

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

### Opracowanie zaawansowanych procesów obróbki HSM trudnoobrabialnych stopów lotniczych

### Development of advanced processes of HSM of almost unworkable aeronautical alloys

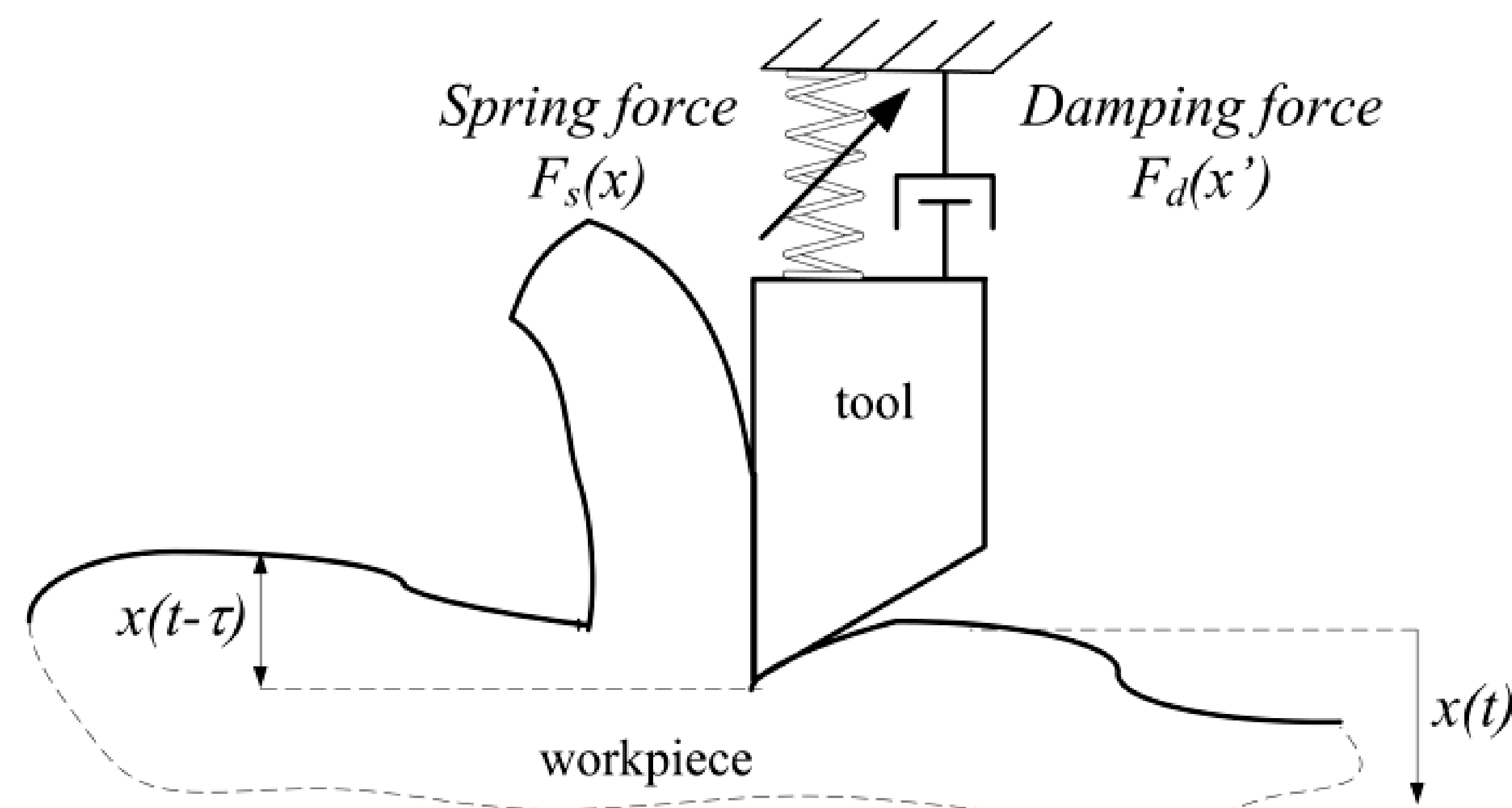
Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Łódzka, Politechnika Warszawska

