



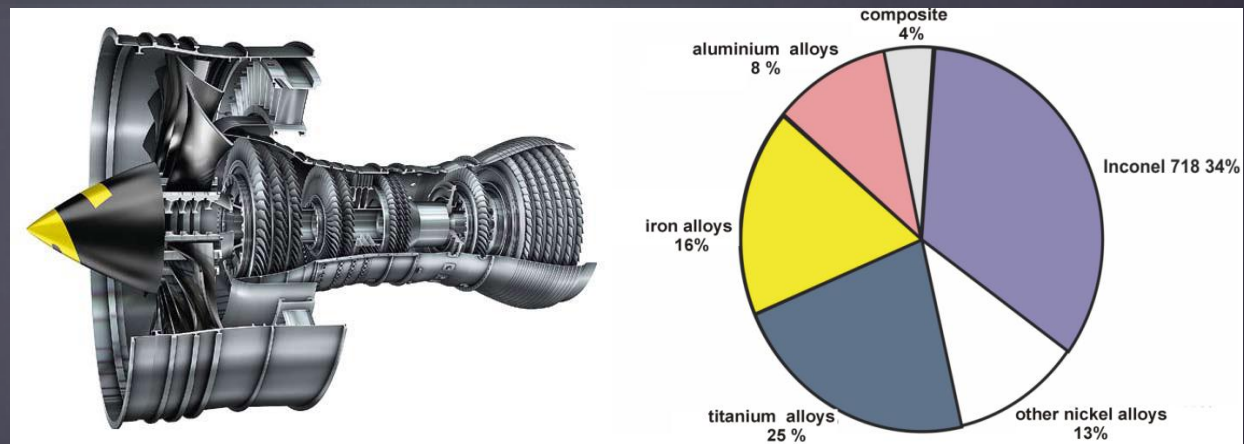
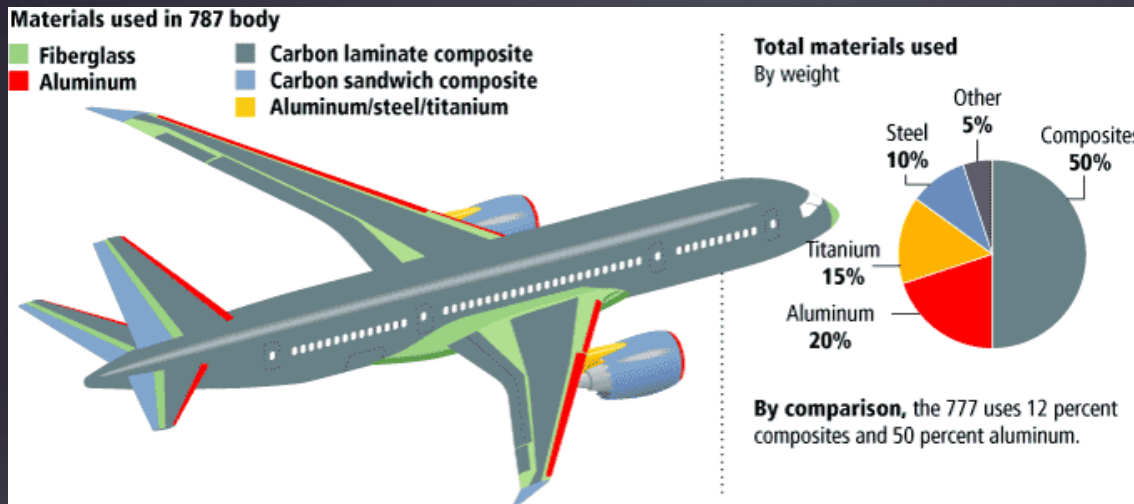
DRGANIA W PROCESIE SKRAWANIA

PLAN PREZENTACJI



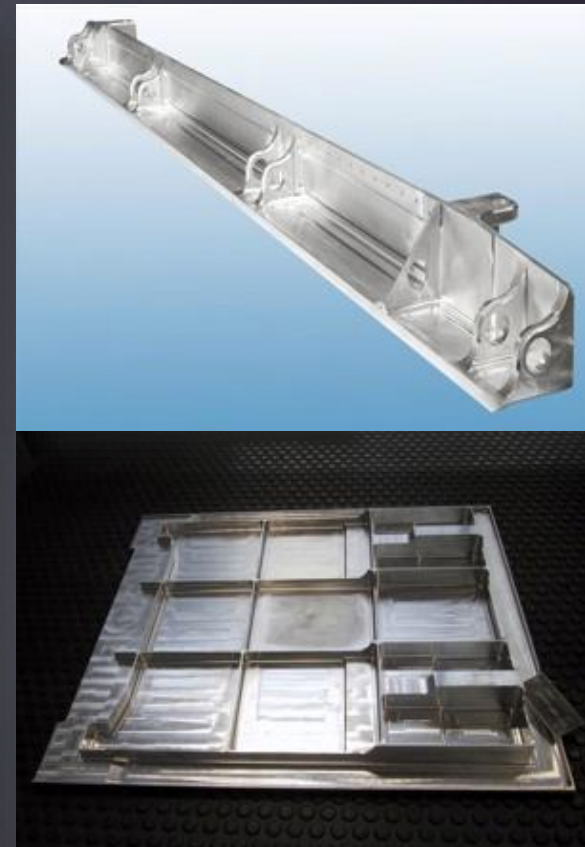
- Obróbka HSM – zalety i wady
- Drgania w obróbce skrawaniem
- Modelowanie procesów skrawania
- Stabilność procesu skrawania
- Badania procesów skrawania
- Sposoby eliminacji drgań w obróbce skrawaniem

OBRÓBKA HSM - PRZEMYSŁ LOTNICZY



Źródło: F. C. Cambell. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*, Elsevier, 2006.

OBRÓBKA HSM - PRZEMYSŁ LOTNICZY I MOTORYZACYJNY



Źródło: <http://www.xinlongarts.biz/mould-6279894-high-speed-machining-aluminum-parts-for-automotive-custom-cnc-machining-parts.html>

OBRÓBKA HSM – ZALETY I WADY



Główne zalety HSM:

- wysokie tempo usuwania nadmiaru,
- skrócenie czasu produkcji,
- mniejsze siły skrawania,
- korzystne rozpraszanie energii cieplnej, powodujące zmniejszenie odkształceń przedmiotu obrabianego.

Główne wady HSM:

- nadmierne zużycie narzędzia,
- wymóg specjalnych narzędzi (materiały, dokładne wykonanie),
- konieczność stosowania specjalnych obrabiarek i oprzyrządowania.

OBRÓBKA HSM – REDUKCJA KOSZTÓW



30% Redukcja ceny narzędzia	1% Redukcja kosztu wykonywanego elementu
50 % Zwiększenie trwałości narzędzia	1% Redukcja kosztu wykonywanego elementu
20% Zwiększenie parametrów obróbki	15% Redukcja kosztu wykonywanego elementu

Źródło: www.sandvik.pl

OBRÓBKA HSM – REDUKCJA KOSZTÓW



	Obróbka tradycyjna	High Speed Machining
Ilość elementów	44	6
Masa	4.5 [kg]	4 [kg]
Czas obróbki	1000 [h]	44 [h]
Ilość użytych narzędzi	53	6
Redukcja kosztów		73%



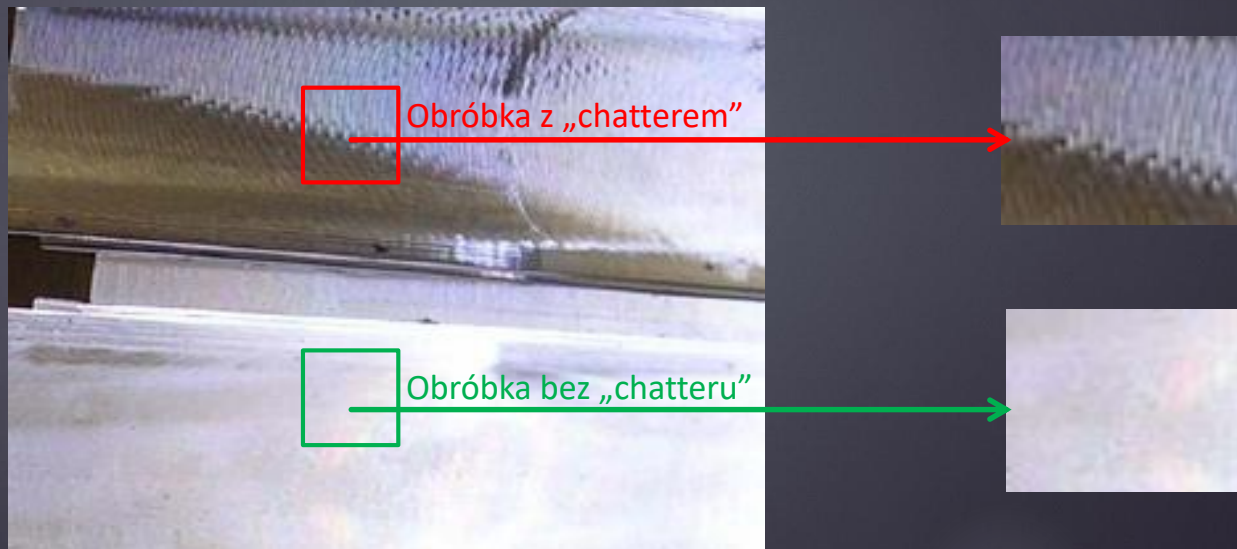
Pylon samolotu F-18 Hornet

Źródło: Makito Inc. Inside Boeing's Phantom Works – Exploring Issues of High Speed Machining and Metal Cutting Dynamics. Advanced Techniques in Aerospace Manufacturing 2008.

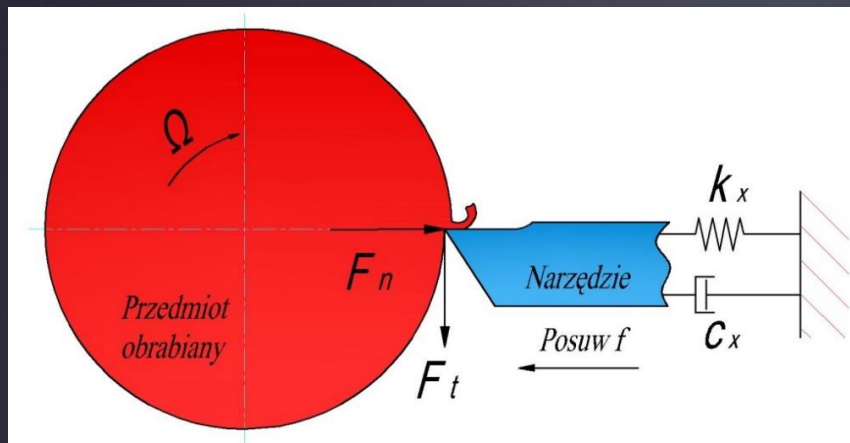


NEGATYWNY WPŁYW DRGAŃ SAMOWZBUDNYCH W OBRÓBCE SKRAWANIEM

- Obniża żywotność narzędzia i maszyny.
- Może doprowadzić do zniszczenia narzędzia lub powierzchni obrabianej.
- Powoduje nadmierny hałas.
- Wpływa negatywnie na jakość powierzchni obrabianej oraz wydajność procesu obróbki.



