Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym
Modern material technologies in aerospace industry

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ ROZWOJU REGIONALNEGO

KONFERENCJA ROCZNA Projektu Kluczowego 12-13 Grudnia 2011

ZB 2

Modelowanie, konstruowanie i kontrolowanie procesu HSM z uwzględnieniem skonfigurowanego układu maszyna-przyrząd-detal
Modeling, construction and control of the HSM process taking into consideration the configurated machine-instrument-detail system

Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska

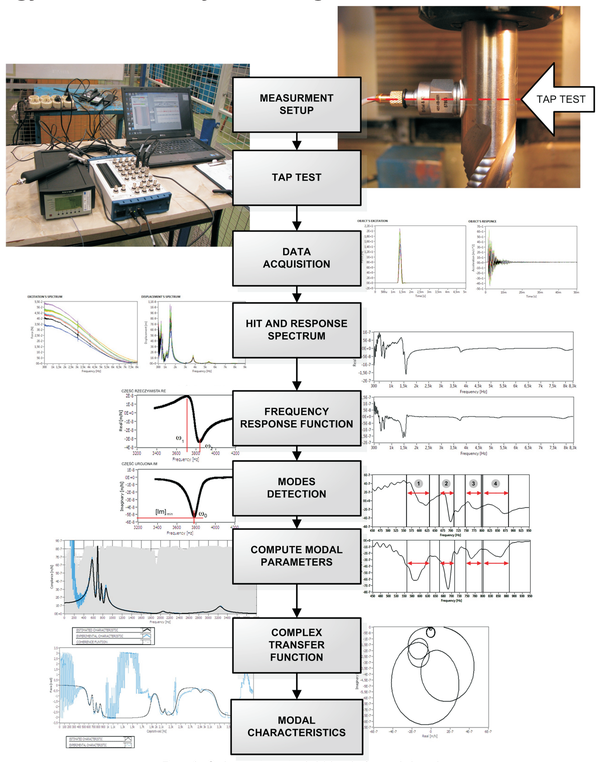
Wyniki badań
Results

Automatyczna analiza modalna wrzeciona frezarki
Automatic modal analysis of milling machine tool spindle

Ogólne informacje
Wymagająca obróbka skrawaniem w przemyśle lotniczym wymaga okresowego monitorowania stanu obrabiarek. Istotnym wskaźnikiem tego stanu jest podatność dynamiczna (skłonność do drgań), którą można określić przy pomocy analizy modalnej – badania właściwości metodą zakłócenia zadaną siłą (młotkiem z czujnikiem siły) i pomiaru odpowiedzi obiektu – drgań. „Ręczne" wyznaczenie parametrów modalnych jest czasochłonne, trudne, wymaga wiedzy i doświadczenia. Celem projektu jest opracowanie metodyki, algorytmów i oprogramowania do automatycznej analizy modalnej, w której użytkownik jedynie wykonuje uderzenia, a układ samodzielnie rozpoznaje poprawność uderzeń, wykrywa postaci drgań i wyznacza parametry modalne

General information
Important indicator of milling machine tool condition is dynamic compliance of its spindle. It can be identified with experimental modal analysis (tap test) from measured frequency responses. Aim of the project is development of methodology, algorithms and software for automatic SISO modal analysis. Operator only executes several modal hammer hits while program automatically completes hits extraction from acquired signal rejecting non-proper (double, too weak, too strong) ones. Afterwards program computes frequency response function, averages results from all hits, selects modes from averaged. The last stage is computing modal parameters and multi-mode modal characteristics.