#### Wyniki badań Results

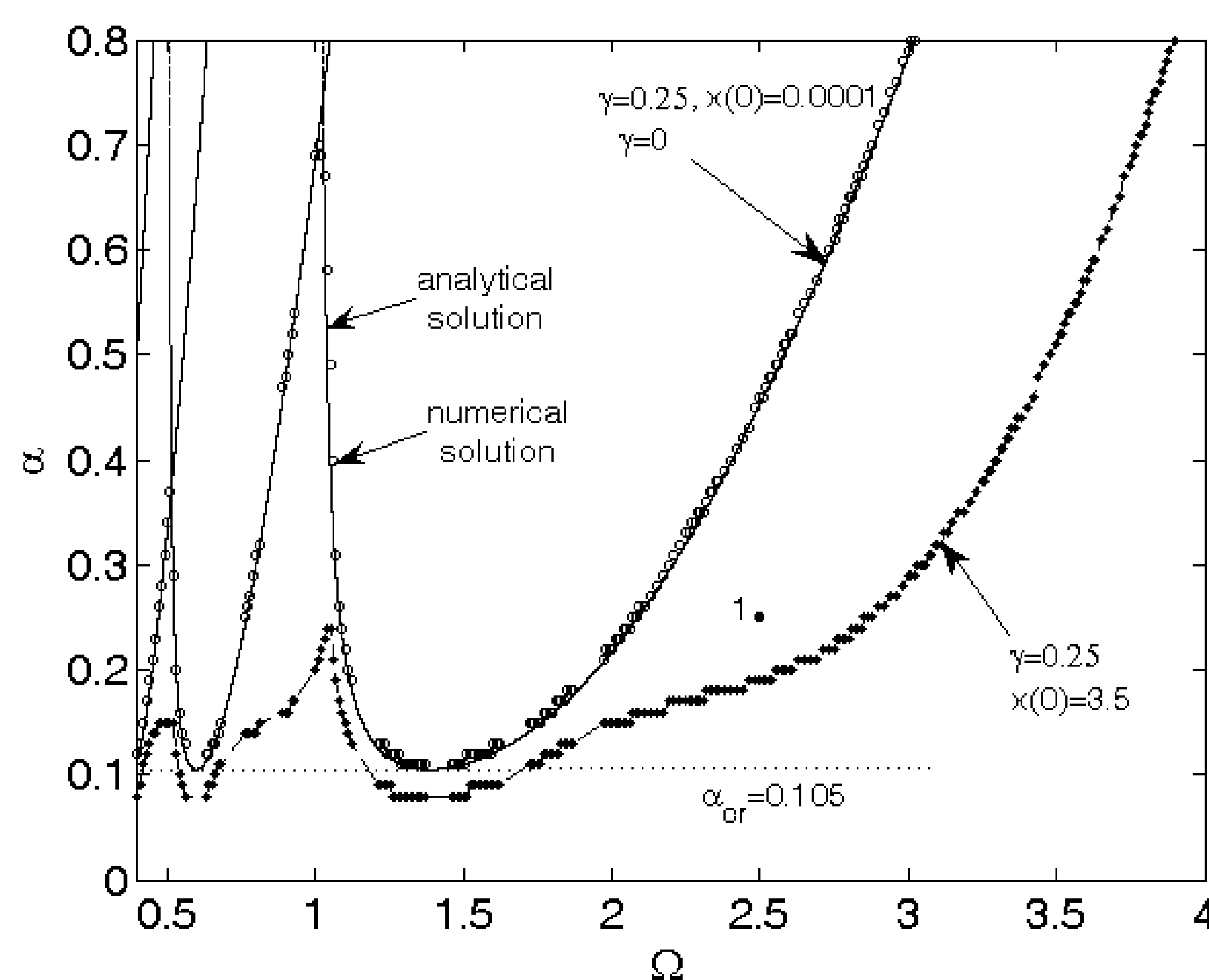
#### 1) Symulacje numeryczne procesu skrawania (Numerical simulations of cutting process)

Równanie różniczkowe ruchu modelu skrawania uwzględniające efekt regeneracji

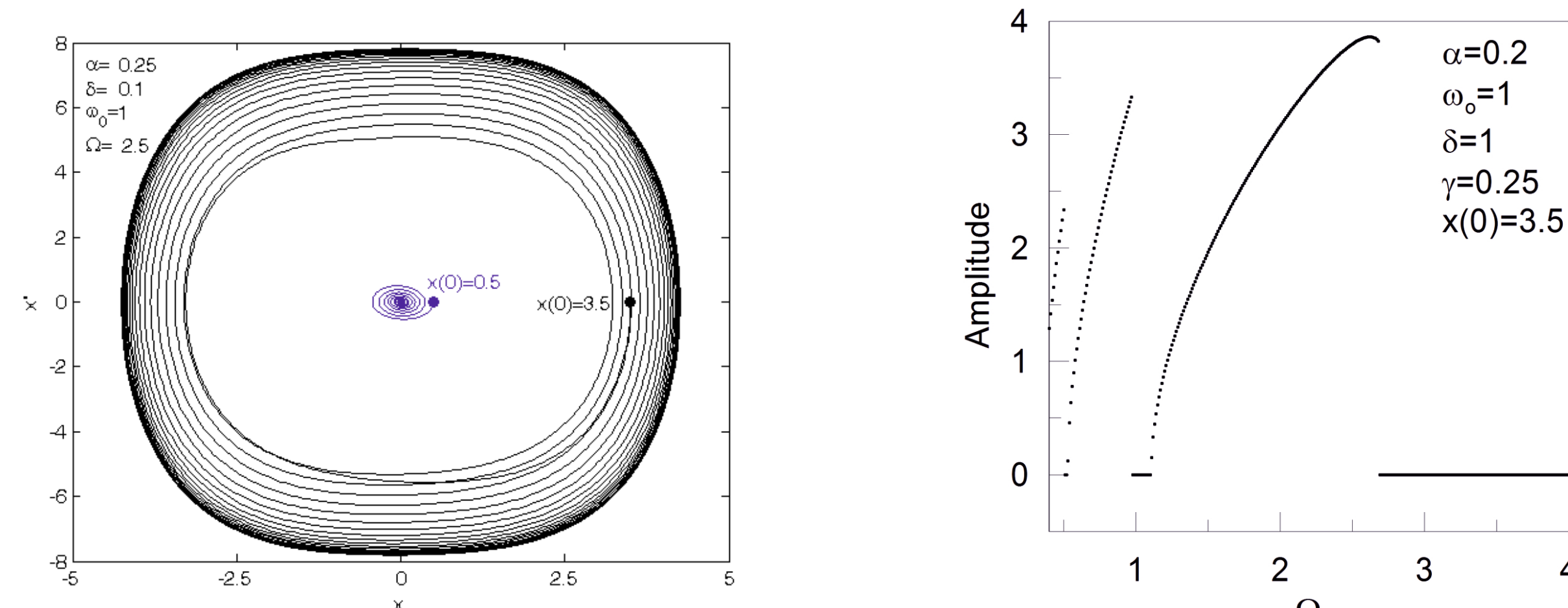
$$x''(t) + \delta x'(t) + \omega_0^2 x(t) + \gamma x(t)^3 = \alpha(-\mu x(t) + x(t-\tau)) + f \cos(\lambda t)$$