MODELOWANIE PROCESU SKRAWANIA



Układ jednowymiarowy

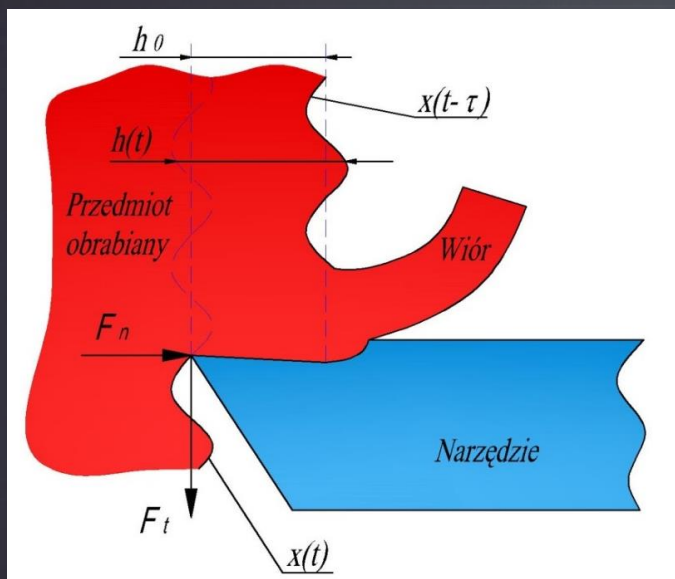
$$m_x \cdot x''(t) + c_x \cdot x'(t) + k_x \cdot x(t) = F_n(t)$$

$$F_n(t) = K_n \cdot b \cdot h(t)$$

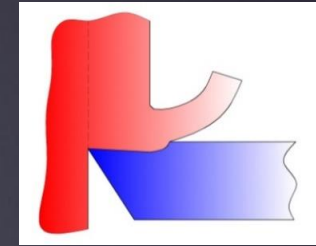
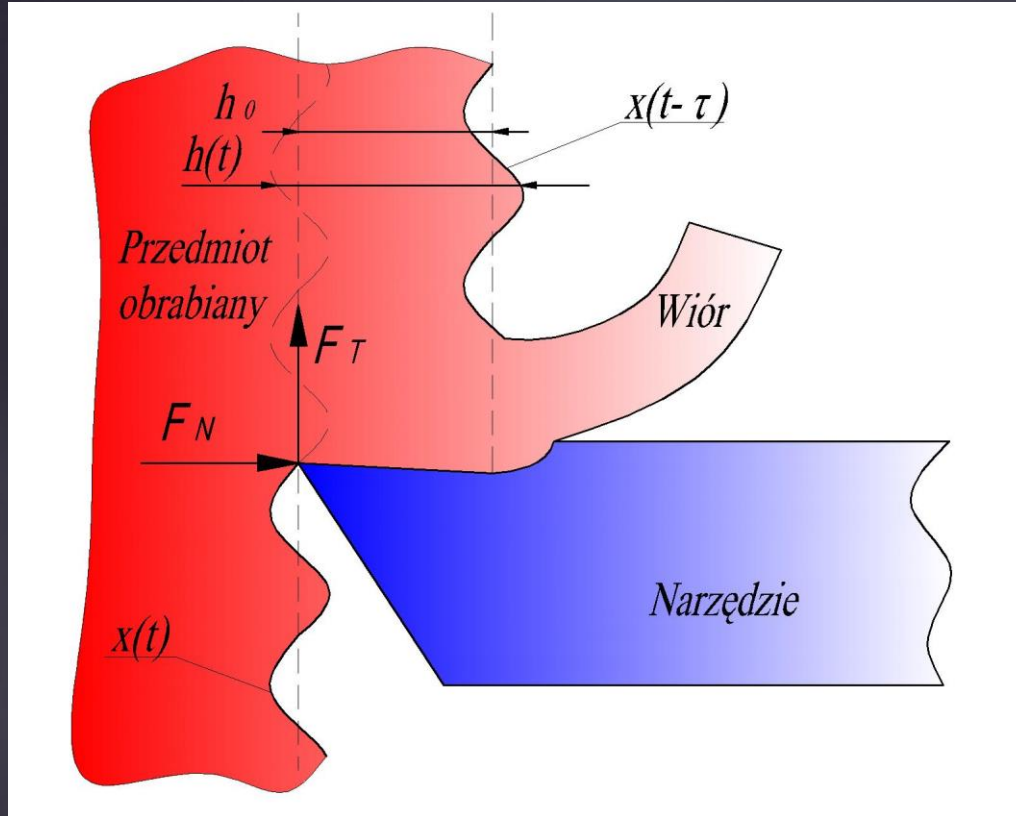
$$h(t) = h_{stat} + h_{dyn}$$

$$h_{stat} = h_0$$

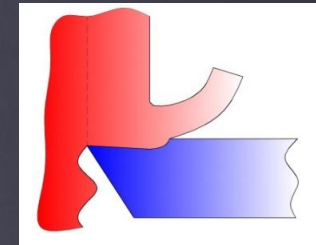
$$h_{dyn} = x(t - \tau) - x(t)$$



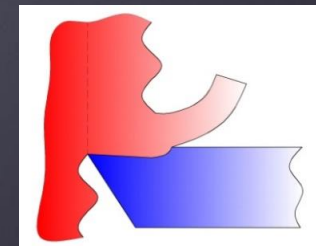
DRGRANIA W OBRÓBCE SKRAWANIEM



$$h(t) = h_0$$



$$h(t) = h_0 + x(t)$$

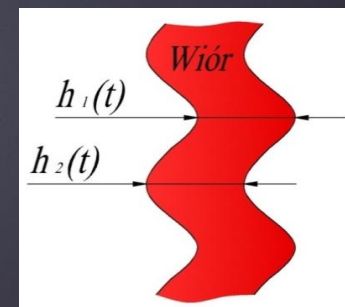
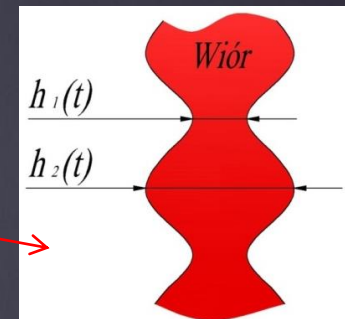
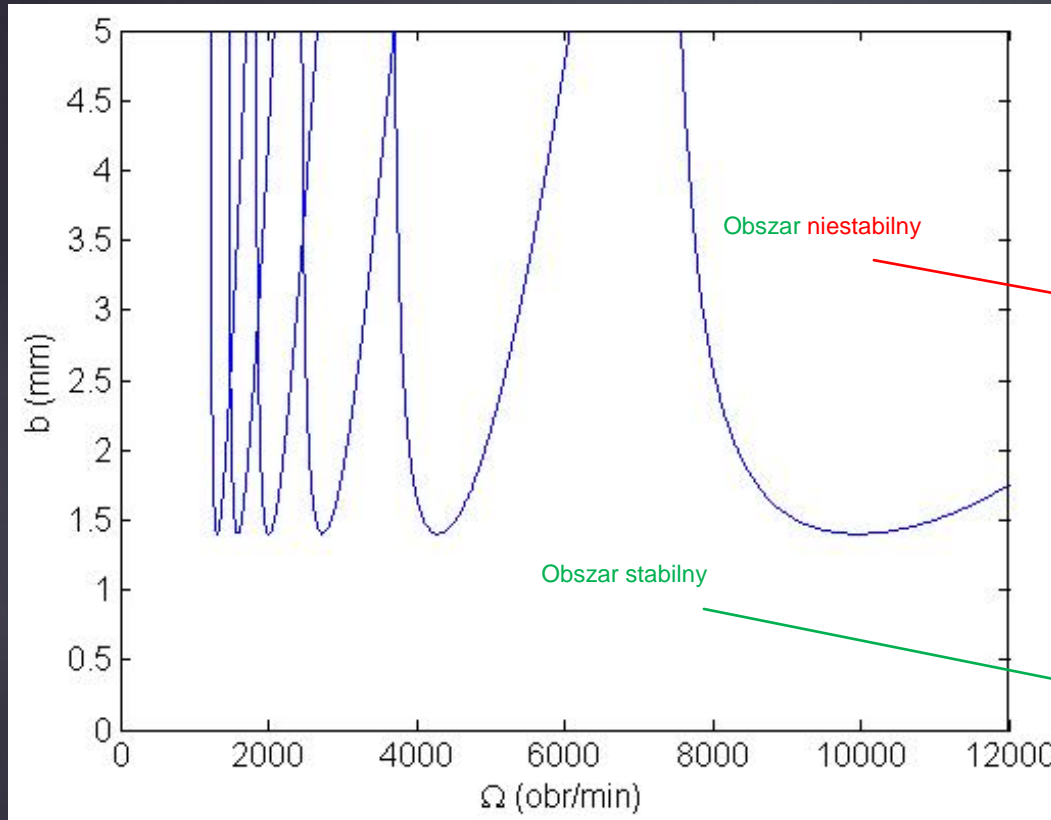


$$h(t) = h_0 + x(t) - x(t - \tau)$$

$$h(t) = h_{STAT}(t) + h_{DYN}(t)$$

$$h_{STAT}(t) = h_0, \quad h_{DYN}(t) = [x(t) - x(t - \tau)]$$

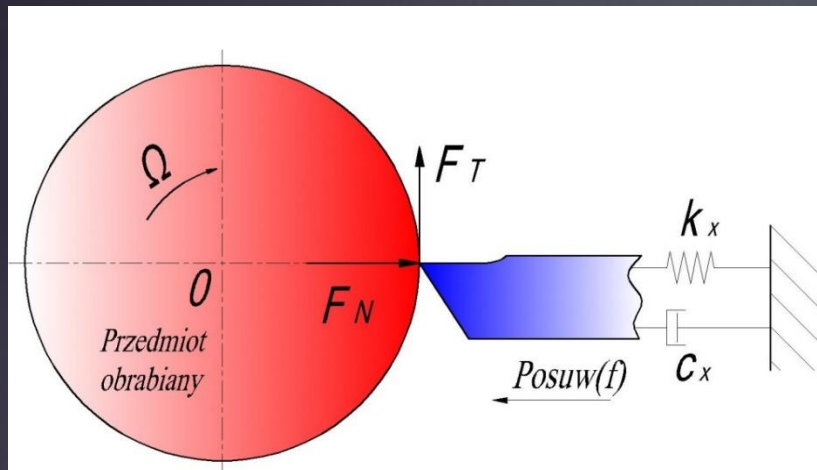
DRGRANIA W OBRÓBCE SKRAWANIEM



MODELOWANIE OBRÓBKI SKRAWANIEM



Modelowanie procesu toczenia

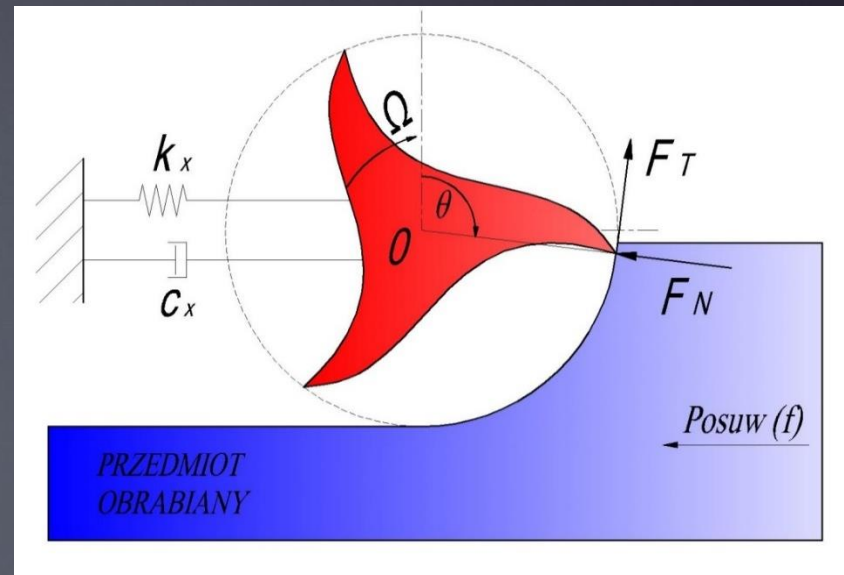


$$m_x \cdot x''(t) + c_x \cdot x'(t) + k_x \cdot x(t) = F_N$$

$$F_N = k_N \cdot b \cdot h(t)$$

$$h(t) = h_0 + x(t) - x(t - \tau)$$

Modelowanie procesu frezowania



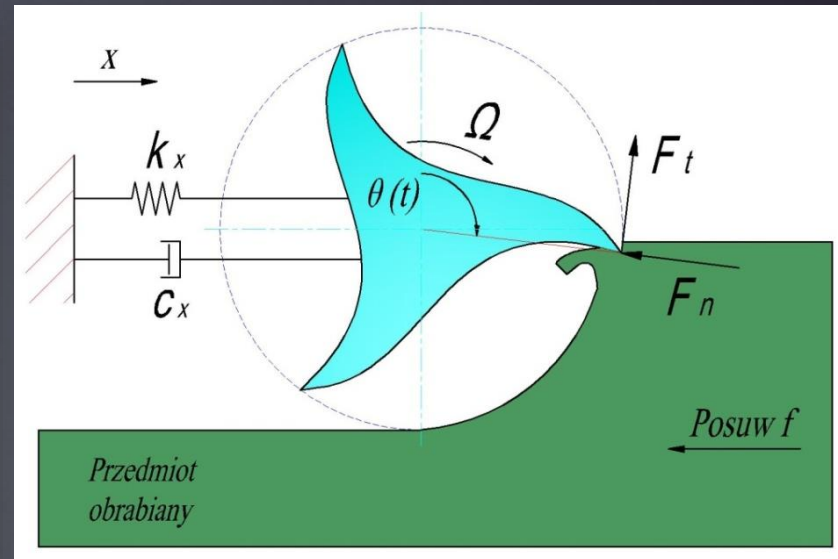
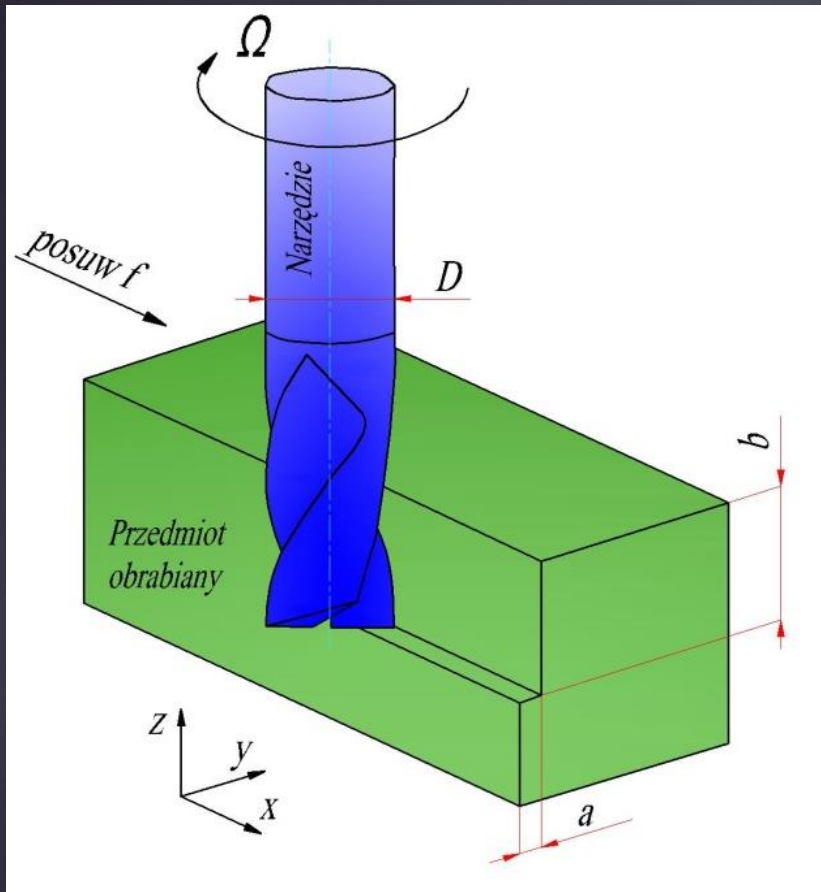
$$m_x \cdot x''(t) + c_x \cdot x'(t) + k_x \cdot x(t) = \sum_{i=1}^z F_p(t)$$

