


# XVI Warsztaty Projektowania Mechatronicznego Kraków, 02 – 03 czerwca 2016



XVI WARSZTATY  
PROJEKTOWANIA  
MECHATRONICZNEGO

## ZMODYFIKOWANA METODA WYZNACZANIA OPTYMALNEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WRZECIONA PODCZAS FREZOWANIA PRZEDMIOTÓW PODATNYCH

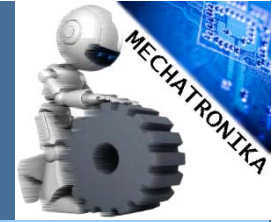
*Krzysztof J. KALIŃSKI*



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

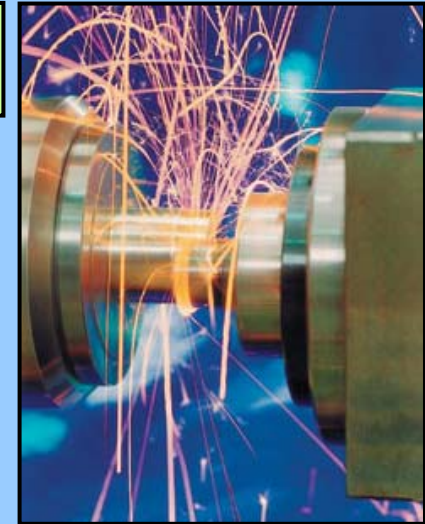
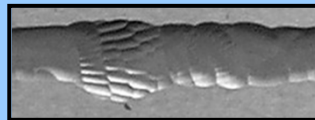
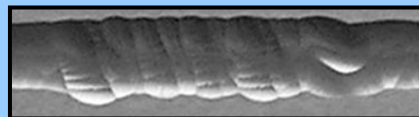
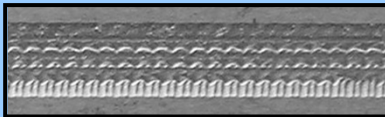




## Rosnące wymagania w zakresie frezowania przedmiotów podatnych

- Złożona geometria wyrobu – łopatki turbin, małe złożone geometrycznie części, ...
- Frezowanie smukłymi narzędziami
- Frezowanie z dużymi prędkościami skrawania - do kilku lub kilkunastu tysięcy m/min
- Frezowanie z dużą prędkością posuwu
- Małe głębokości skrawania i grubości warstwy skrawanej
- Obróbka „na gotowo” (jakość powierzchni i precyzja wykonania)

Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni frezowanego przedmiotu po wystąpieniu niekorzystnych zjawisk (w tym drgań samowzbudnych „chatter”)





związane z oddziaływaniem poprzez prędkość obrotową

- Zwiększanie prędkości skrawania
- Regulacja prędkości obrotowej wrzeciona z dopasowaniem do częstotliwości drgań własnych układu
- Regulacja prędkości obrotowej wrzeciona z dopasowaniem do optymalnego kąta przesunięcia fazowego w kolejnych przejściach narzędzia ←
- Sterowanie pulsacją prędkości obrotowej wrzeciona
- Sterowanie optymalne prędkością obrotową wrzeciona
- Sterowanie programowe prędkością obrotową wrzeciona

