0028		
17	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	111,0975	0,0037	222,195	0,0066	443,169	6,89E-04				
18	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	111,0975	0,0044	222,195	0,0086	333,293	0,001	554,267	0,0025		
19	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	111,0975	0,0045	222,195	0,0019	333,293	9,40E-04	554,267	0,0027		
20	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	111,0975	0,0045	222,195	0,0141	554,267	0,0024				

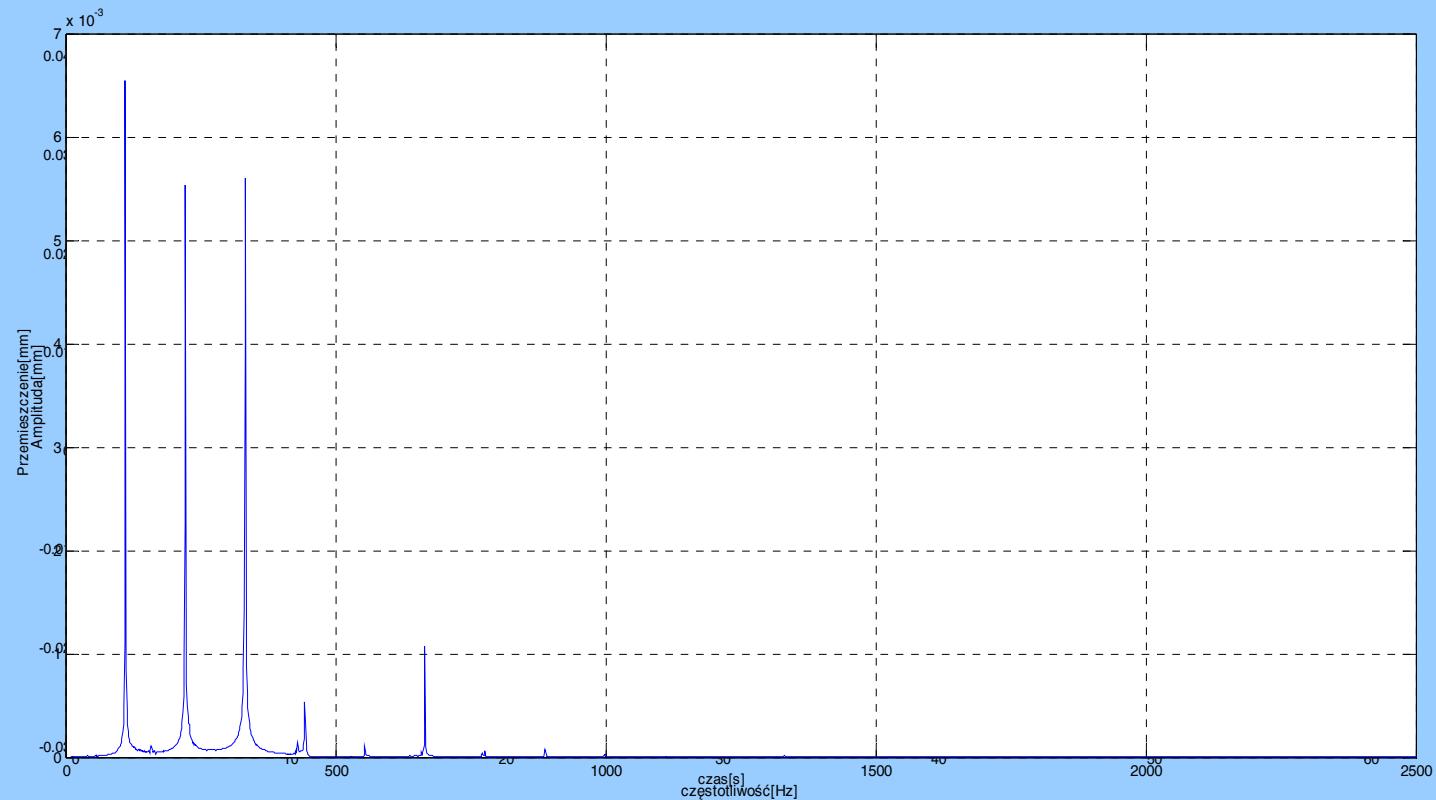


Symulacja 6 – usunięta podpora 4
konfiguracja optymalna





Symulacja 10 – usunięte podpory 5, 6
konfiguracja **skrajnie niekorzystna**





Uproszczona procedura B+R

Opis czynności	Czas realizacji	Uwagi
Badania modalne przedmiotu na obrabiarce, ograniczone do powierzchni obrabianych. Rezultat: parametry modelu modalnego $\Omega_m \mathbf{z}_m \Psi_m$	ok. 1 h ok. 0,5 h. po automatyzacji	Eliminacja elementów czasochłonnych: - tworzenie modelu MES podukładu modalnego, - ocena zgodności (walidacja)
Symulacja niestacjonarnego modelu hybrydowego procesu obróbkowego Rezultat: optymalna kombinacja współczynników sztywności zamocowania przedmiotu	ok. 62" (<i>generic – wersja uniwersalna</i>) ok. 50" (<i>native</i>)	Oprogramowanie autorskie: - MSYS2 MinGW 64-bit (Fortran) - MATLAB R2015a
RAZEM:	ok. 50' 40" (<i>generic</i>) ok. 46' 40" (<i>native</i>)	20 symulacji



Badania klasyczne („pracą”)

Czas obróbki: 60”

Czas zmiany kombinacji elementów mocujących: 300”

Łączny czas zabiegu obróbkowego: 360”

Liczba realizacji: 20

Łączny czas badań: **2 h, 2,5 -krotnie dłuższy**

**Ponadto, badania „pracą” wymagają poniesienia kosztów
zużytego przedmiotu obrabianego !!!**