$$F_p(t) = g_p(t) \cdot [F_{Tp}(t) \cdot \cos \theta_p(t) - F_{Np}(t) \cdot \sin \theta_p(t)]$$

$$F_{Tp} = k_T \cdot b \cdot w(t)$$

$$F_{Np} = k_N \cdot b \cdot w(t)$$

MODELOWANIE PROCESU FREZOWANIA



Liniowy model frezowania o jednym stopniu swobody

$$m_x \cdot x''(t) + c_x \cdot x'(t) + k_x \cdot x(t) = \sum_{i=1}^z g_p(t) \cdot F_p(t)$$

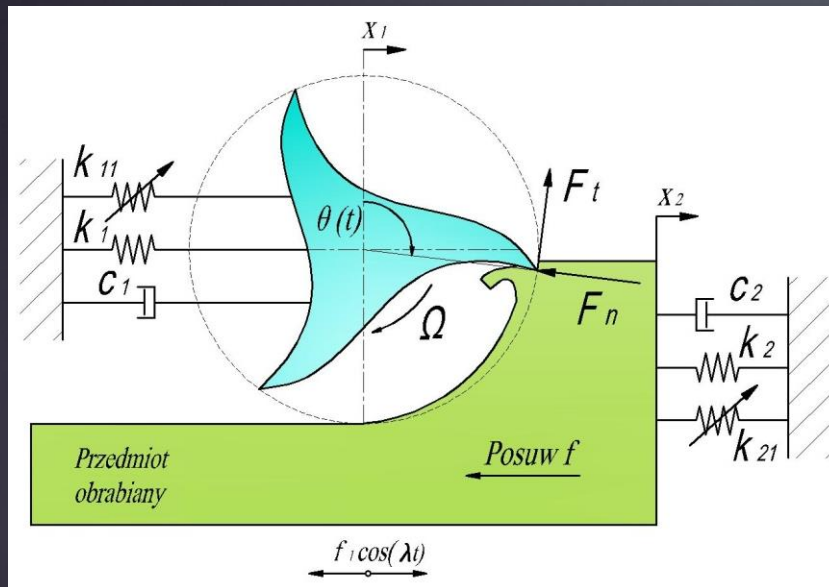
$$g_p(t) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$$

ostrze nie skrawa
ostrze skrawa

MODELOWANIE PROCESU FREZOWANIA



Nieliniowy model frezowania o dwóch stopniach swobody



Nieliniowy model frezowania o dwóch stopniach swobody

$$m_1 x_1''(t) + c_1 x_1'(t) + k_1 x_1(t) + k_{11} x_1(t)^3 = \sum_{i=1}^z F_x(t)$$

$$m_2 x_2''(t) + c_2 x_2'(t) + k_2 x_2(t) + k_{21} x_2(t)^3 = -\sum_{i=1}^z F_x(t)$$

$$F_x(t) = g_p(t) \left[-F_{tp}(t) \cos \theta_p(t) - F_{np}(t) \sin \theta_p(t) \right]$$

$$F_{tp}(t) = K_t b w_p(t)^\kappa$$

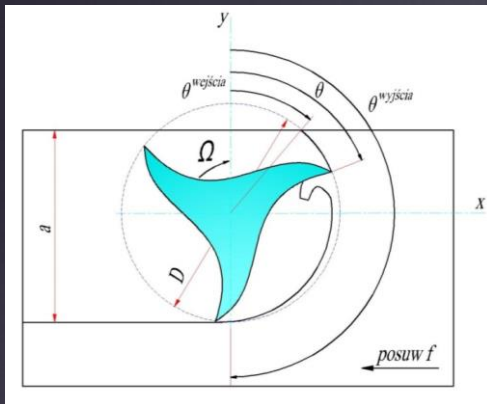
$$F_{np}(t) = K_n b w_p(t)^\kappa$$

$$w_p(t) = \left[f + (x_1(t) - x_2(t)) - (x_1(t - \tau) - x_2(t - \tau)) - f_1 \cos(\lambda t) \right] \sin \theta_p(t)$$

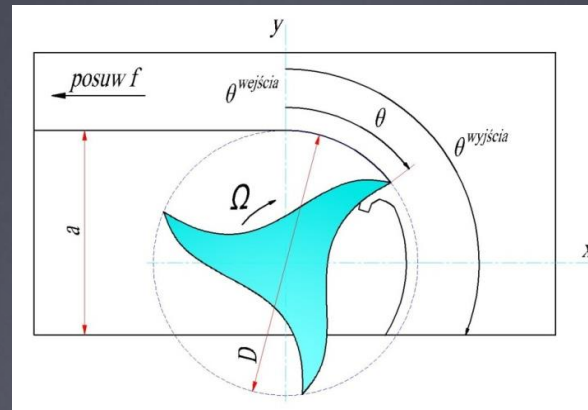
MODELOWANIE PROCESU FREZOWANIA



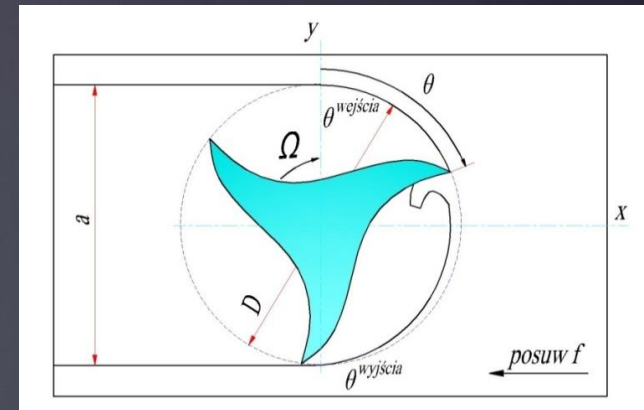
Frezowanie współbieżne



Frezowanie przeciwbieżne



Frezowanie pełne



$$\theta^{\text{wejścia}} = \arccos\left(\frac{2 \cdot a}{D} - 1\right)$$

$$\theta^{\text{wyjścia}} = \pi$$

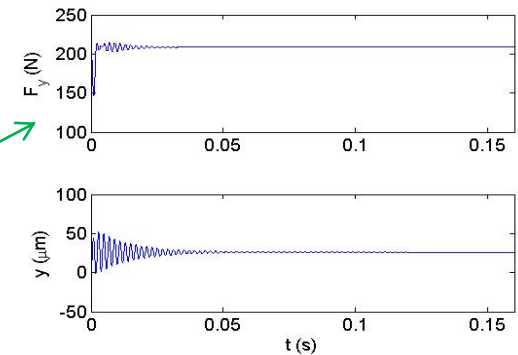
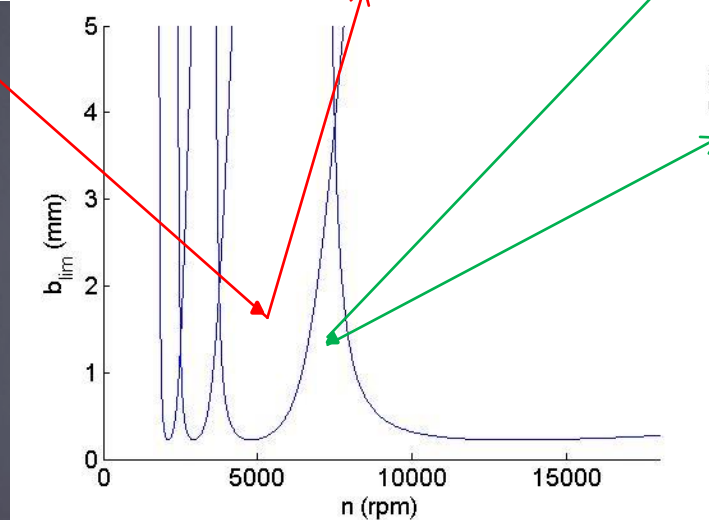
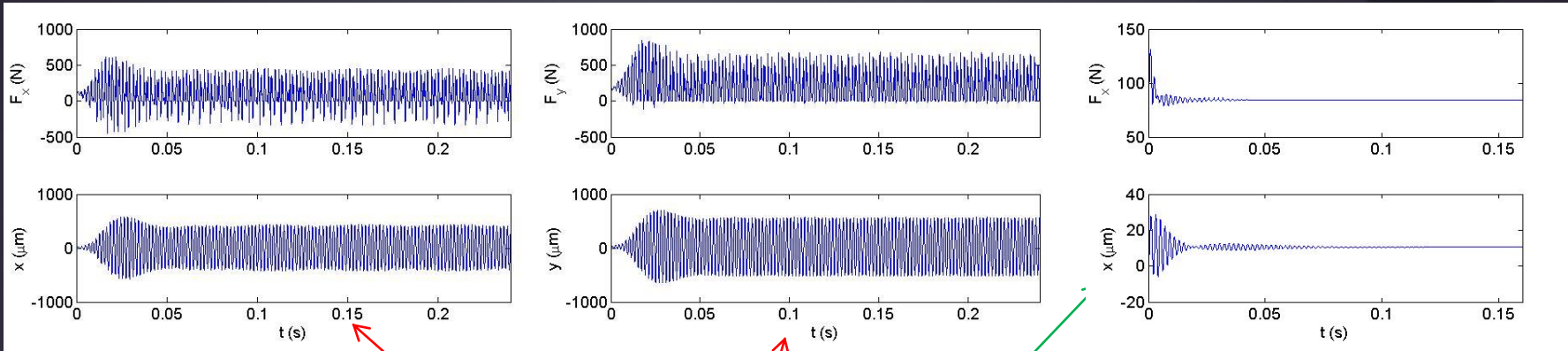
$$\theta^{\text{wejścia}} = 0$$

$$\theta^{\text{wyjścia}} = \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot a}{D}\right)$$

$$\theta^{\text{wejścia}} = 0$$

$$\theta^{\text{wyjścia}} = \pi$$

STABILNOŚĆ PROCESU FREZOWANIA

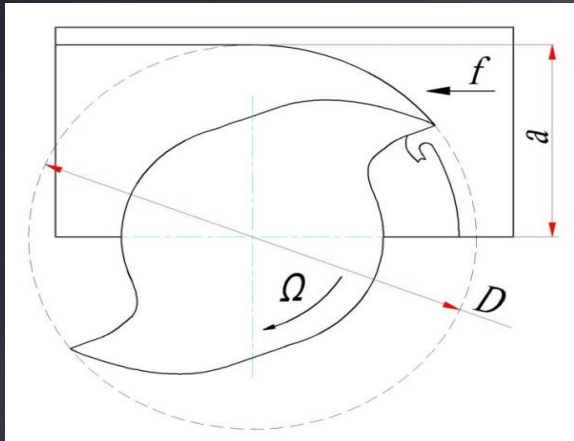


Parametry	
Opór skrawania	$K_t=690$ [MPa] $K_n=280$ [MPa]
Parametry dynamiczne	$k_x=k_y=8$ [MN/m] $c_x=c_y=102$ [Ns/m]
Parametry skrawania	$N=4$ [-] $D=20$ [mm] $f_t=0.1$ [mm/ostrze] $a=20$ [mm]