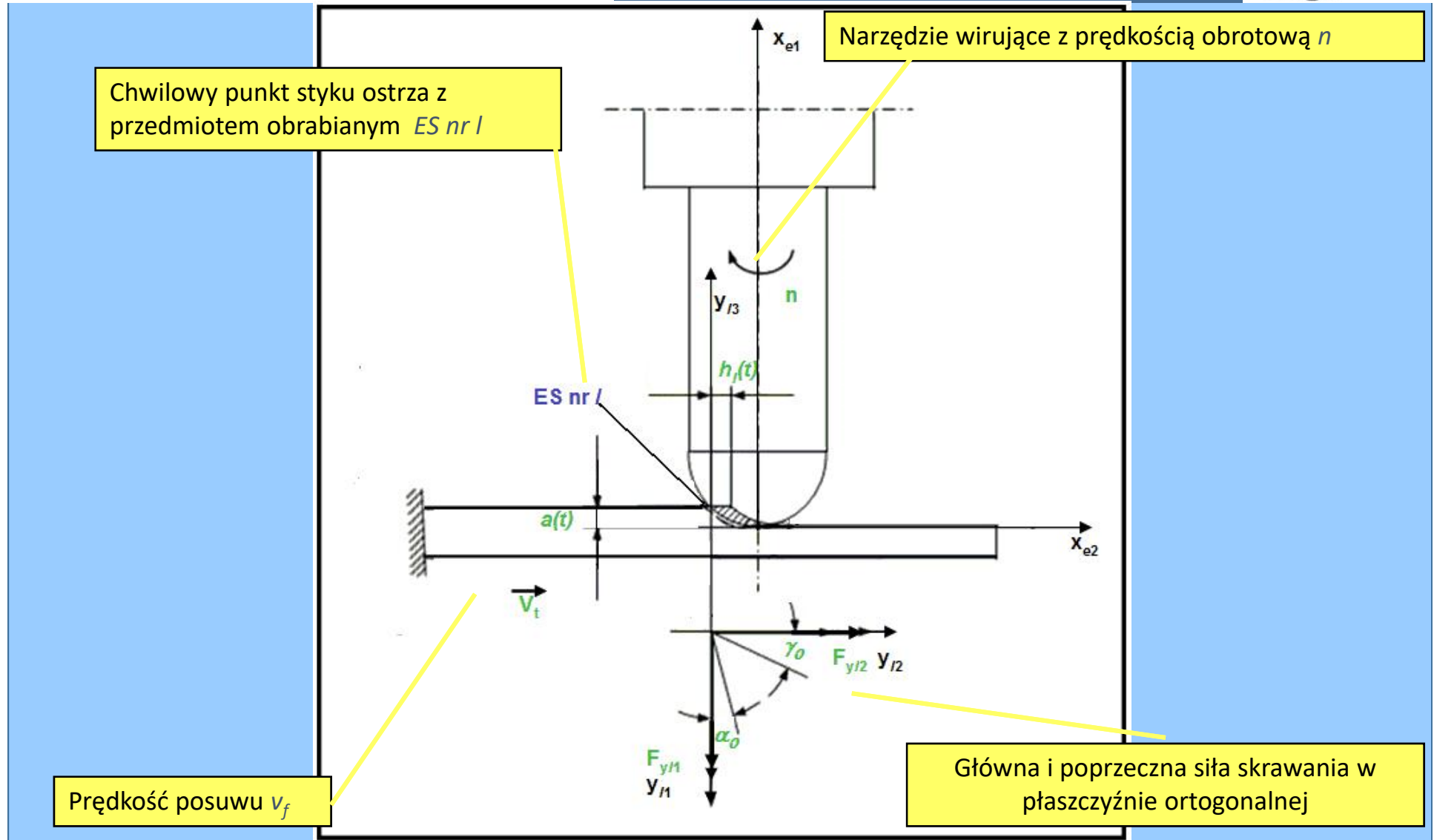
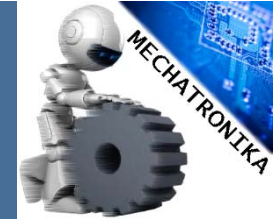
**Rezultaty**  
**nie zawsze zadowalające** ←



- Określenie optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona
  - Prędkość optymalna – prędkość, przy której poziom drgań przedmiotu obrabianego jest najmniejszy
- Na częstotliwość i amplitudę drgań mają wpływ własności dynamiczne obrabianego przedmiotu
  - W różnych obszarach przedmiotu mogą dominować inne postacie drgań
  - Konieczne jest określenie „mapy” opisującej prędkość optymalną dla każdego punktu przedmiotu