Metodyka badań modalnych
Methodology for modal analysis testing

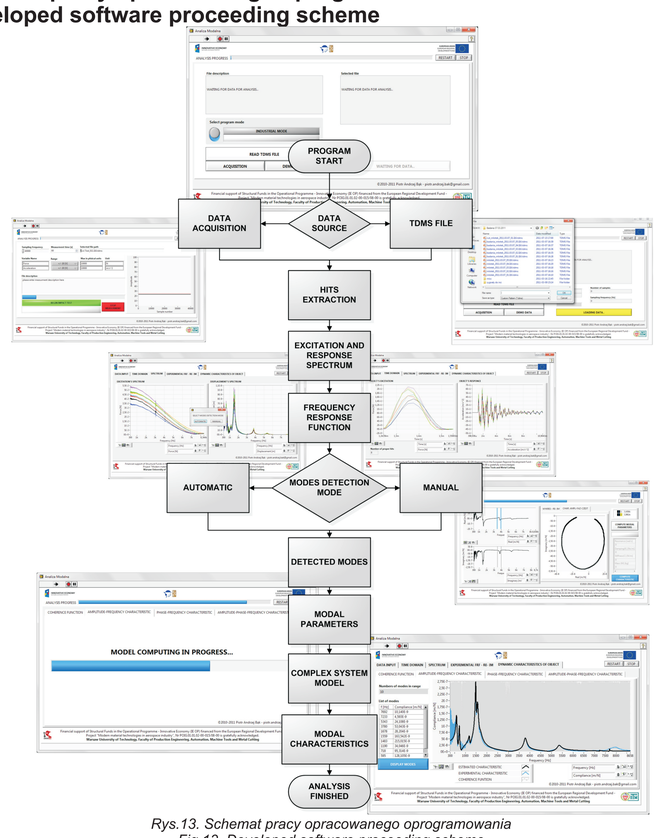


Rys.1. Schemat metodyki badań modalnych
Fig.1. Modal analysis methodology scheme

Tor pomiarowy
Młotek modalny Brüel & Kjær 8206-03
Akcelerometr Brüel & Kjær 4514-001
Wzmacniacz pomiarowy Brüel & Kjær NEXUS 2693
Karta pomiarowa National Instruments USB-6259 BNC
Komputer PC z oprogramowaniem LabVIEW 2010

Measurment setup
Modal hammer Brüel & Kjær 8206-03
Accelerometer Brüel & Kjær 4514-001
Measurment amplifier Brüel & Kjær NEXUS 2693
Data acquisition card National Instruments USB-6259 BNC
PC with LabVIEW 2010 software

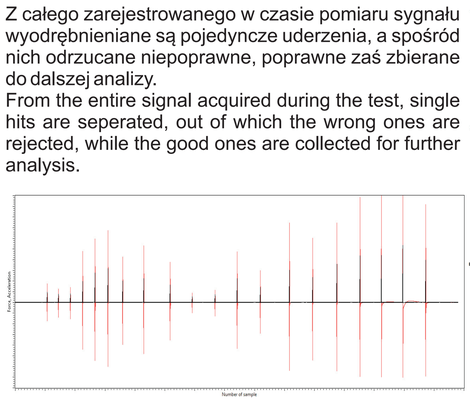
Schemat pracy opracowanego oprogramowania
Developed software proceeding scheme



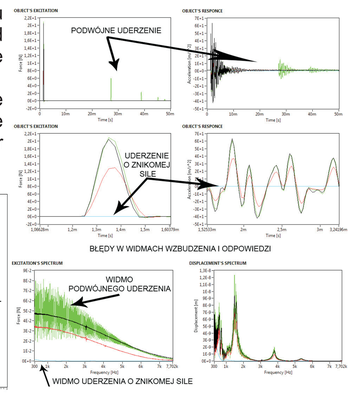
Rys.13. Schemat pracy opracowanego oprogramowania
Fig.13. Developed software proceeding scheme

Uderzenia testowe oraz ekstrakcja poprawnych uderzeń
Impact testing with extraction of proper hits

Z całego zarejestrowanego w czasie pomiaru sygnału wyodrębnieniane są pojedyncze uderzenia, a spośród nich odrzucane niepoprawne, poprawne zaś zbierane do dalszej analizy.
From the entire signal acquired during the test, single hits are seperated, out of which the wrong ones are rejected, while the good ones are collected for further analysis.

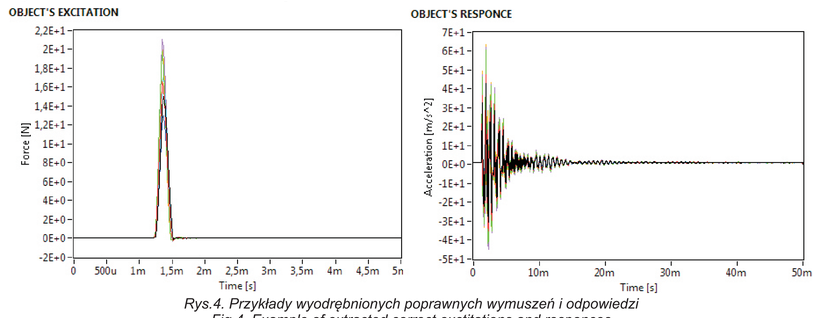


Rys.2. Przebieg czasowy siły i przyśpieszenia w pomiarze
Fig.2. Force and acceleration time trial in measurment