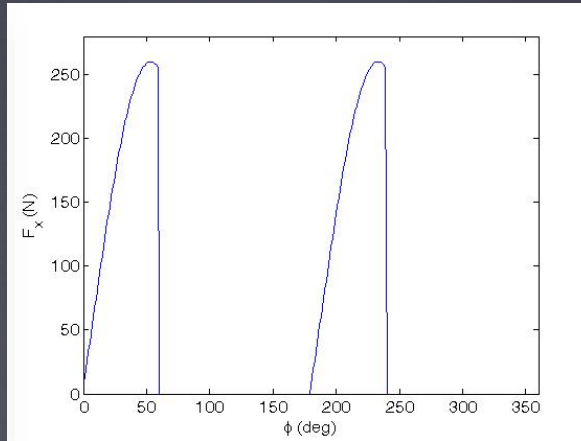
WPŁYW SZEROKOŚCI SKRAWANIA



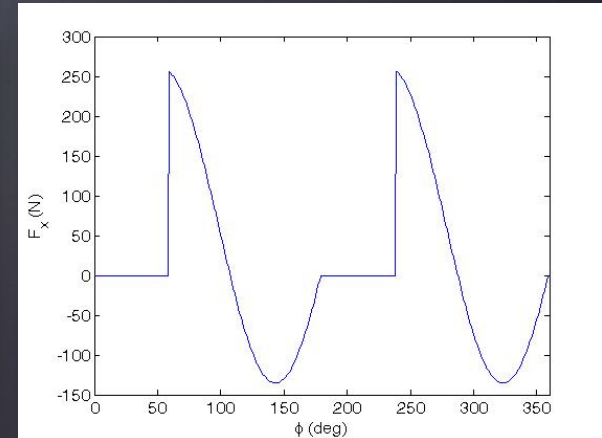
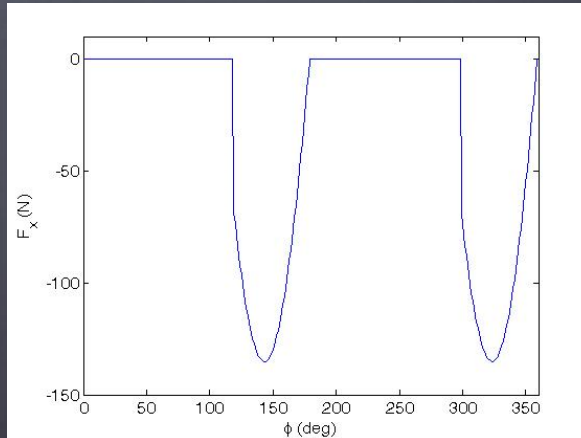
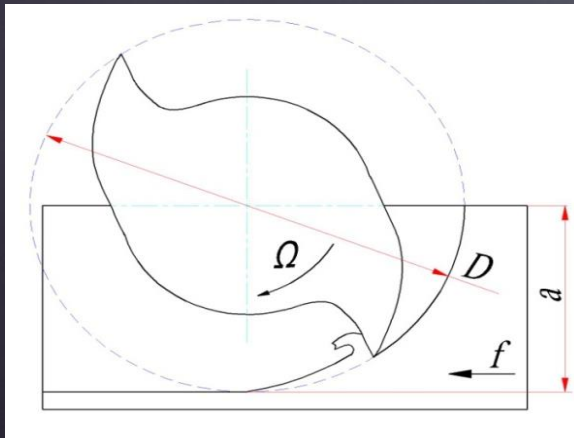
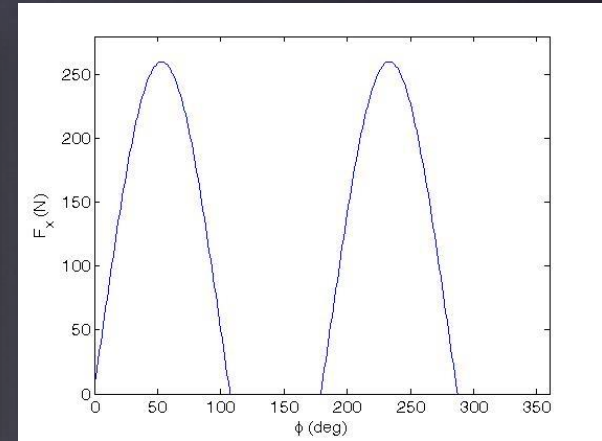
Frez 2 ostrza



$a/D=0,25$



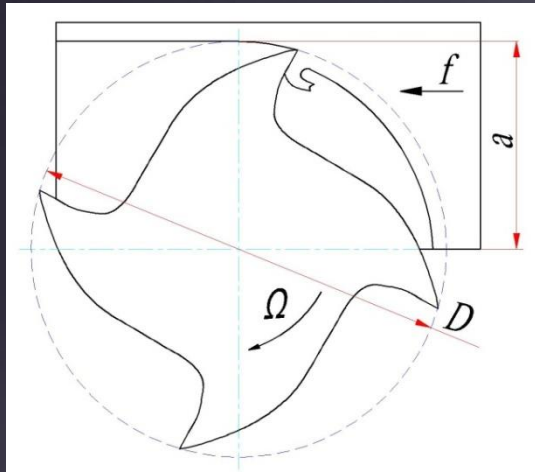
$a/D=0,75$



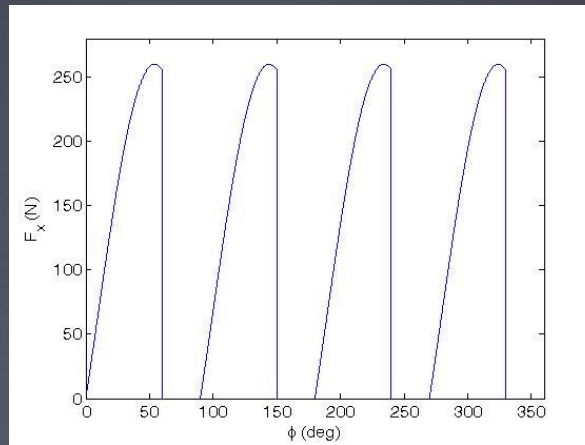
WPŁYW SZEROKOŚCI SKRAWANIA



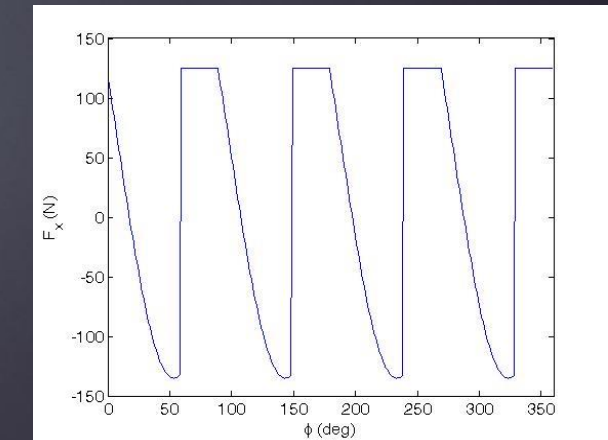
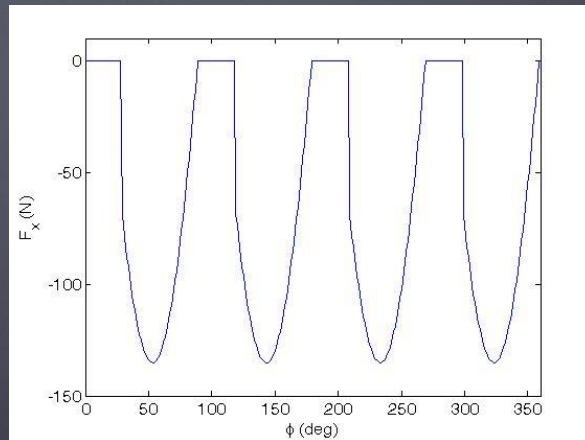
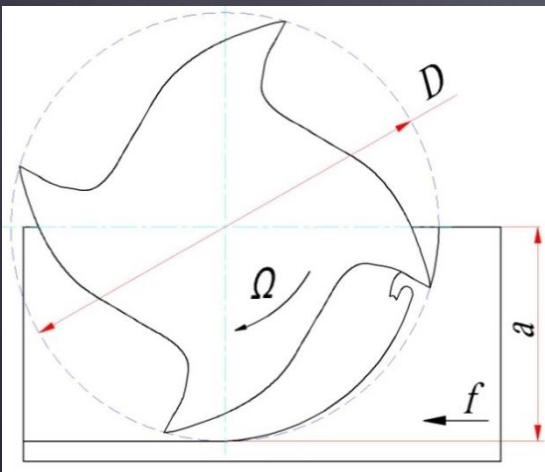
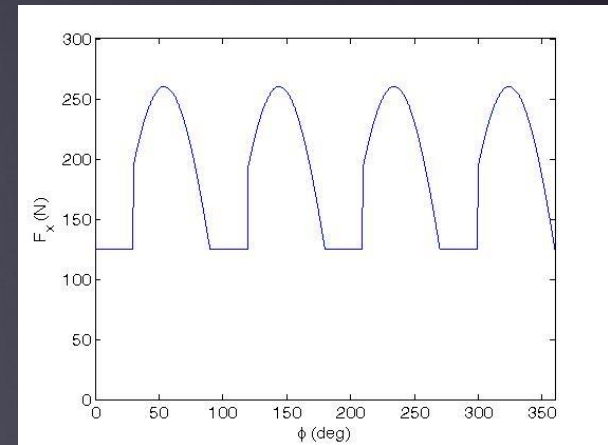
Frez 4 ostrza



$a/D=0,25$



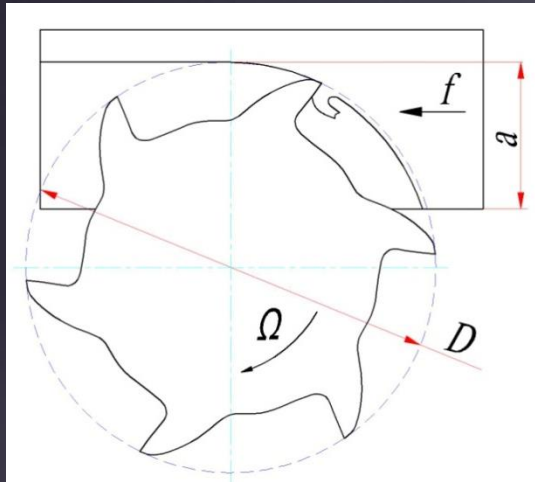
$a/D=0,75$



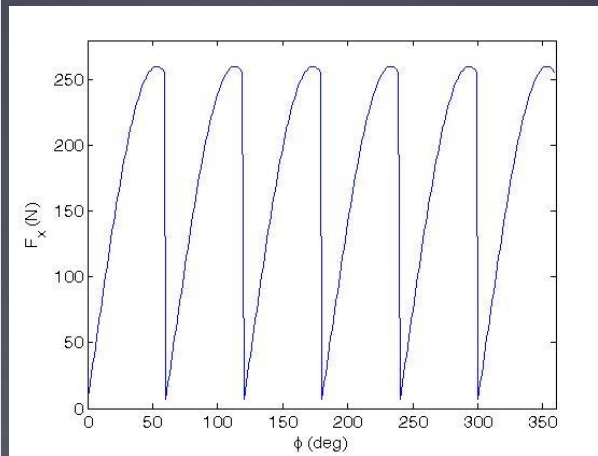
WPŁYW SZEROKOŚCI SKRAWANIA



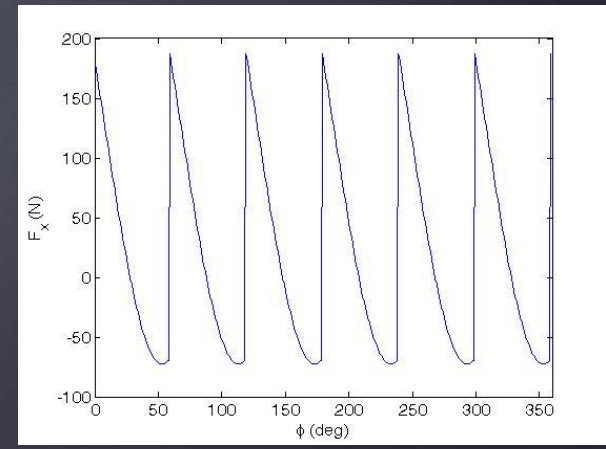
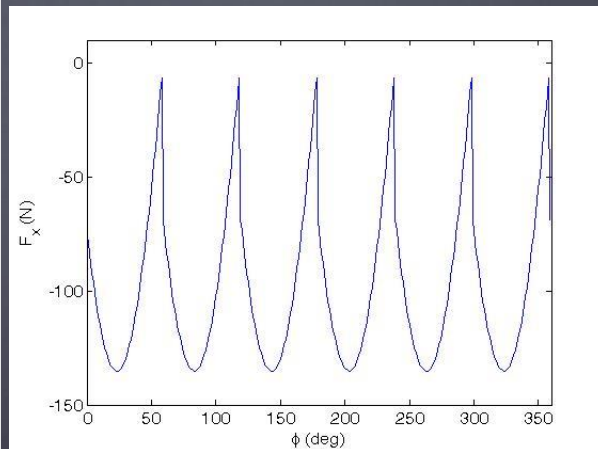
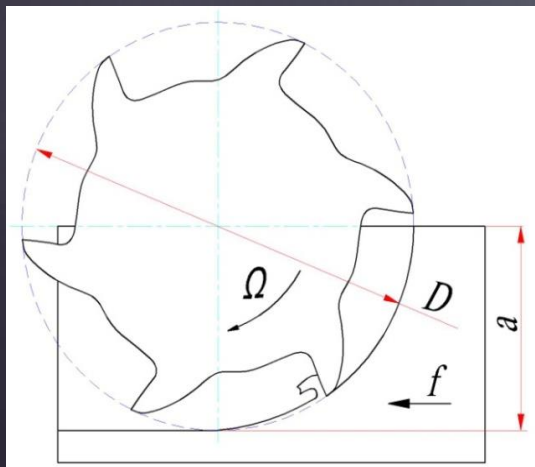
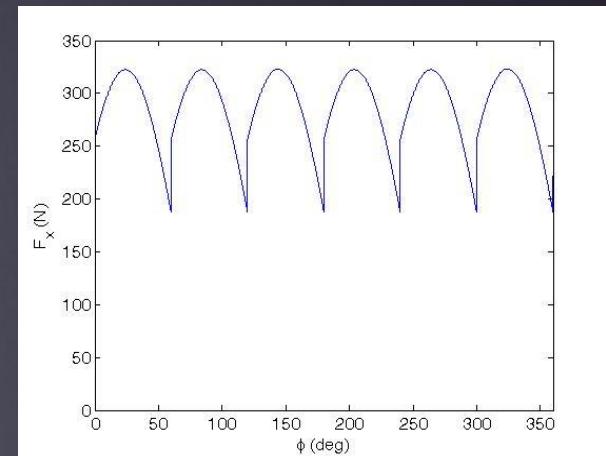
Frez 46 ostrza