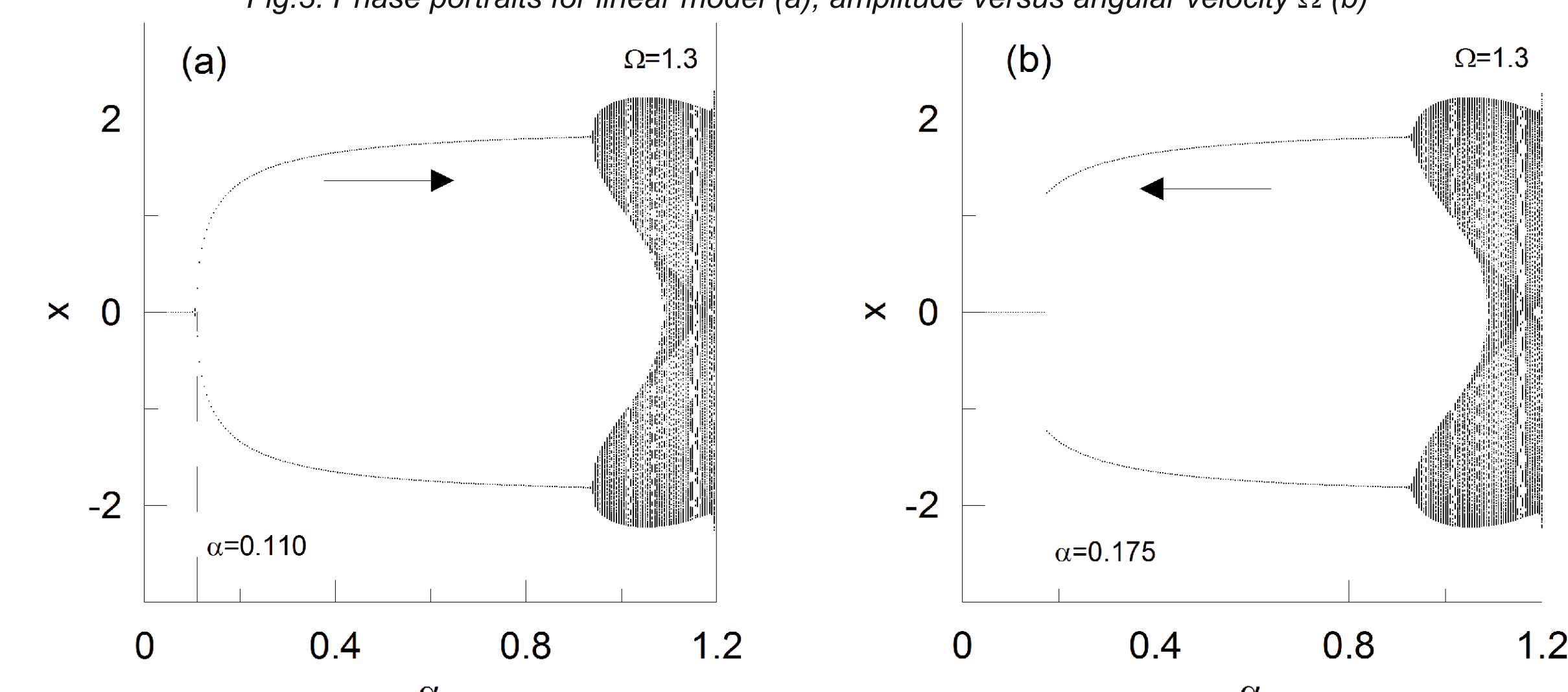
Rys.1. Model procesu skrawania z efektem regeneracji  
Fig.1. Regenerative model of cutting process



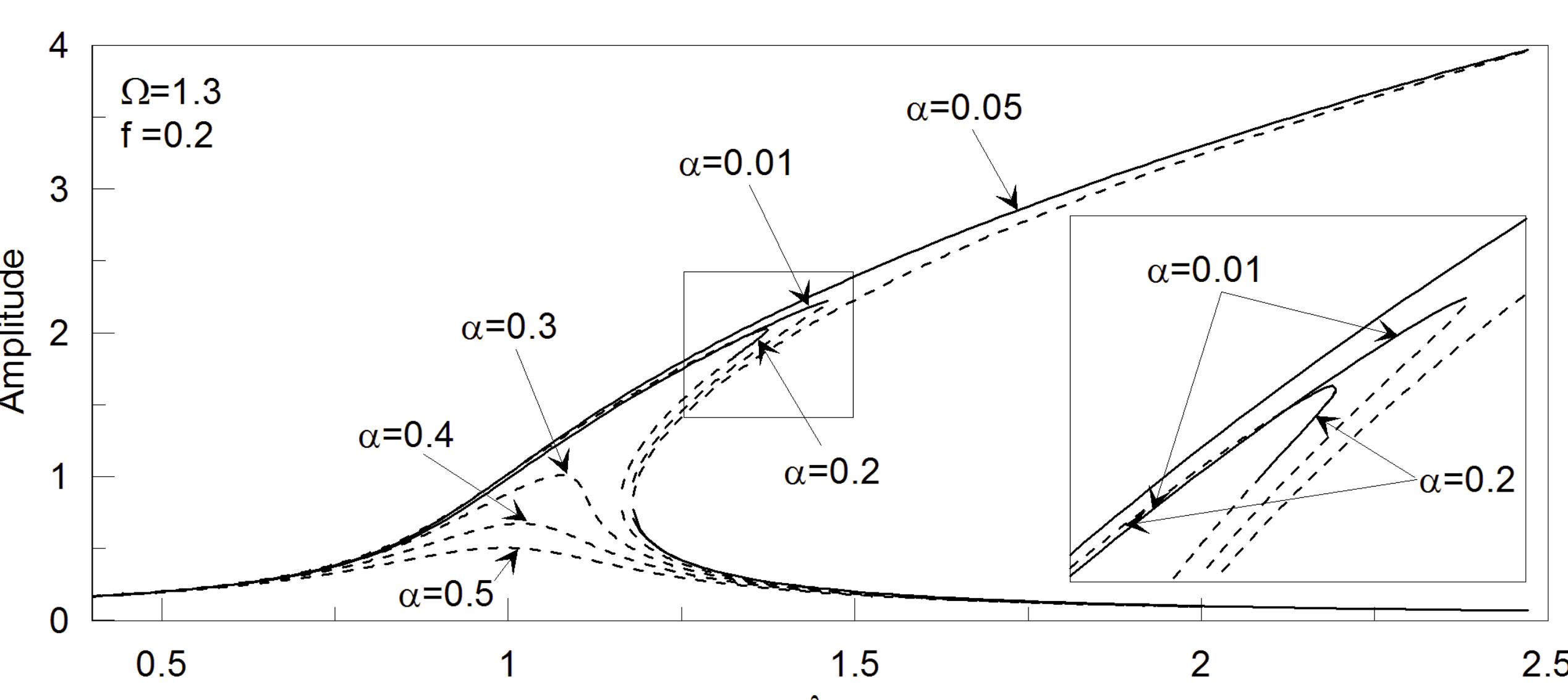
Rys.2. Krzywe stabilności dla modeli liniowych oraz nieliniowych.  
Fig.2. Stability lobes diagram, linear and nonlinear model