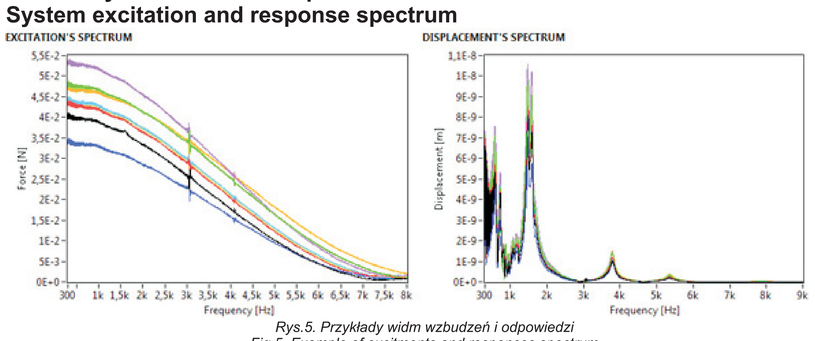
Rys.3. Przykłady błędnych uderzeń i odpowiedzi
Fig.3. Example of incorrert hits and responces

Przebieg czasowy wymuszenia oraz odpowiedzi układu
System excitation and response time trial



Rys.4. Przykłady wyodrębnionych poprawnych wymuszeń i odpowiedzi
Fig.4. Example of extracted correct exctitations and responces

Widmo wymuszenia oraz odpowiedzi układu
System excitation and response spectrum



Rys.5. Przykłady widm wzbudzeń i odpowiedzi
Fig.5. Example of excitments and responces spectrum

Funkcja odpowiedzi częstotliwościowej
Frequency response function

$$H(\omega) = \left| \frac{\sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-\frac{j2\pi kn}{N_S}}}{N_S} \right| dla \begin{cases} d_f = \frac{F_S}{N_S+N_0} \\ n \in \left(0, \frac{N_S+N_0}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

dla n= 0, 1, 2, ..., N-1

x_n – *n-ta próbka*

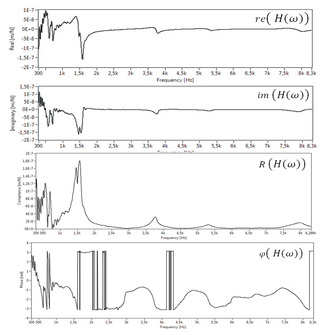
N – *łączna liczba próbek*

k – *indeks próbek wyjściowych w dziedzinie częstotliwości, m = 0,1,2,3,.. ,N-1*

n – *indeks próbek wejściowych w dziedzinie czasu, n = 0,1,2,3,... ,N-1*

N_s – *liczba próbek w sygnale oryginalnym*

N_0 – *liczba zer uzupełniających sygnał*



Rys.6. Funkcja odpowiedzi częstotliwościowej
Fig.6. Frequency responce function

Model masowo-dyssypacyjno-sprężysty obiektu
MDS system model

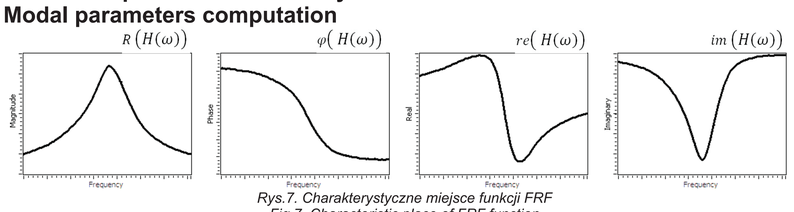
Równanie opisujące zachowanie się obiektu o jednym stopniu swobody MDS (układ masowo-dyssypacyjno-sprężysty):
Equation desribes behavior of object with one degree of freedom:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (2)$$

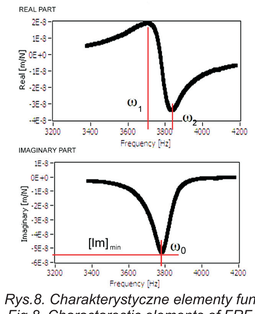
Do obliczenia modelu wykorzystywana jest transmitancja widmowa układu MDS o jednym stopniu swobody opisana jest wzorem poniżej:
Complex model of MDS system is based on transfer function of 1DOF system:

$$G_{MST}(\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + jc\omega + k} \quad (3)$$

Obliczenie parametrów modalnych
Modal parameters computation



Rys.7. Charakterystyczne miejsce funkcji FRF
Fig.7. Characteristic place of FRF function