$a/D=0,25$



$a/D=0,75$



NIELINIOWY MODEL FREZOWANIA



Nieliniowy model frezowania o jednym stopniu swobody

$$x''(t) + 2 \cdot \zeta_x \cdot \omega_n \cdot x'(t) + \omega_n^2 \cdot x(t) = \frac{1}{m_x} \sum_{i=1}^z F_p(t)$$

$$F_p(t) = -b \cdot K_t \cdot g_p(t) \cdot \left[\cos \theta_p(t) + \tan \gamma \cdot \sin \theta_p(t) \right] \cdot \left[w_p(t) \right]^q$$

$$w_p(t) = f \cdot \sin \theta_p(t)$$

lub

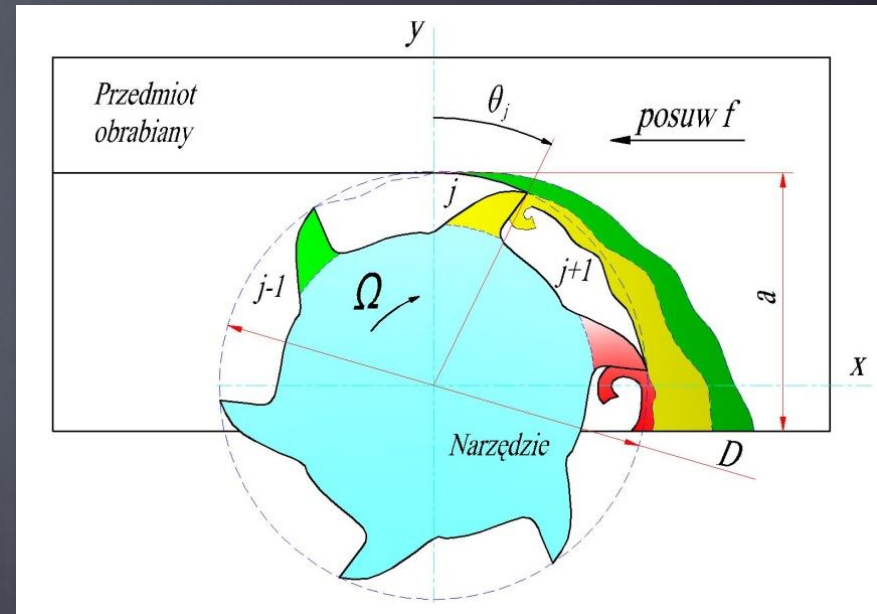
$$w_p(t) = f \cdot \sin \theta_p(t) + [x(t) - x(t - \tau)] \cdot \sin \theta_p(t)$$

$$q = 1$$

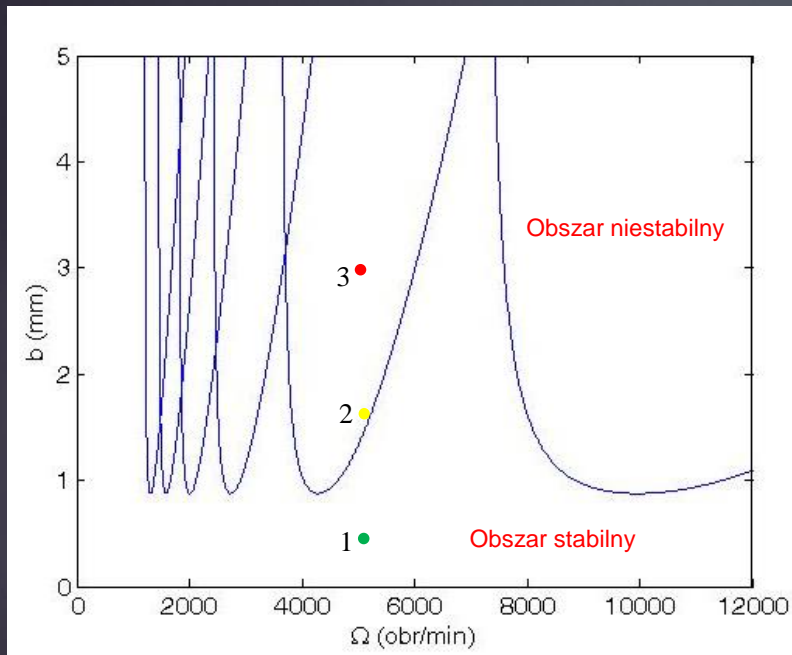
Model liniowy

$$q = 0,75$$

Model nieliniowy



NIELINIOWY MODEL FREZOWANIA

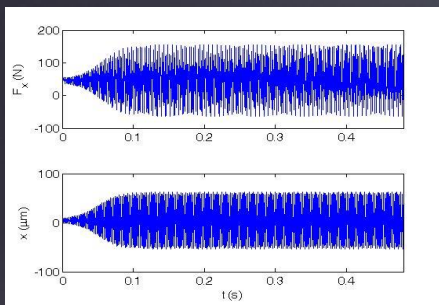


Parametry	
Opór skrawania	$K_t=4000$ [MPa] $K_n=1600$ [MPa]
Parametry układu	$k_x=k_y=10$ [MN/m] $\omega_x=\omega_y=480$ [rad/s] $\xi_x=\xi_y=0,05$ [-]
Parametry skrawania	$N=4$ [-] $D=20$ [mm] $f_t=0.1$ [mm/ostrze] $a=20$ [mm]

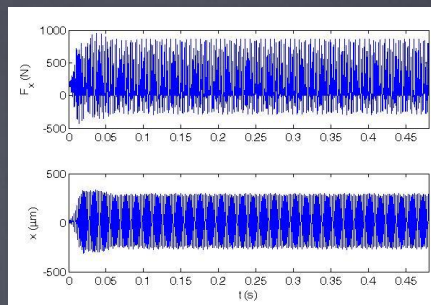
NIELINIOWY MODEL FREZOWANIA



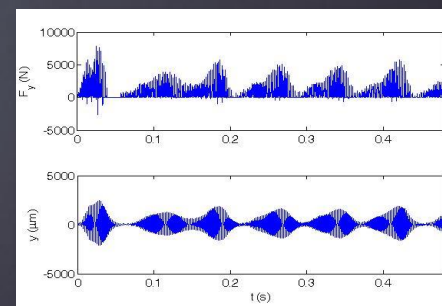
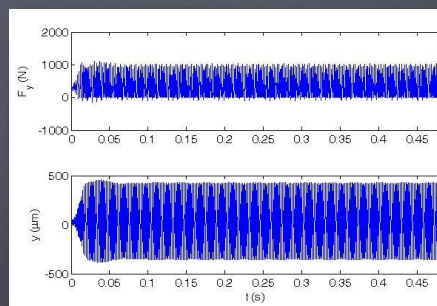
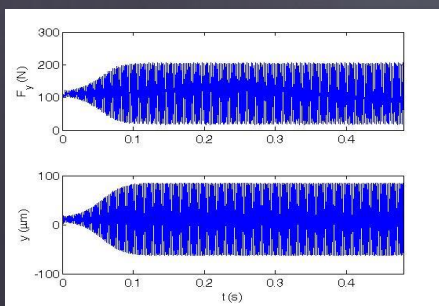
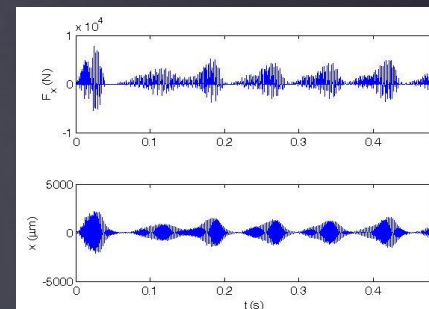
1 (0,5 mm; 5000 obr/min)



2 (1,5 mm; 5000 obr/min)



3 (3,0 mm; 5000 obr/min)

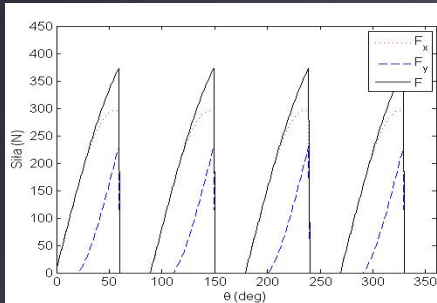


PRZEBIEGI SIŁ FREZOWANIA

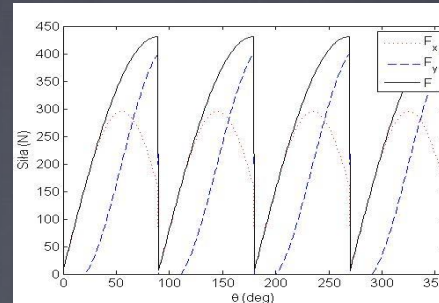


Frezowanie przeciwbieżne

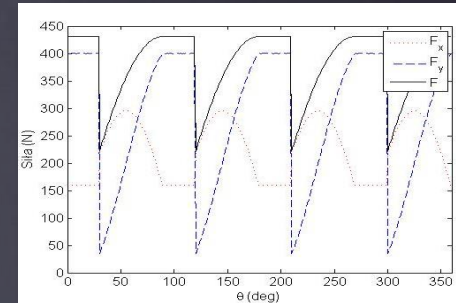
$a/D=0,25$



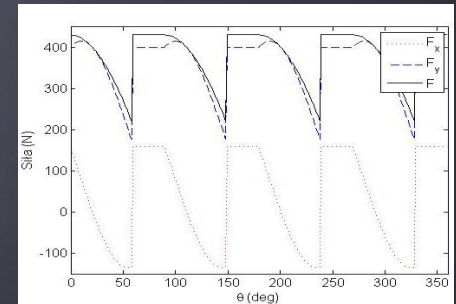
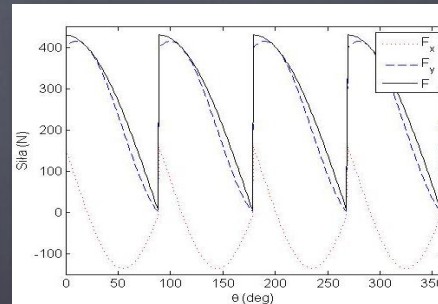
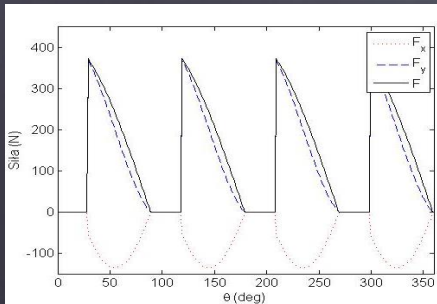
$a/D=0,50$



$a/D=0,75$



Frezowanie współbieżne



METODY ELIMINACJI DRGAŃ W OBRÓBCE SKRAWANIEM

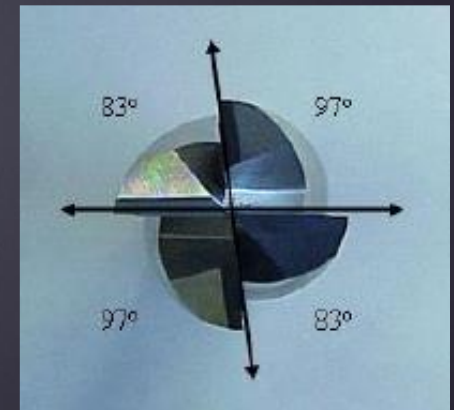


Metody aktywne:

- Sterowanie chwilowym położeniem narzędzia względem przedmiotu obrabianego,
- Skrawanie wibracyjne,
- Aktywne tłumienie drgań,
- Modulacja prędkości obrotowej.