Rys.3. Portret fazowy dla modelu nieliniowego (a), zależność amplitudy przemieszczenia względem prędkości kątowej Omega (b)  
Fig.3. Phase portraits for linear model (a), amplitude versus angular velocity Omega (b)



Rys.4. Diagramy bifurkacyjne dla rozwiązania x(alpha) przy stałym Omega oraz zmiennym alpha rosnącym (a) i malejącym (b).  
Fig.4. Bifurcation diagrams of x(alpha) by constant Omega for increasing (a) and decreasing (b) alpha.

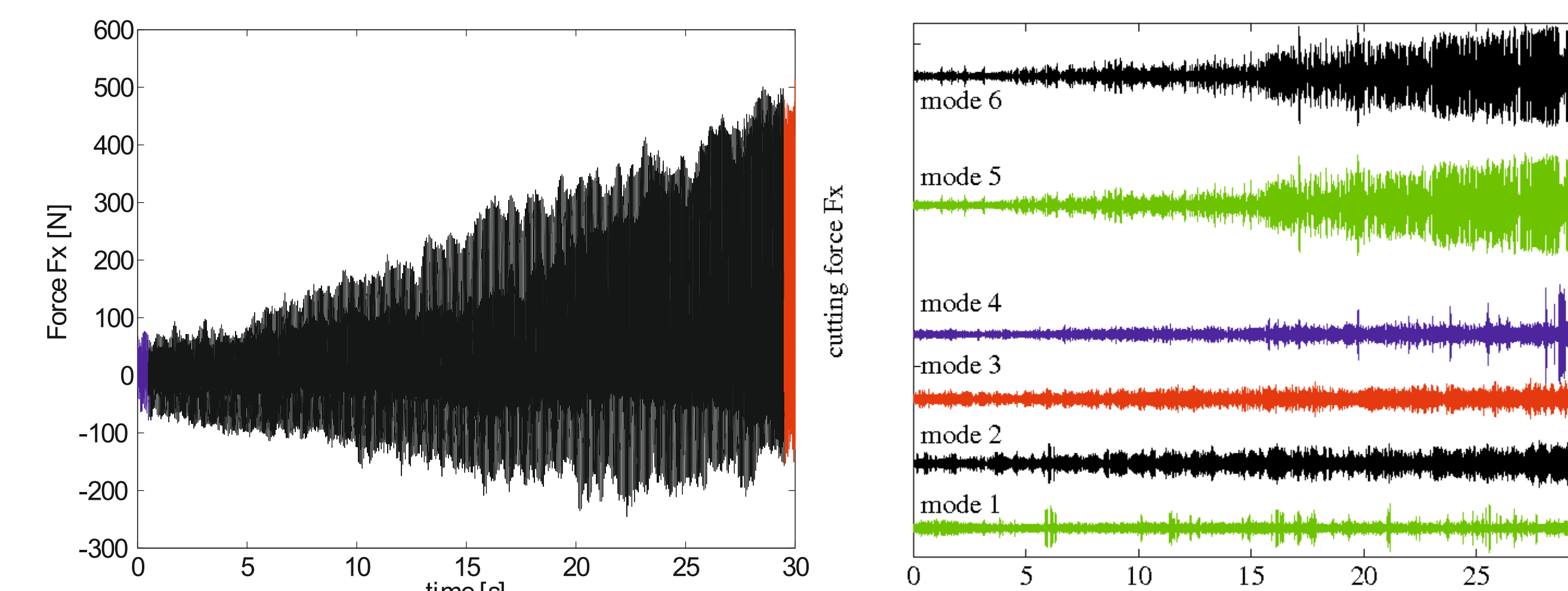


Rys.5. Zależność amplitudowo - częstotliwościowa modelu skrawania ze sprzężeniem zwrotnym opóźnionego przemieszczenia. Wpływ opóźnienia amplitudy alpha.  
Fig.5. Amplitude - frequency characteristic for externally forced Duffing oscillator with delayed displacement feedback. The influence of delay amplitude alpha.

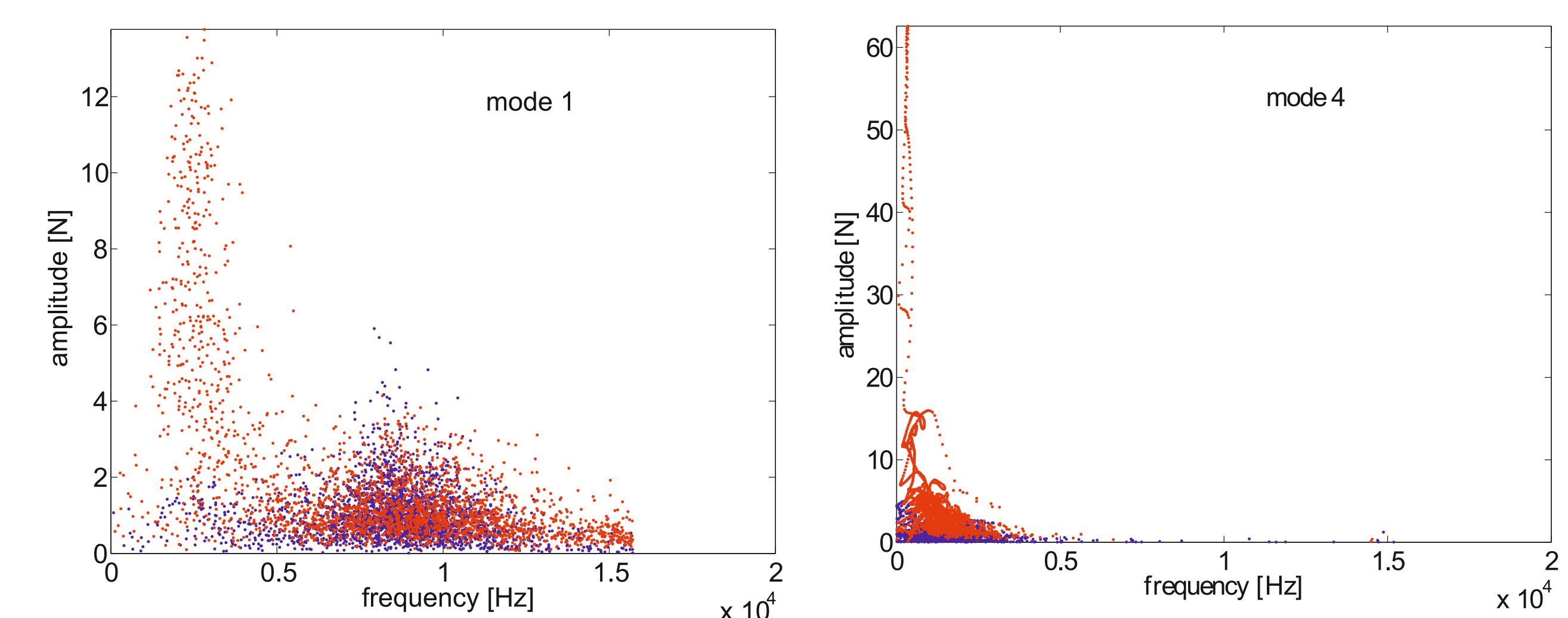
#### Wyniki badań Results

#### 2) Zastosowanie analizy falkowej oraz transformaty Hilberta - Huang w badaniach doświadczalnych procesu frezowania materiałów trudnoobrabialnych.

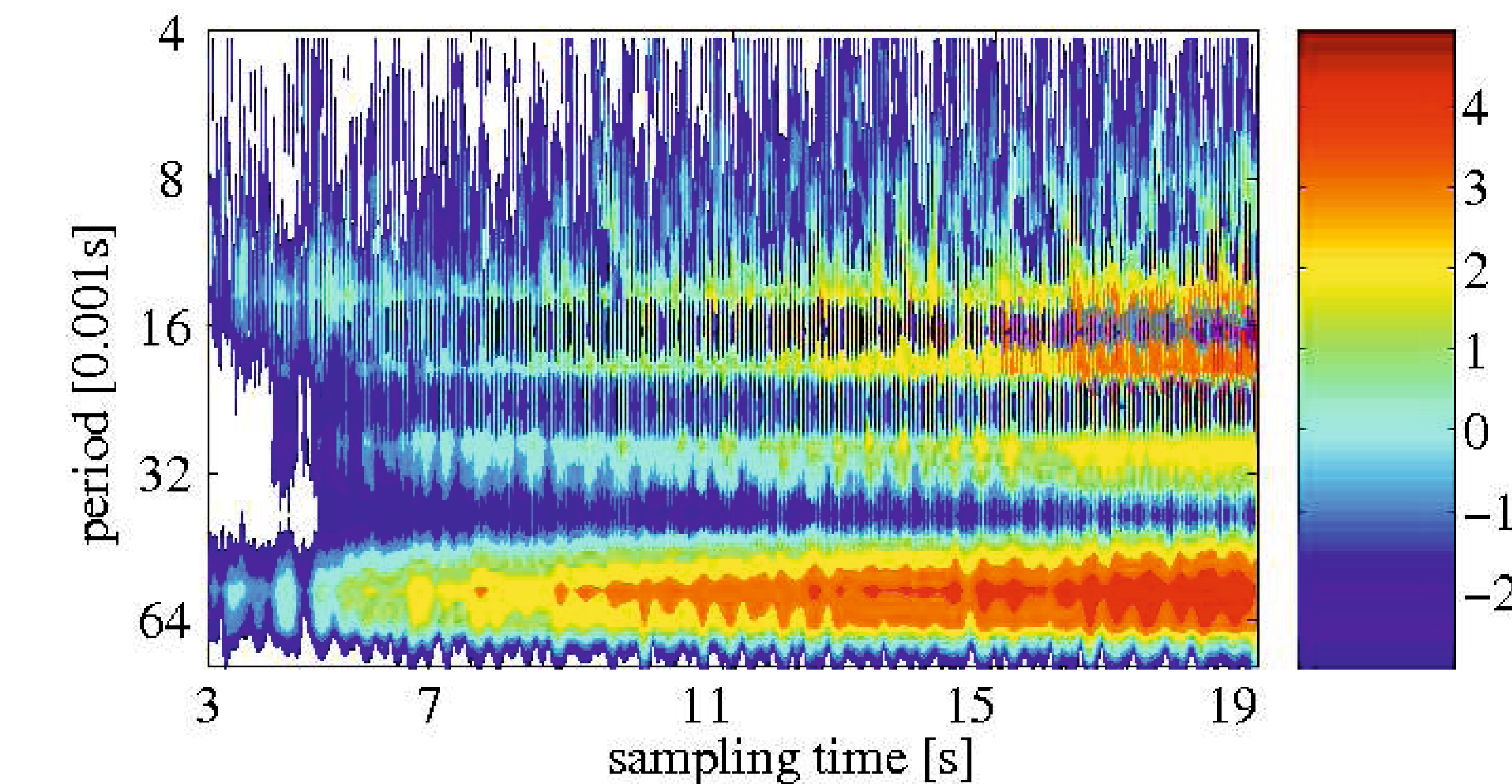
#### Wavelet analysis and Hilbert - Huang transform in experimental research of milling



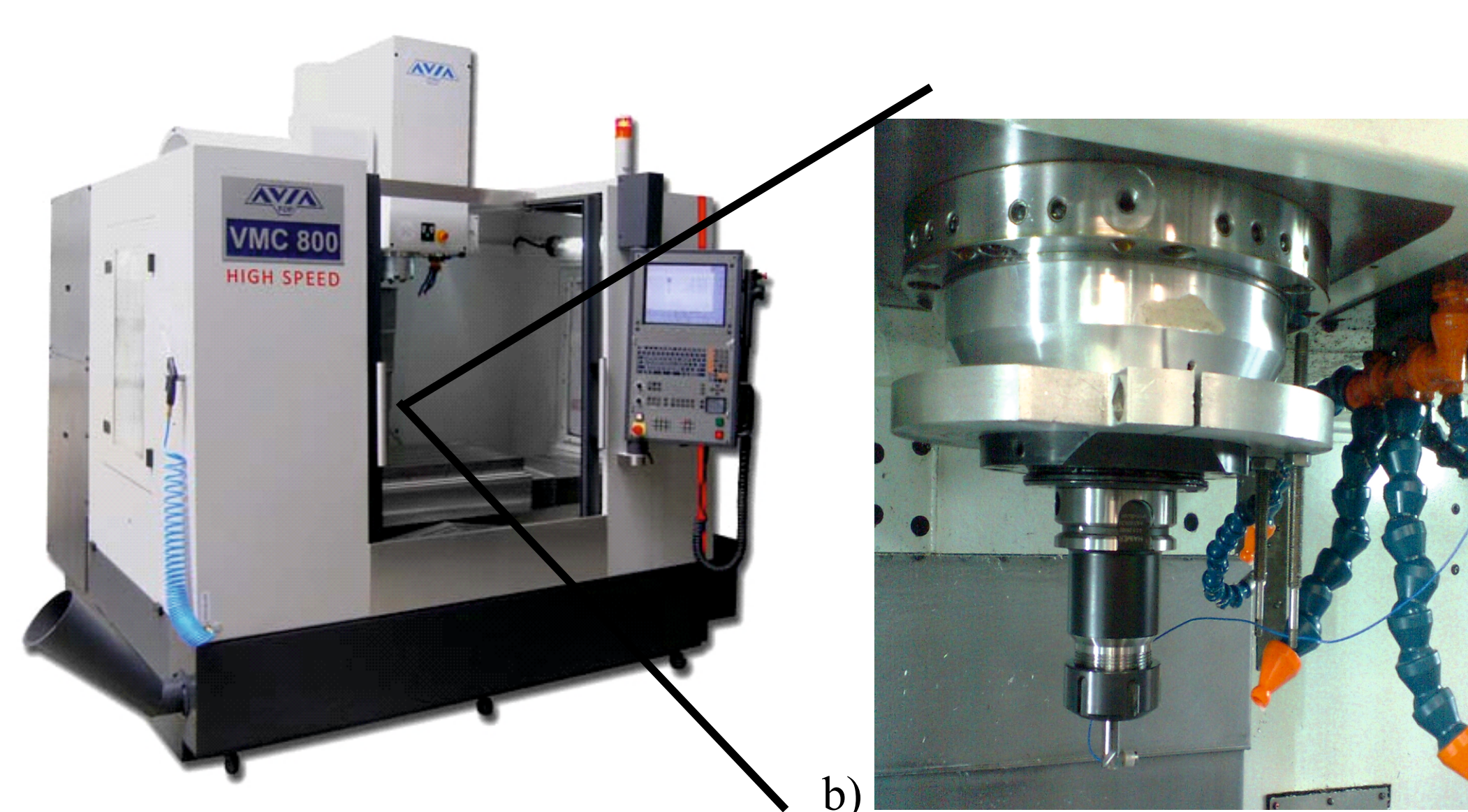
Rys.6. Klinowy przebieg czasowy siły frezowania (a), pierwsze sześć trybów z dekompozycji Hilberta - Huang  
Fig.6. Cutting force (a), modes of Hilbert - Huang decomposition



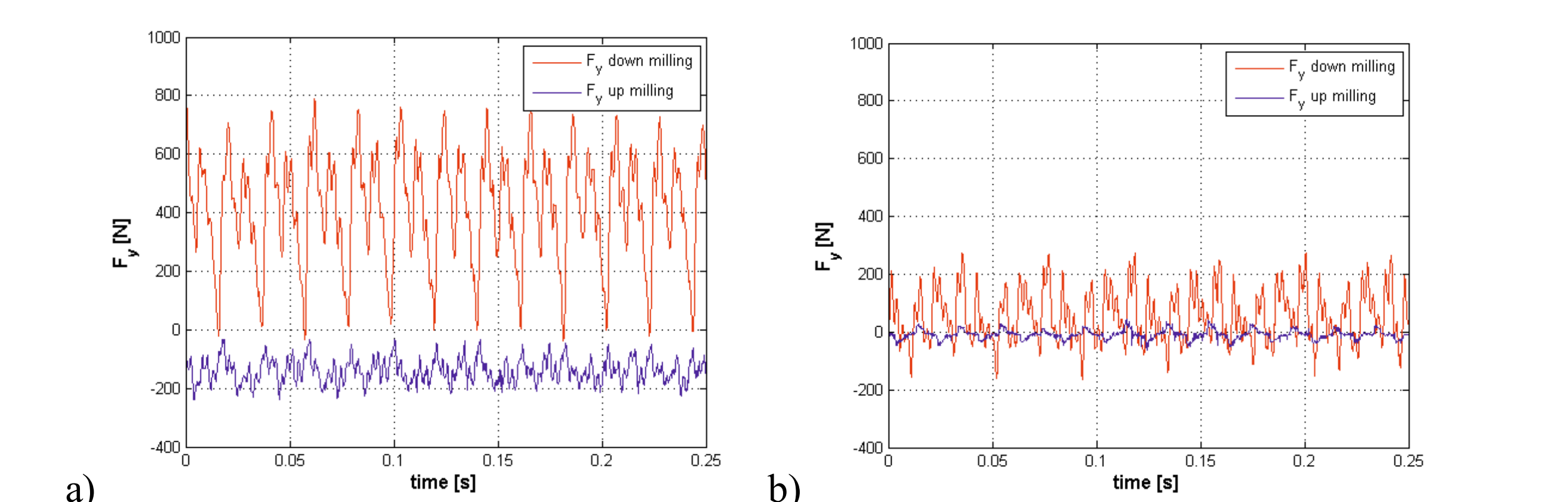
Rys.7. Zależności amplitudowo - częstotliwościowe dla wybranych trybów dekompozycji Hilberta - Huang dla interwałów początkowych (kolor niebieski) i końcowych (kolor czerwony).  
Fig.7. Instantaneous amplitude-frequency graphs for chosen Hilbert-Huang decompositions modes for the initial (blue colour)



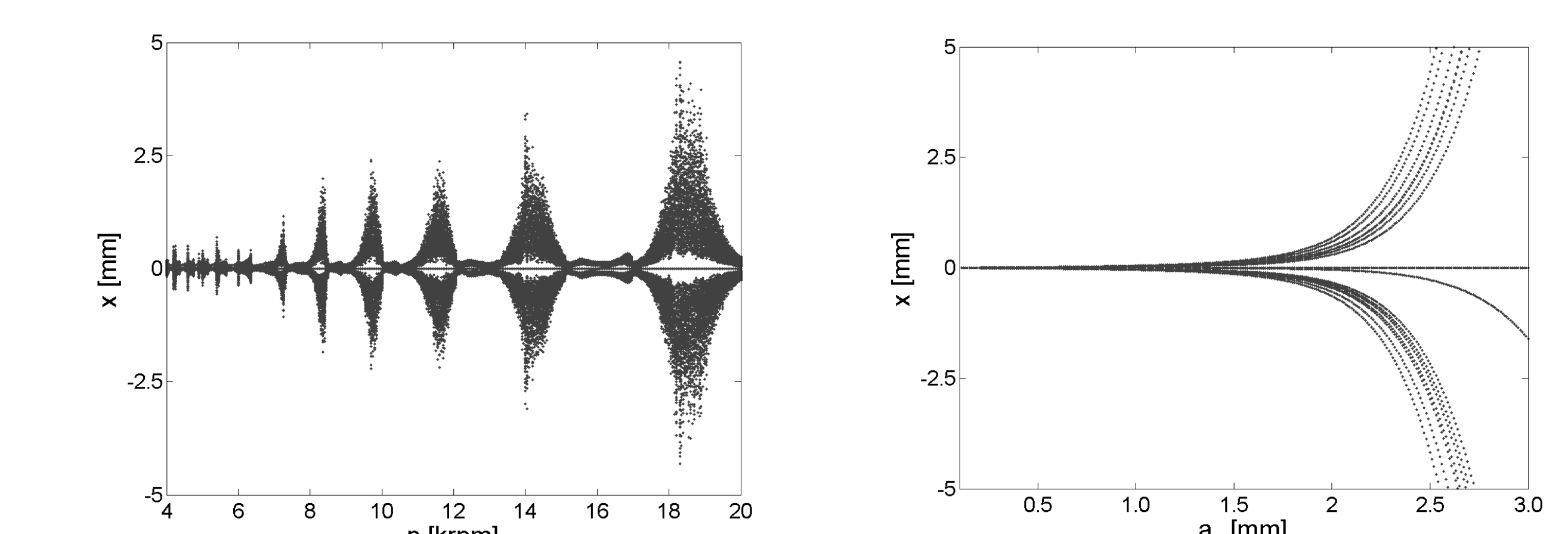
Rys.8. Spektrum falkowe od siły frezowania F oraz logarymiczna skala spektrum (po prawej)  
Fig.8. Wavelet power spectrum for the milling force F.



Rys.9. Centrum obróbkowe wykorzystane do badań doświadczalnych. Politechnika Lubelska 05.04.2012.  
Fig.9. CNC milling machine used in experiment



Rys.10. Zestawienie sił frezowania F ze względu na frezowanie współbieżne i przeciwbieżne przy wybranych posuwach f.  
Fig.10. Cutting forces for various feed rate



Rys.11. Wpływ parametru prędkości obrotowej frezu n [obr/min] (a) oraz głębokości frezowania ap [mm] (b) na amplitudę drgań x [mm] badanego frezu.  
Fig.11. Influence of rotational speed n (a) and axial depth of cut ap (b) on vibrations amplitude

#### Wnioski Conclusions

Do badania dynamiki procesu skrawania stosowano zaawansowane metody, które pozwalają dokładniej niż dotychczas poznać zjawiska występujące podczas obróbki, zwłaszcza szybkościowej, materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym. (New methods of dynamics analysis are used to investigate cutting process in aviation)

- analiza falkowa (wavelets)
- wykresy rekurencyjne (recurrence plots)
- metoda dekompozycji Hilberta - Huang (Hilbert - Huang decomposition)

Badania analityczne i numeryczne przeprowadzone na modelu procesu skrawania z nieliniowością Duffinga wskazały na istotne różnice w dynamice takiego układu w stosunku do klasycznego liniowego podejścia, które przejawia się:

(Analysis of regenerative model of cutting with Duffing's type nonlinearity shows:)

- większymi obszarami niestabilności (bigger instability regions)
- możliwością wystąpienia rozwiązania stabilnego lub niestabilnego w zależności od warunków początkowych (stable and unstable solutions)
- przeskokami amplitudy na gałęziach charakterystyki amplitudowo częstotliwościowej (amplitude jumps)
- bifurkacjami rozwiązań, które występują przy różnych wartościach parametrów skrawania (bifurcations at various cutting parameters)

#### Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation



#### Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym Collaboration with aviation industry

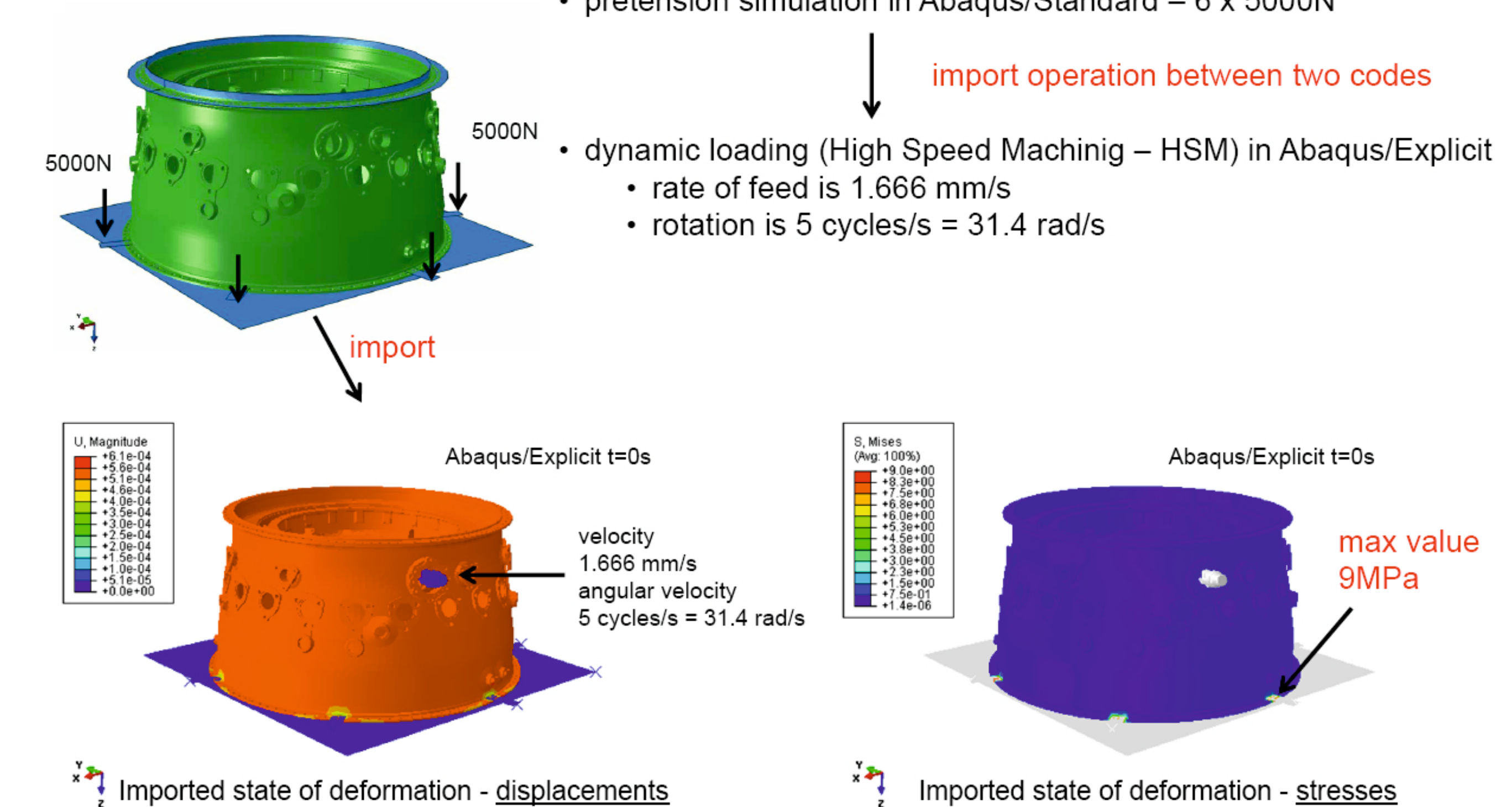
WSK "PZL-Rzeszów" SA - Skrawanie elementów cienkościennych wykonanych z trudnoobrabialnych stopów lotniczych  
Celem badań jest uzyskanie lepszej dokładności wymiarowo - kształtowej elementu obrabianego a także skrócenie czasu obróbki

#### CASE I and II

Milling - Machining simulation of diffuser hole with pretension (Figure)

Two steps simulation:

- pretension simulation in Abaqus/Standard - 6 x 5000N
- dynamic loading (High Speed Machining - HSM) in Abaqus/Explicit
- rate of feed is 1.666 mm/s
- rotation is 5 cycles/s = 31.4 rad/s



#### Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

#### Referaty

- Lublin, Poland, February 6, 2012. Workshop on Research achievements and planned investigations within 7.FP CEMCAST project. Lecture: "Dynamics and analysis of cutting process".

#### Publikacje

- Rusinek R., Warmiński J., Weremczuk A.: *Regenerative model of cutting process with nonlinear Duffing oscillator. Mechanics and Mechanical Engineering*, 2011/2, vol.15 No. 4
- Litak G. and Rusinek R.: *Dynamics of a Stainless Steel Turning Process by Statistical and Recurrence Analyses. Meccanica* (2012) DOI: 10.1007/s11012-011-9534-x, w druku.
- Litak G., Schubert S., and Radons G.: *Nonlinear Dynamics of a Regenerative Cutting Process. Nonlinear Dynamics* (2012) DOI: 10.1007/s11071-012-0344-z, w druku. 4. Litak G., Kecik K. and Rusinek R.: *Cutting Force Response in Milling of Inconel: Analysis by Wavelet and Hilbert-Huang Transforms. Latin American Journal of Solids and Structures* (2012) w druku

#### Prace inż., mgr, dr, hab.

#### Prace inżynierskie obronione:

- Przemysław Zdeb: *Wpływ prędkości posuwowej na wartość siły skrawania podczas frezowania kompozytu w włóknie węglowym*. Promotor: dr inż. Rafał Rusinek

#### Prace inżynierskie w realizacji

- Małgorzata Jeleniewska: *Modelowanie procesu skrawania na przykładzie toczenia ortogonalnego*. Promotor: dr inż. Rafał Rusinek
- Piotr Przech: *Modelowanie procesu frezowania*. Promotor: dr inż. Rafał Rusinek

#### Prace doktorskie

Tytuł: *Analiza drgań nieliniowych układów mechanicznych z opóźnieniem czasowym*  
Autor: mgr inż. Andrzej Weremczuk  
Promotor: dr hab. Inż. Jerzy Warmiński, prof. PL, Promotor pomocniczy: dr inż. Rafał Rusinek  
Status: *przewód doktorski otwarty 23.05.2012*

#### Prace habilitacyjne

Tytuł: *Zjawiska nieliniowe w obróbce skrawaniem*  
Autor: dr inż. Rafał Rusinek  
Status: *w realizacji*