Rys.8. Charakterystyczne elementy funkcji FRF
Fig.8. Charactarestic elements of FRF function

Częstotliwość
Frequency

$$\omega_0\left(rad/s\right) \quad (4)$$

Współczynnik tłumienia
Damping coefficent

$$d = \left|\frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_0}\right| () \quad (5)$$

Tłumienie
Damping

$$d = \frac{k}{2\sqrt{km}} \rightarrow c = 2d\sqrt{cm}\left(Ns/m\right) \quad (6)$$

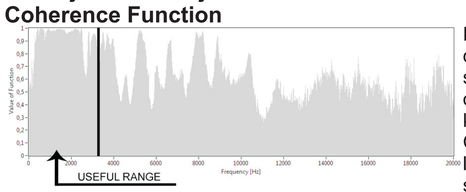
Sztywność
Stiffness

$$k = \frac{-1}{2d\, Im_{min}}\left(N/m\right) \quad (7)$$

Masa
Mass

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow m = \frac{k}{{\omega_0}^2}\left(kg\right) \quad (8)$$

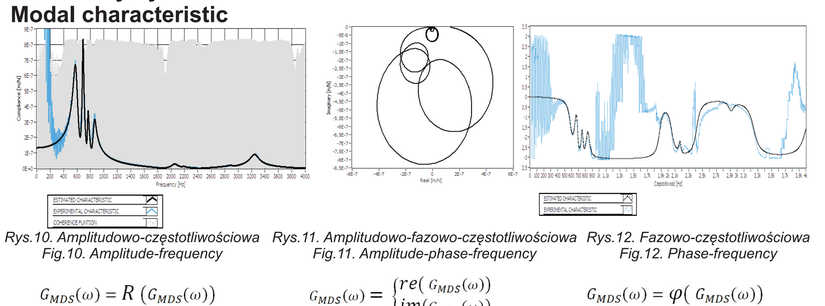
Funkcja Koherencji
Coherence Function



Rys.9. Funkca koherencji dla końcówki plastikowej młotka modalnego
Fig.9. Coherence function for plastic tip of modal hammer

Funkcja koherencji, jest wykorzystywana do określenia liniowości pomiędzy sygnałem wymuszającym a sygnałem odpowiedzi. w ocenie zakłóceń, braku korelacji pomiędzy sygnałami
Coherence function is used for evaluation linearity betwen excitation and response signal, make an assesment of disortion and lack of correlation betwen signals.

Charakterystyki modalne
Modal characteristic



Rys.10. Amplitudowo-częstotliwościowa
Fig.10. Amplitude-frequency

$$G_{MDS}(\omega) = R\left(G_{MDS}(\omega)\right) \quad (9)$$
$$dla\ \omega \in \left\langle 0, \frac{2\pi f_s}{2}\right)$$

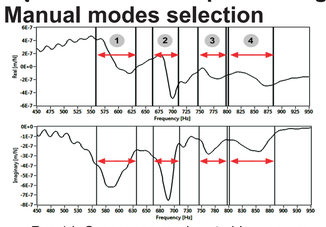
Rys.11. Amplitudowo-fazowo-częstotliwościowa
Fig.11. Amplitude-phase-frequency

$$G_{MDS}(\omega) = \begin{cases} re\left(G_{MDS}(\omega)\right) \\ im\left(G_{MDS}(\omega)\right) \end{cases} \quad (10)$$
$$dla\ \omega \in \left\langle 0, \frac{2\pi f_s}{2}\right)$$

Rys.12. Fazowo-częstotliwościowa
Fig.12. Phase-frequency

$$G_{MDS}(\omega) = \varphi\left(G_{MDS}(\omega)\right) \quad (11)$$
$$dla\ \omega \in \left\langle 0, \frac{2\pi f_s}{2}\right)$$

Ręczna wskazanie postaci drgań
Manual modes selection

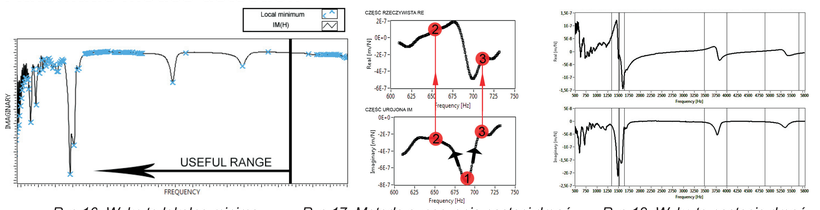


Rys.14. Oznaczone mody w trybie ręcznym
Fig.14. Selected modes in manual mode

Tabela 1. Obliczone parametry modalne
Table 1. Computed modal parameters

Parametr modalny	Numer postaci drgań			
	1	2	3	4
Częstotliwość modalna [Hz]	582,6	689,5	763,1	855,3
Masa - M [kg]	1,34	2,1	4,15	2,26
Tłumienie - C [Ns/m]	440,6	304,9	740,9	731,6
Sztywność - K [N/m]	1,8E+7	3,95E+7	9,52E+7	6,53E+7