# Dynamika skrawania frezem kulistym





Dynamiczny opór skrawania  
powierzchniowy właściwy

Zmienna w czasie głębokość skrawania

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

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

Współczynnik siły skrawania

Zmienna w czasie grubość warstwy  
skrawanej



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

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

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

$f_\alpha$  – częstotliwość drgań własnych przedmiotu obrabianego [Hz],

$n_o$  – poszukiwana prędkość obrotowa wrzeciona [obr/min],

$z$  – liczba ostrzy narzędzia

Na optymalną prędkość obrotową **ma wpływ** efekt regeneracji śladu, będący jedną z przyczyn powstawania drgań samowzbudnych typu *chatter*



- Minimalizacja pracy sił skrawania na kierunku głębokości skrawania – kryterium **zmodyfikowane** (Kaliński 2016)



$$1a) \quad n < 60 \cdot f_{\alpha}, \quad n_o = 60 f_{\alpha} \cdot (0,25 + k), \quad k = 0,$$

$$1b) \quad n > 60 \cdot f_{\alpha}, \quad n_o = 60 f_{\alpha} \cdot (-0,25 + k), \quad k = 2, 3, \dots$$

**Dominacja drgań  
wymuszonych w  
procesie skrawania**

$$2a) \quad n < 120 \cdot f_{\alpha}, \quad n_o = 60 f_{\alpha} \cdot k, \quad k = 1 \quad \text{warunek sprzeczny}$$

$$2b) \quad n > 120 \cdot f_{\alpha}, \quad n_o = 60 f_{\alpha} \cdot (0,5 + k), \quad k = 2, 3, \dots$$

**Dominacja  
drgań  
swobodnych  
przedmiotu**

$f_{\alpha}$  – częstotliwość drgań własnych przedmiotu obrabianego [Hz],  
 $n_o$  – poszukiwana prędkość obrotowa wrzeciona [obr/min],

Optymalna prędkość obrotowa  $n_o$  **nie zależy** od liczby ostrzy z

Na optymalną prędkość obrotową **nie ma wpływu** efekt regeneracji śladu, będący jedną z przyczyn drgań samowzbudnych typu *chatter*







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

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

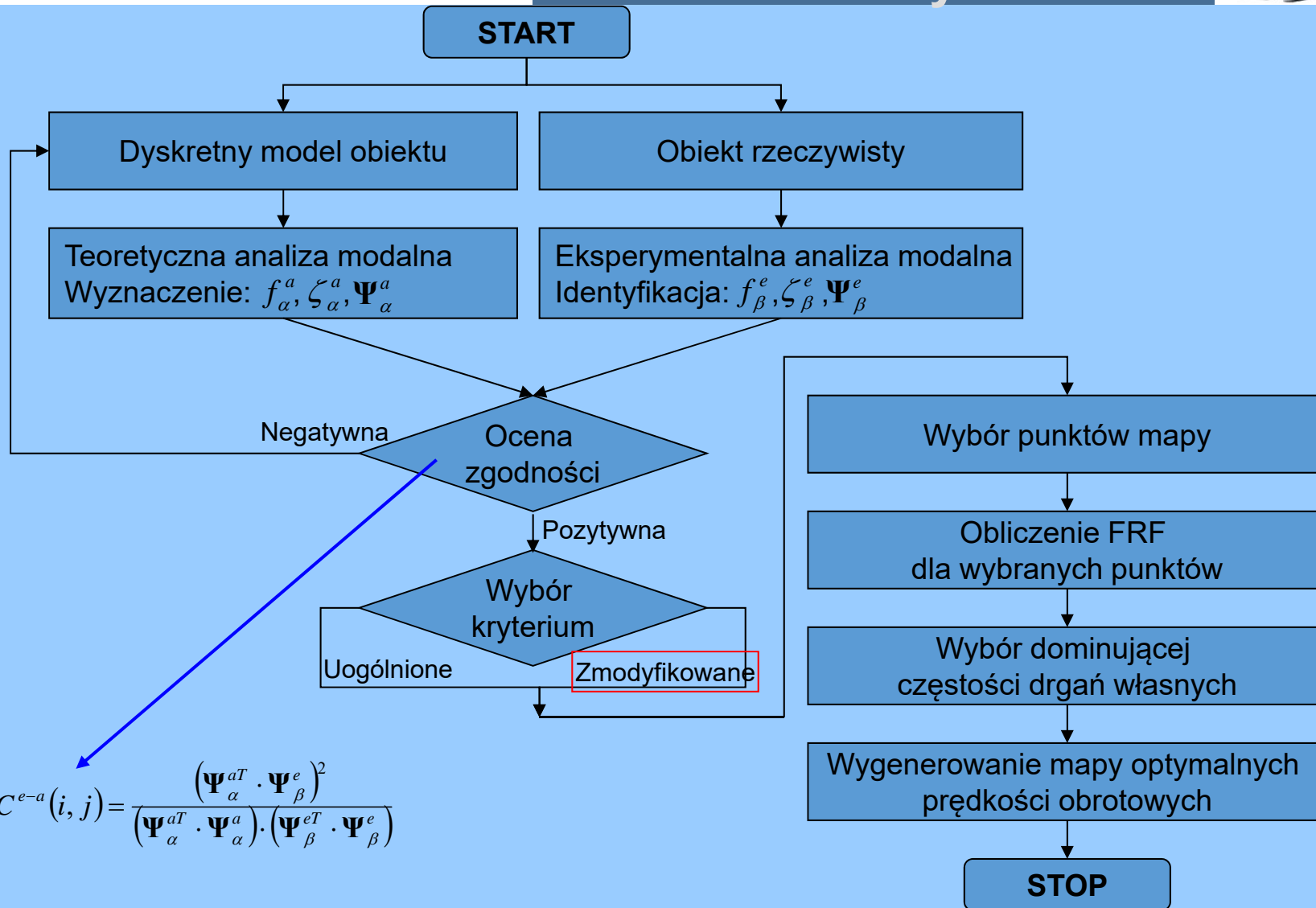
$$F_{yl3}(t) = \begin{cases} \mu'_l k_{dl} [a_p(t) + \Delta a_p(t)] [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)], & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0 \\ & \wedge a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0, \\ 0, & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0 \\ & \vee a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0. \end{cases}$$

Współczynnik siły skrawania





# Podstawowa mapa optymalnych prędkości obrotowych





## Przykład. Frezowanie próbki podatnej półwałcowej

- materiał: brąz CC331G (BA1032)
- wymiary: 150x100x5 mm
- frezarka: Deckel Maho DMU 50eVo Linear

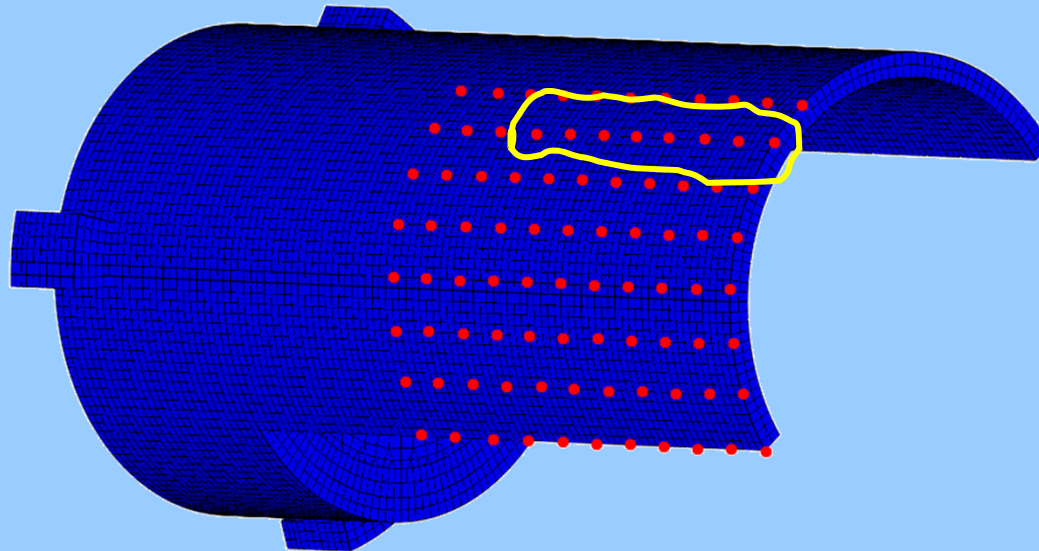


### **Cel:**

minimalizacja  
poziomu drgań  
narzędzie-przedmiot  
obrabiiany



- Wyznaczanie postaci drgań dominujących w wybranych punktach na powierzchni przedmiotu obrabianego



- Określenie prędkości optymalnej dla danej postaci drgań
- Określenie obszarów o stałej prędkości obrotowej wrzeciona



Fragment mapy optymalnych prędkości

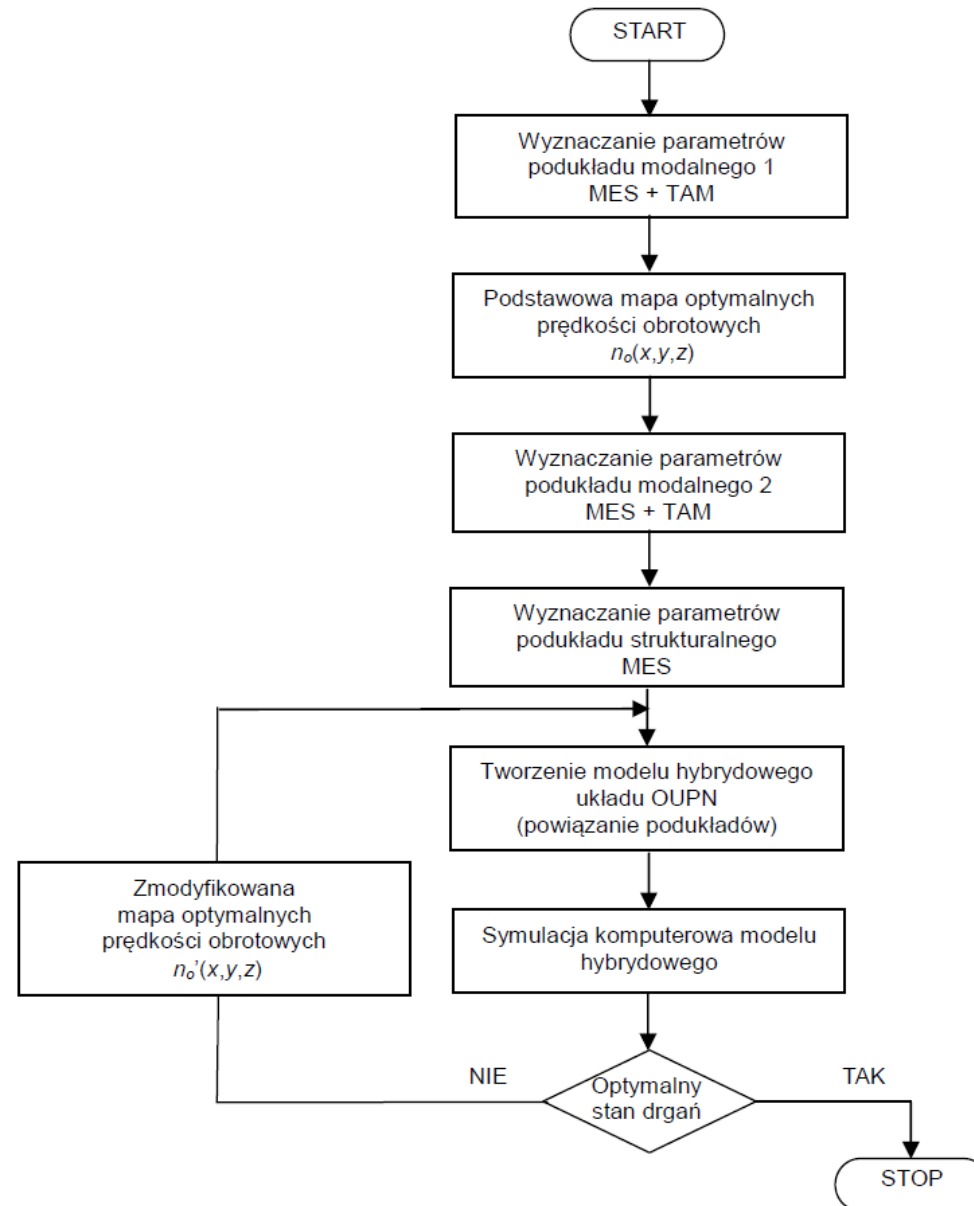
# Grid	X	Y	Z	Mapa_1	Mapa_2	Freq_1	Freq_2	Freq_3
71594	-0.000	-50.000	-0.000	11280	11280	846.00	728.00	436.00
71584	+10.820	-48.810	-0.000	11280	11280	846.00	436.00	728.00
71574	+21.130	-45.320	-0.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
71564	+30.440	-39.670	-0.000	10464	10464	436.00	728.00	846.00
71554	+38.300	-32.140	-0.000	10464	10464	436.00	728.00	846.00
71544	+44.350	-23.090	-0.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
71534	+48.300	-12.940	-0.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
71522	+50.000	-0.000	-0.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
70499	-0.000	-50.000	-10.000	11280	11280	846.00	728.00	435.80
70489	+10.820	-48.810	-10.000	11280	11280	846.00	436.00	728.00
70479	+21.130	-45.320	-10.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
70469	+30.440	-39.670	-10.000	10464	10464	436.00	728.00	846.00
70459	+38.300	-32.140	-10.000	10464	10464	436.00	728.00	846.00
.								

Na podstawie mapy, postprocesor **modyfikuje** program sterujący dla obrabiarki, umieszczając w nim instrukcje zmiany prędkości prędkości obrotowej wrzeciona



**Uzasadnienie: podstawowa mapa optymalnych  
prędkości obrotowych  
wymaga modyfikacji**

- 1. Wirtualne Prototypowanie (WP)**
- 2. Wirtualne Prototypowanie Wspomagane  
Eksperymentem (WPWE)**
- 3. Realizacja w systemie docelowym (RSD)**



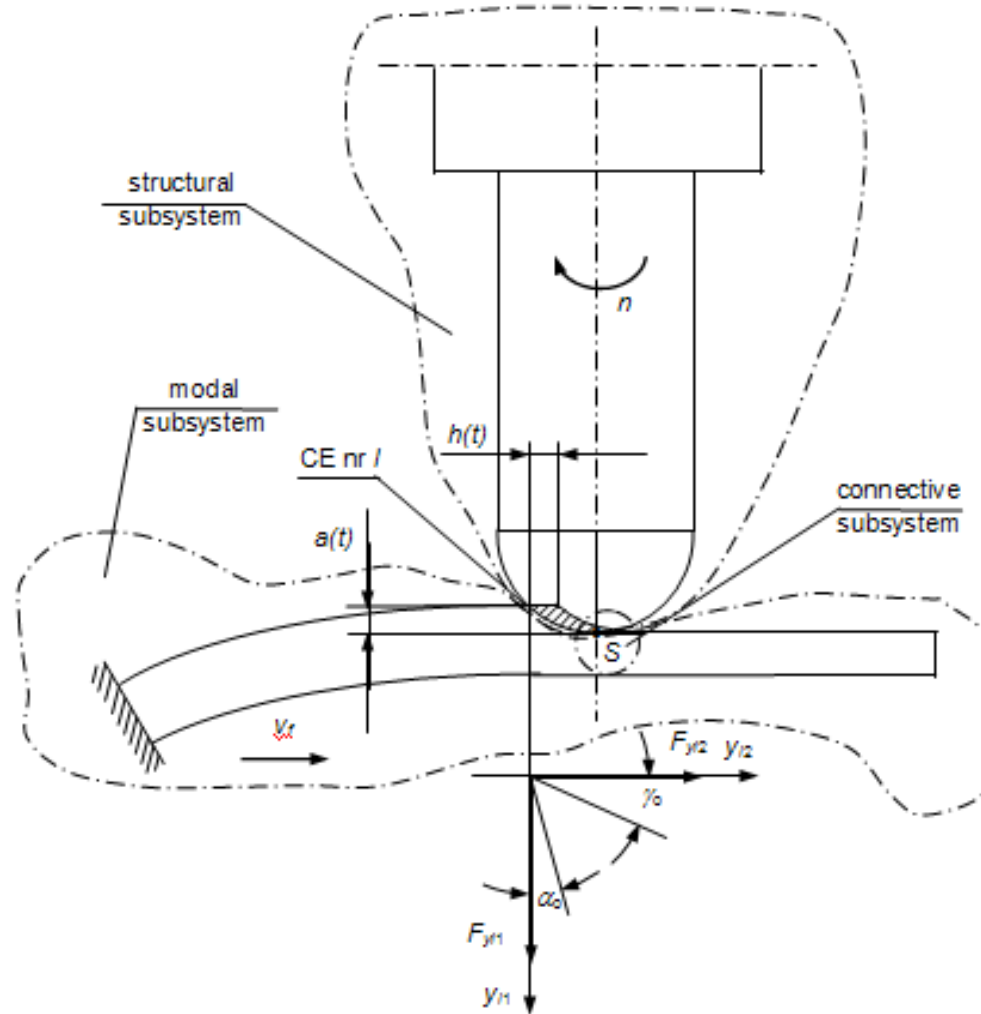


Równania

Wzrost

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

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



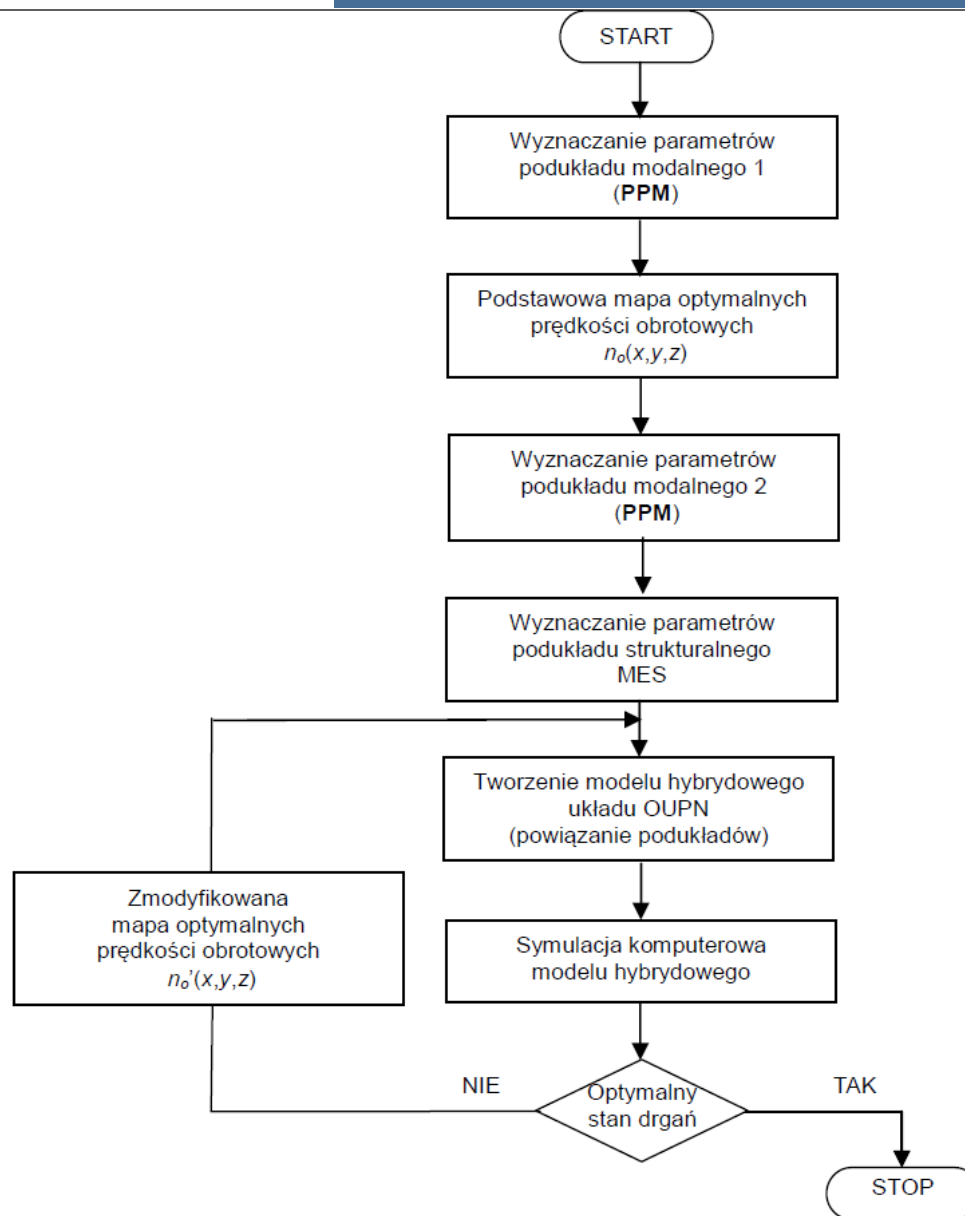
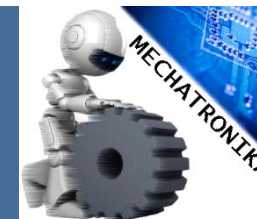




**Podstawa analizy.** Ocena **symulowanych** drgań przedmiotu obrabianego na podstawie:

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

**Potwierdzenie skuteczności** nadzorowania drgań narzędzie-przedmiot obrabiany z wykorzystaniem zmodyfikowanej mapy optymalnych prędkości obrotowych wrzeciona, metodą symulacji komputerowej dla **parametrów abstrakcyjnych.**





**Podstawa analizy.** Ocena **symulowanych** drgań przedmiotu obrabianego na podstawie:

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

**Potwierdzenie skuteczności** nadzorowania drgań narzędzie-przedmiot obrabiany w procesie obróbki przedmiotów **testowych**, z wykorzystaniem zmodyfikowanej mapy optymalnych prędkości obrotowych wrzeciona oraz techniki **WPWE**.



**Potwierdzenie skuteczności  
nadzorowania drgań  
narzędzie-przedmiot podatny w procesie  
obróbki przemysłowej testowych  
przedmiotów wielkogabarytowych**

Oprogramowanie użytkowe  
postprocesor

**zmodyfikowana** mapa  
optymalnych prędkości  
obrotowych

$$n_o'(x, y, z)$$

Geometria

Kinematyka

Oprogramowanie biurowe  
np. NX Siemens

NCI

Oprogramowanie  
(cechy obrabiarki)

NC – frezowanie normatywne  
NC – kod zmodyfikowany

System sterowania obrabiarką CNC  
np. Sinumeric 840Is

Realizacja procesu skrawania



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

## Przykłady systemów docelowych



### 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



## GAFAKO Gdynia



Centrum frezarsko wytaczarskie

## IN-BUL Sierakowice



Centrum frezarsko wytaczarskie SKODA



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

## Przykłady systemów docelowych



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



XVI Warsztaty Projektowania Mechatronicznego, Kraków 02-03 czerwca 2016 r.



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

**Najbliższe perspektywy**



**Realizacja PROJEKTU TANGO1/266350/NCBR/2015**

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