Metody pasywne:

- Zmiana struktury obrabiarki,
- Selektywny dobór parametrów obróbki,
- Wyłączenie posuwu w momencie wystąpienia drgań,
- Stosowanie niesymetrycznych narzędzi.

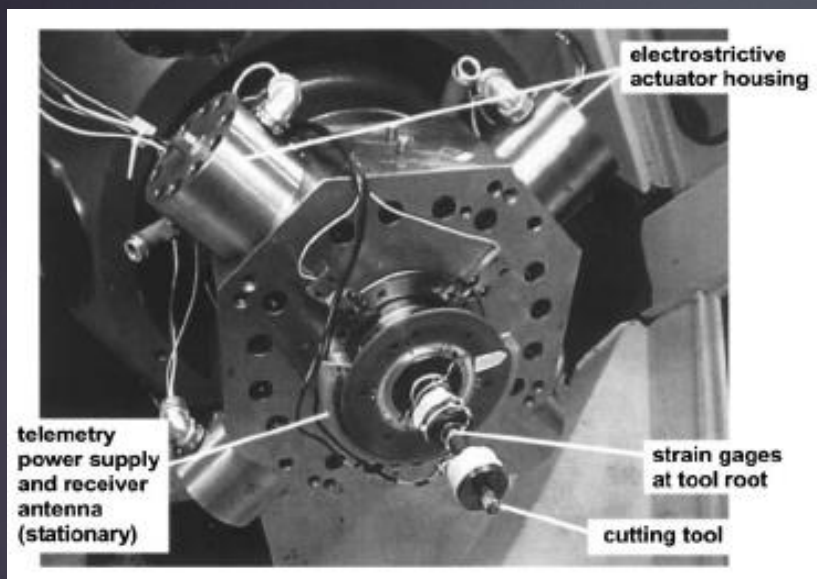


Źródło: www.sandvik.pl

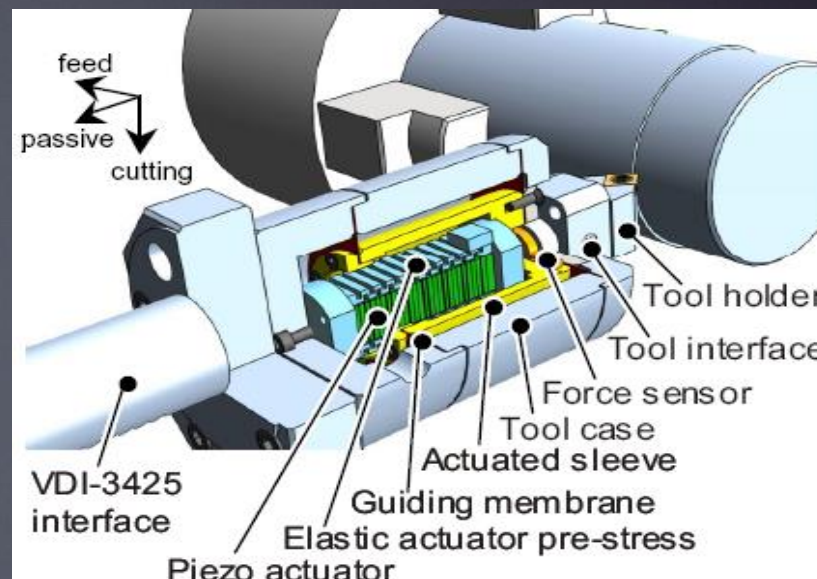
PRZYKŁADY AKTYWNEJ ELIMINACJI DRGAŃ



Konstrukcja wrzeciona obrabiarki



Konstrukcja imaka narzędziowego



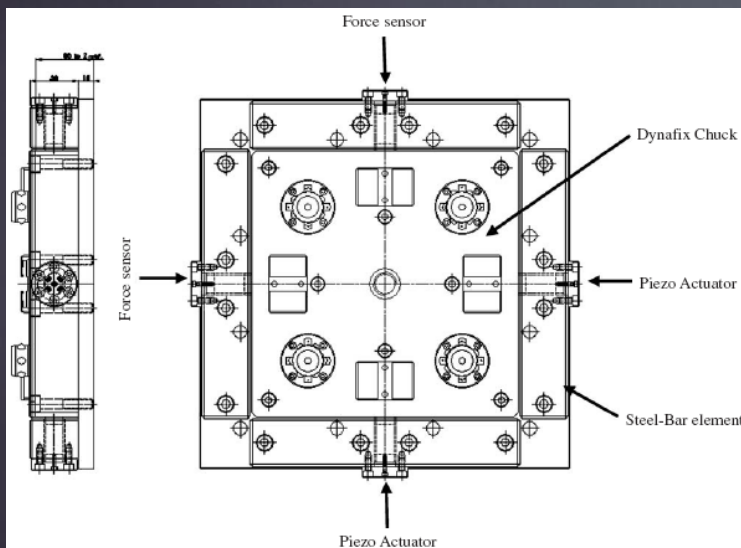
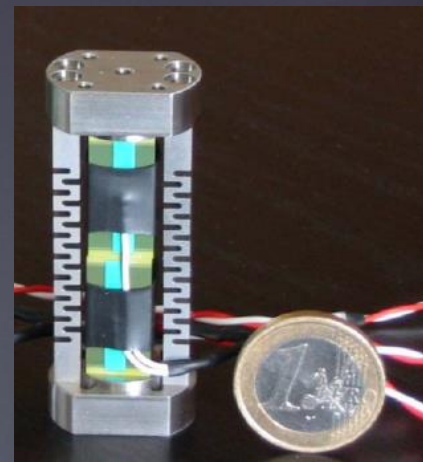
Źródło: J. Dohner, J. Lauffer, T. Hinnerichs, N. Shankar, M. Regelbrugge, C. Kwan, „Mitigation of chatter instabilities in milling by active structural control”, *Journal of Sound and Vibration*, 269, 197-211, 2004.

Źródło: A. Harms, B. Denkena, N. Lhermet, “Tool Adaptor for Active Vibration Control in Turning Operations”, 9th International Conference on New Actuators, ACTUATOR 2004, 14-16 June 2004, Bremen, Germany.

PRZYKŁADY AKTYWNEJ ELIMINACJI DRGAŃ



Konstrukcja aktywnego mocowania przedmiotu obrabianego



References	Unit	PPA40L
Displacement	(μm)	40
Blocked force	(N)	3500
Stiffness	(N/ μm)	87.5
Resonance frequency (blocked-free)	(Hz)	7750
Response time (blocked-free)	(ms)	0.06
Voltage range	(V)	-20..150
Capacitance	(μF)	13.3
Height (in actuation direction)	(mm)	57.0
Base length	(mm)	23.5
Base width	(mm)	18.0
Mass	(g)	92.0

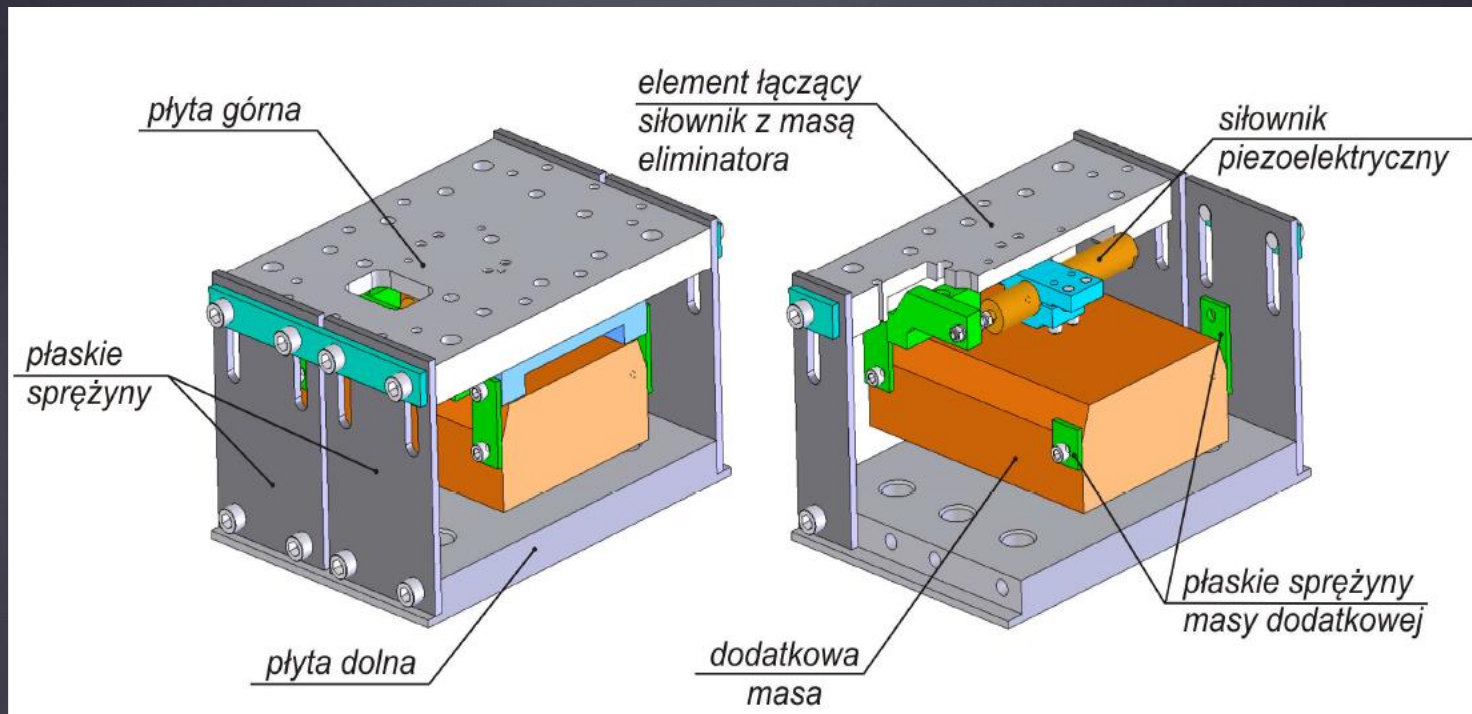
Źródło: A. Rashid, C. Nicolescu, „Active vibration control in palletised workholding system for milling”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46, 1626-1636, 2006.

Źródło: www.cedrat.com

PRZYKŁADY AKTYWNEJ ELIMINACJI DRGAŃ

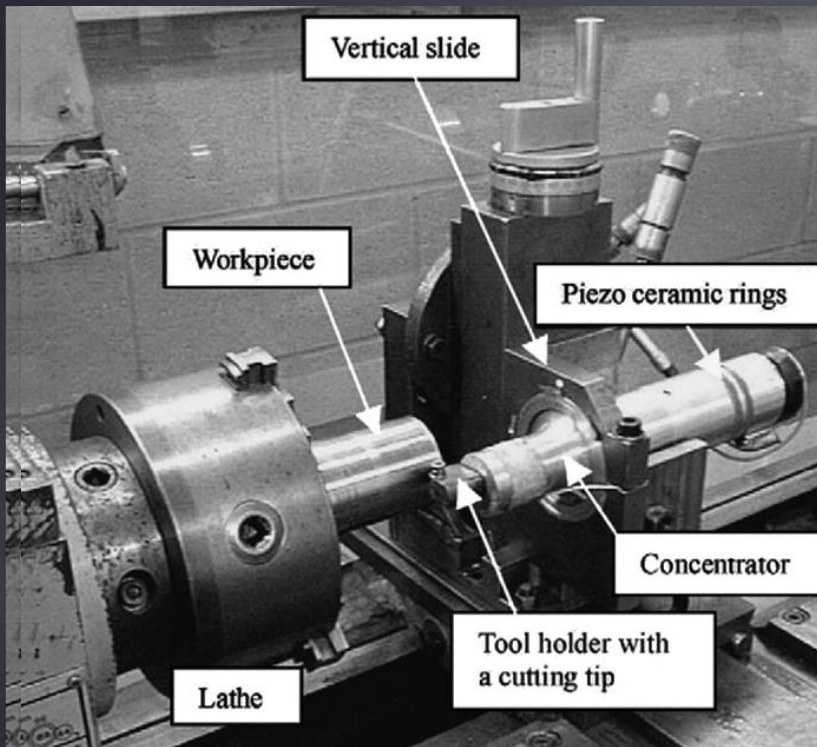


Konstrukcja aktywnego mocowania przedmiotu obrabianego

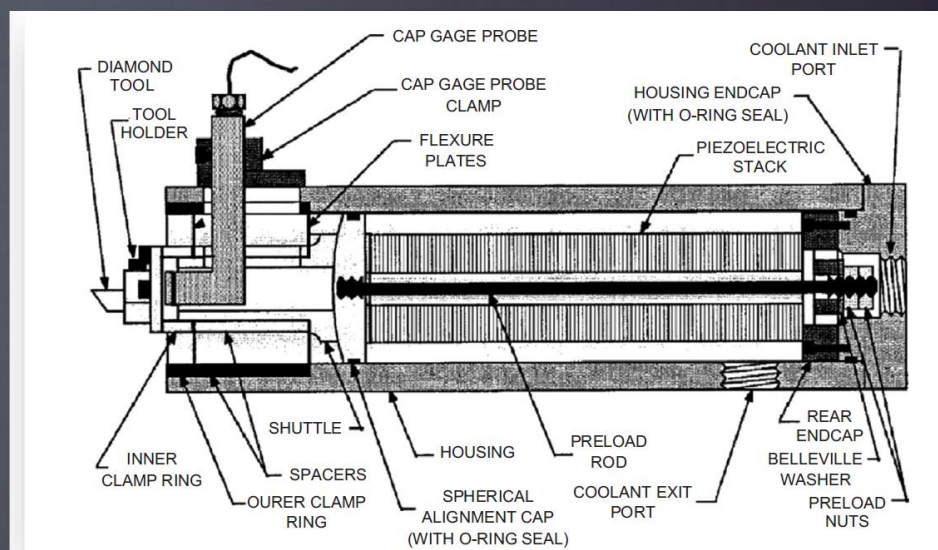


Źródło: A. Parus, M. Hoffmann, A. Bodnar, „Zastosowanie aktywnych układów eliminacji drgań w procesie skrawania”, *Inżynieria maszyn*, r. 16, z. 1-2, 2011.

PRZYKŁADY AKTYWNEJ ELIMINACJI DRGAŃ



Konstrukcja imaka narzędziowego

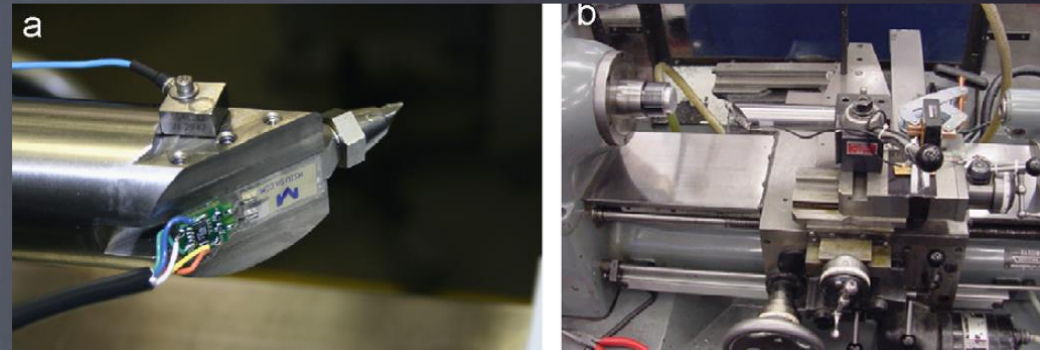
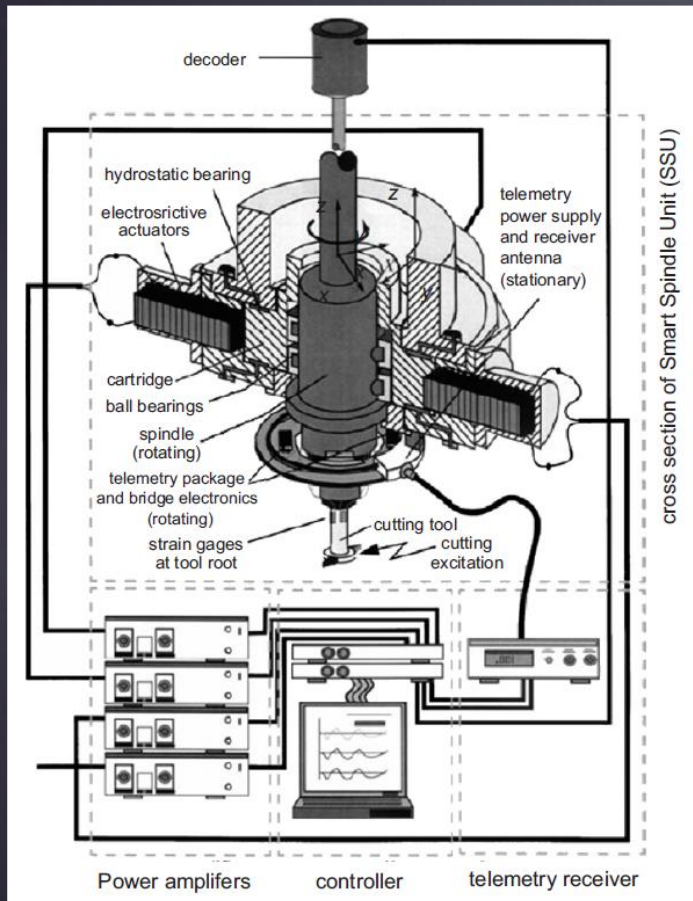


Źródło: G. Park and all, „The use of active materials for machining processes: A review”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 2189–2206.

PRZYKŁADY AKTYWNEJ ELIMINACJI DRGAŃ



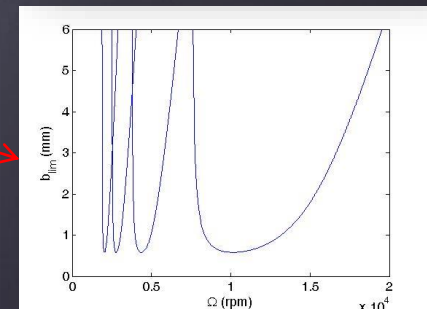
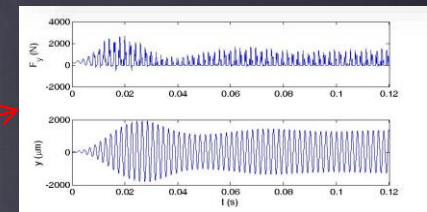
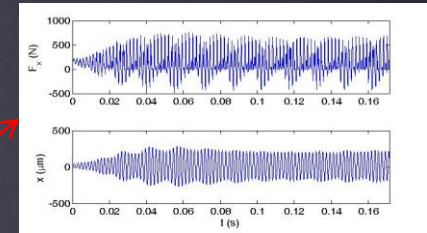
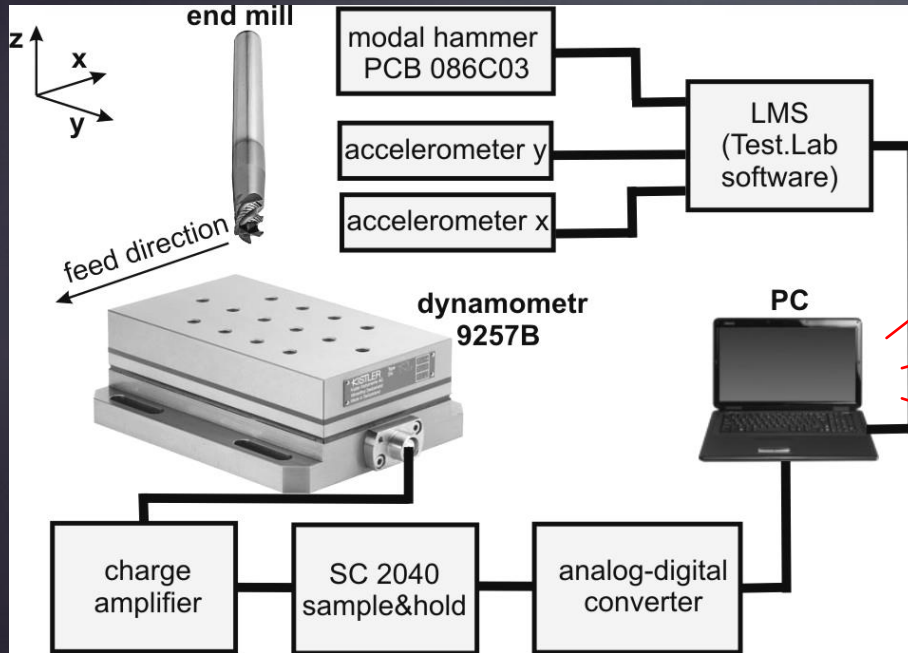
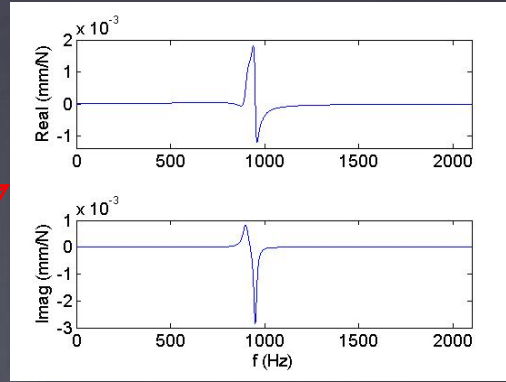
Konstrukcja wrzeciona obrabiarki



Konstrukcja imaka narzędziowego

Źródło: G. Park and all, „The use of active materials for machining processes: A review”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 2189–2206.

TESTY LABORATORYJNE



TESTY LABORATORYJNE



Przestrzeń robocza obrabiarki



Narzędzie

Siłomierz
piezoelektryczny
Kistler 9257B

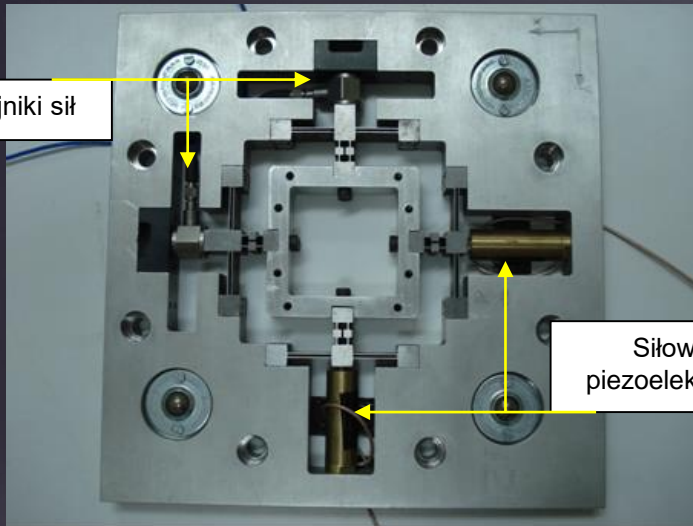
Elektrowrzeciono

Przedmiot obrabiany

Układ wzбудnika
piezoelektrycznego

Stół roboczy
obrabianki

TESTY LABORATORYJNE



Czujniki sił

Siłowniki piezoelektryczne

Układ wykonawczy

Tor pomiarowy

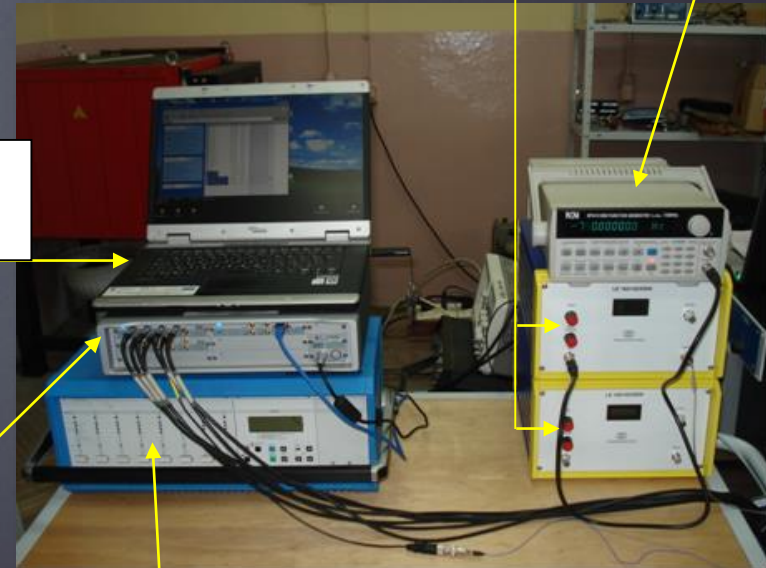
Wzmacniacze sygnału wymuszającego

Generator sygnału

Komputer do akwizycji danych pomiarowych

Analizator pomiarowy (LMS Mobile Scadas)

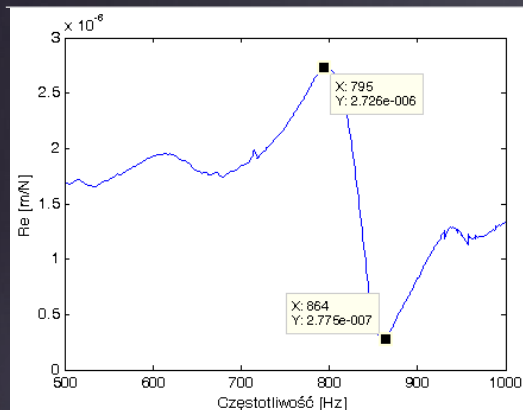
Wzmacniacz



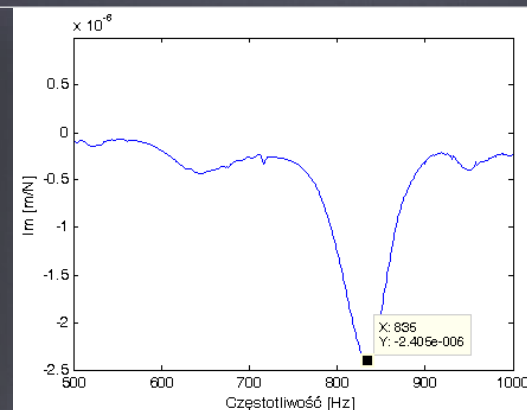
ANALIZA MODALNA



a)

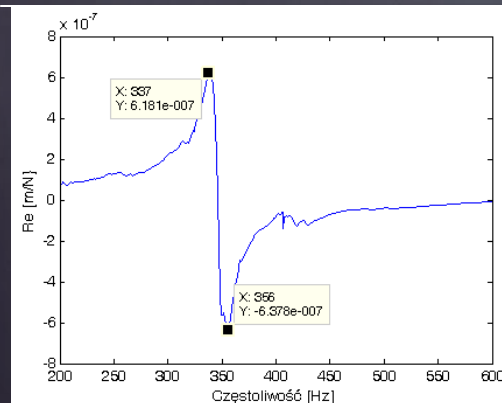


b)

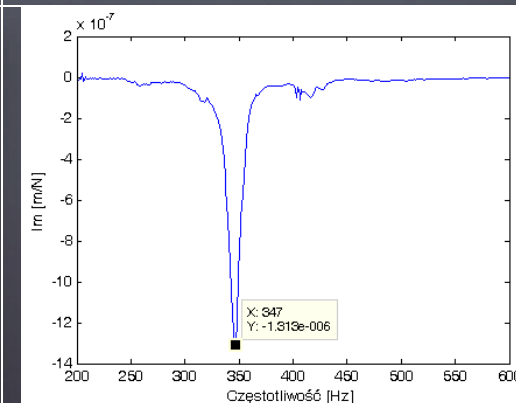


Funkcje przejścia otrzymane na podstawie analizy modalnej dla narzędzia na kierunku x w postaci:
a) części rzeczywistej,
b) części urojonej.

a)



b)

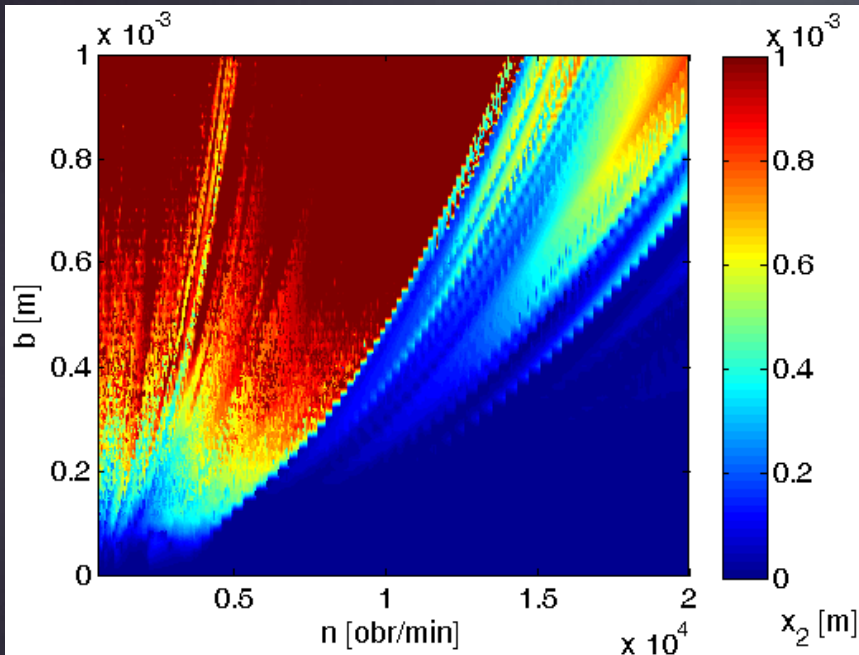


Funkcje przejścia otrzymane na podstawie analizy modalnej dla materiału obrabianego na kierunku x w postaci:
a) części rzeczywistej,
b) części urojonej.

WYNIKI BADAŃ



Wykres stabilności dla nieliniowego modelu frezowania.



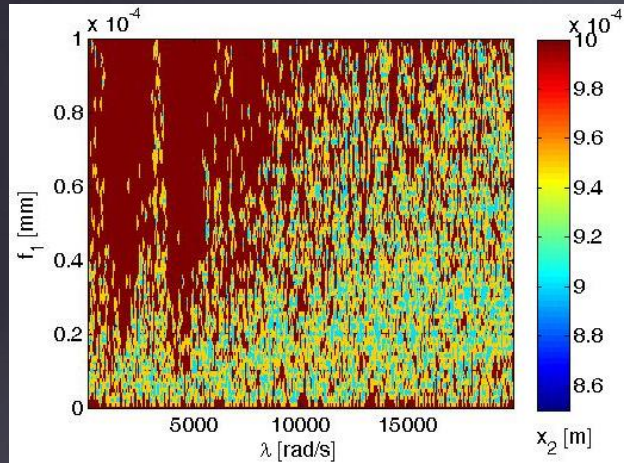
Parametry modelu frezowania o dwóch stopniach swobody.

Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
m_1	0.1824 [kg]	K_n	160 [MPa]
ω_{n1}	835 [Hz]	K_t	450 [MPa]
ζ_1	0.0413 [-]	f	0.01 [mm/ostize]
γ_1	2e12 [N/m ³]	a	10 [mm]
m_2	2.96 [kg]	D	10 [mm]
ω_{n2}	347 [Hz]	z	4 [-]
ζ_2	0.0274 [-]		
γ_2	2e12 [N/m ³]		

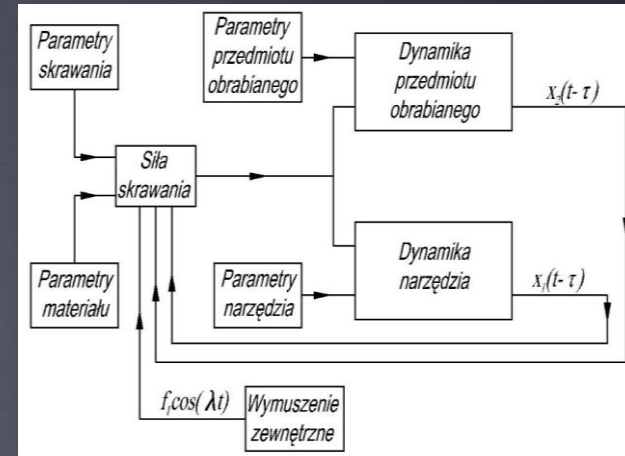
WYNIKI BADAŃ



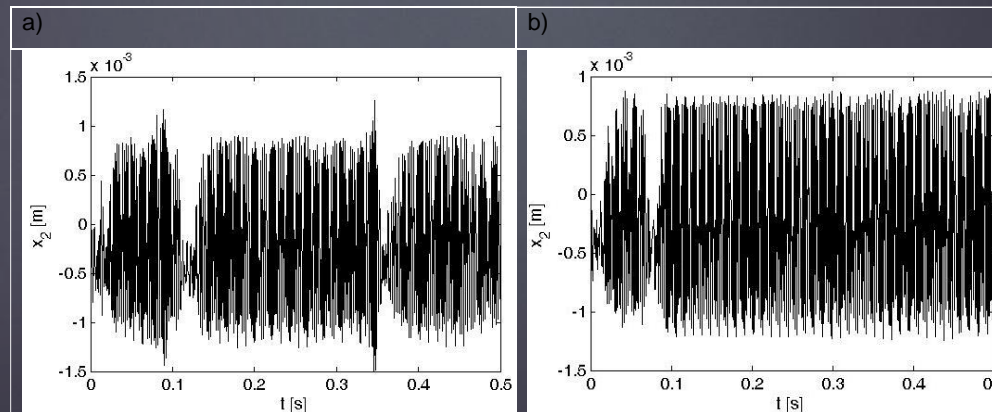
Wpływ parametrów wymuszenia zewnętrznego na amplitudę drgań dla $b=0,6 \text{ mm}$, $n=7000 \text{ obr/min}$.



Schemat procesu frezowania ze sterowaniem w torze otwartym



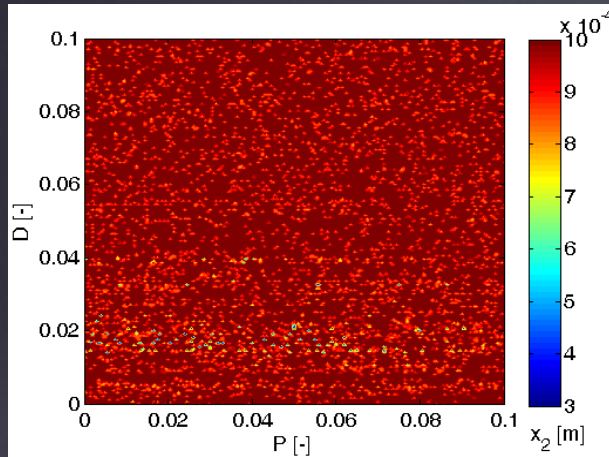
Przebieg czasowy dla $b=0,6 \text{ mm}$, $n=7000 \text{ obr/min}$; a) bez wymuszenia, b) z wymuszeniem $f_1=0,008 \text{ mm}$, $\lambda=3093 \text{ rad/s}$.



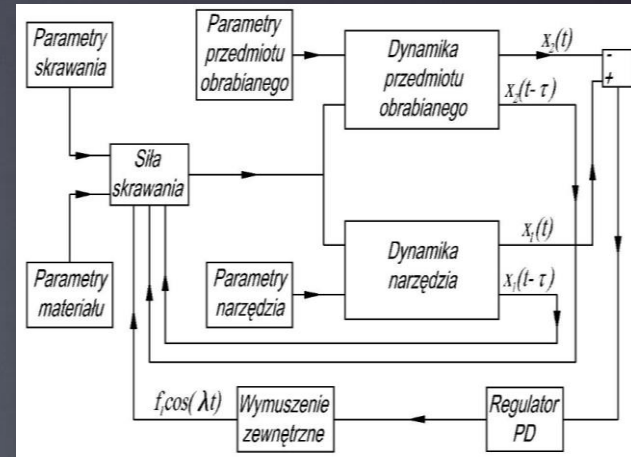
WYNIKI BADAŃ



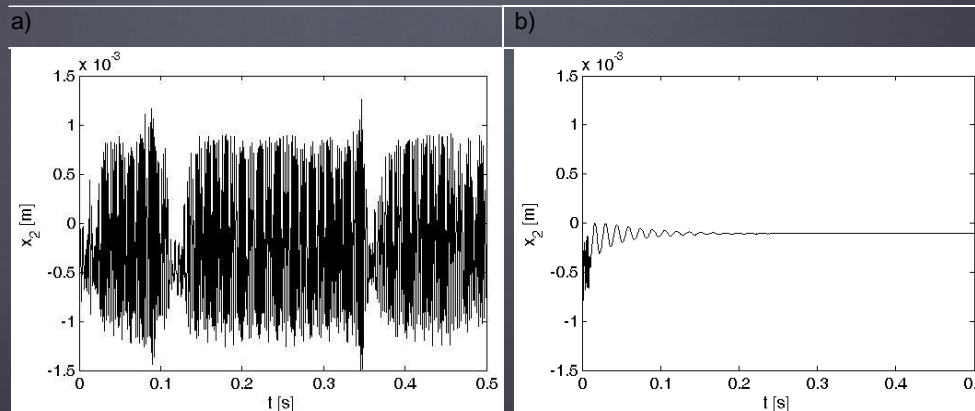
Wpływ nastaw regulatora PD na amplitudę drgań dla $b=0,6 \text{ mm}$, $n=7000 \text{ obr/min}$.



Schemat procesu frezowania ze sterowaniem w torze zamkniętym.



Przebieg czasowy dla $b=0,6 \text{ mm}$, $n=7000 \text{ obr/min}$; a) bez regulatora, b) z regulatorem PD; $P=0,0014$, $D=0,0017$.



PODSUMOWANIE I WNIOSKI



- Znajomość zagadnień związanych z przyczynami powstawania drgań samowzbudnych podczas obróbki skrawaniem jest szczególnie istotna w kontekście wzrostu wydajności procesu oraz obniżenia jego kosztów.
- Wyniki analiz teoretycznych oraz badań numerycznych i doświadczalnych potwierdziły możliwość aktywnej eliminacji drgań podczas procesu frezowania.
- Wykazano, że odpowiedni dobór amplitudy oraz częstości wymuszenia zewnętrznego może skutecznie zredukować poziom niekorzystnych drgań.
- Ze względu na złożoność procesu frezowania konieczne jest zastosowanie algorytmu sterowania w torze zamkniętym. Dzięki któremu możliwy jest odpowiedni dobór parametrów wymuszenia w trakcie obróbki.

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

DRGANIA W PROCESIE SKRAWANIA

POLITECHNIKA LUBELSKA
Katedra Mechaniki Stosowanej
dr inż. Andrzej Weremczuk

Projekt „ Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości”
– finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo
Nauki
i Szkolnictwa
Wyższego