Automatyczna detekcja postaci drgań
Automatic modes detection

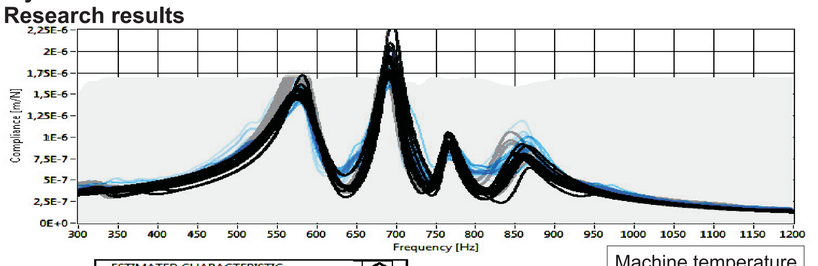


Rys.16. Wykryte lokalne minima
Fig.16. Detected local minimums

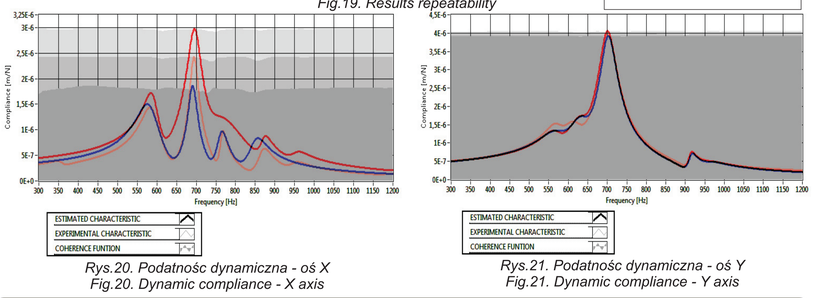
Rys.17. Metoda oznaczenia postaci drgań
Fig.17. Mode designation method

Rys.18. Wykryte postacie drgań
Fig.18. Detected modes

Wyniki badań
Research results



Rys.19. Powtarzalność wyników
Fig.19. Results repeatability



Rys.20. Podatnośc dynamiczna - oś X
Fig.20. Dynamic compliance - X axis

Rys.21. Podatnośc dynamiczna - oś Y
Fig.21. Dynamic compliance - Y axis

Wskaźniki realizacji celów projektu
Indicators of the project

Referaty

1. Piotr Andrzej Bąk, Krzysztof Jemielniak: ***Automatic modal analysis of milling machine tool spindle.*** Zgłoszenie referatu na 1st International Conference on Virtual Machining Process Technology, École Polytechnique, Montréal, Canada

Prace mgr, dr, hab.

Prace inżynierskie obronione:

- Piotr Andrzej Bąk : ***„Jednowymiarowa analiza modalna wrzeciona frezarki"*** . Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak

Prace magisterskie planowane

- inż. Piotr Andrzej Bąk ***„Automatyczna analiza modalna SISO wrzeciona frezarki"*** . Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak, planowany termin obrony pracy - czerwiec 2012

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym
Collaboration with aviation industry

Ostateczna weryfikacja poprawności działania oraz przydatności opracowanego oprogramowania będzie wykonana w warunkach przemysłowych w zakładach lotniczych WSK Rzeszów oraz PZL Mielec A Sikorsky Aircraft Company
Final verification of error-free operation and usability of developed software will be tested in factory floor conditions at WSK Rzeszów and PZL Mielec A Sikorsky Aircraft Company

Wnioski
Conclusions

Opracowano oprogramowanie do wykonania badań analizy modalnej w trybie automatycznym. Tryb przemysłowy i naukowy umożliwiają zastosowanie w przemyśle oraz edukacyjne. Wyniki badań ukazują powtarzalność wyników badań oraz wpływ ciepła na podatność dynamiczną wrzeciona frezarki.
Developed software to perform modal analysis in automatic mode. Industrial and scientific mode enebles application in industry and education. Reasearch results reveal repeatability of outcome and heat influence on dynamic compliance of milling machine tool spindle.

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO