# 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 14**

## Materiały inteligentne - oraz bazujące na nich systemy zespolone (ang. smart embedded systems) do zastosowania w lotnictwie
## Smart embedded systems based on intelligent materials


Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Lotnictwa w Warszawie, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska


### Wyniki badań
*Results*

**1. Dobór algorytmów sterujących do redukcji drgań układu z wymuszeniem parametrycznym.**
**Control algorithms for vibrations suppression of parametrically excited structure**

Analizowano efektywność następujących algorytmów:

algorytm PPF

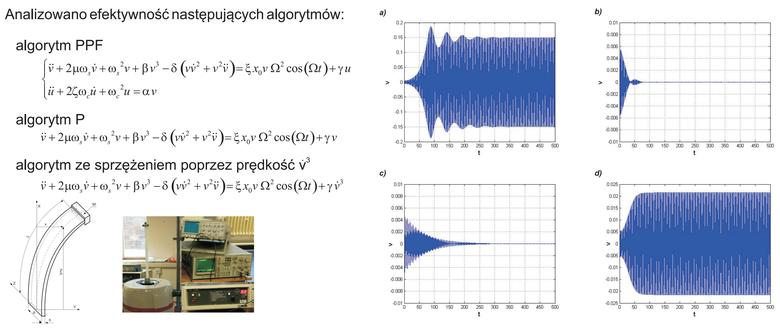
$$\begin{cases} \ddot{v} + 2\mu\omega_v\dot{v} + \omega_v^2 v + \beta v^3 - \delta\left(v\dot{v}^2 + v^2\ddot{v}\right) = \xi x_0 v\,\Omega^2\cos(\Omega t) + \gamma u \\ \ddot{u} + 2\zeta\omega_u\dot{u} + \omega_u^2 u = \alpha v \end{cases}$$

algorytm P

$$\ddot{v} + 2\mu\omega_v\dot{v} + \omega_v^2 v + \beta v^3 - \delta\left(v\dot{v}^2 + v^2\ddot{v}\right) = \xi x_0 v\,\Omega^2\cos(\Omega t) + \gamma v$$

algorytm ze sprzężeniem poprzez prędkość $\dot{v}^3$

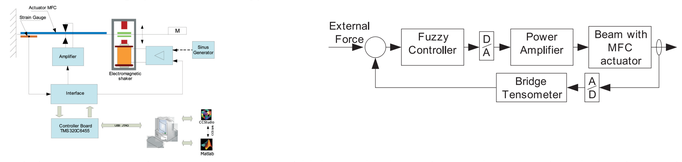
$$\ddot{v} + 2\mu\omega_v\dot{v} + \omega_v^2 v + \beta v^3 - \delta\left(v\dot{v}^2 + v^2\ddot{v}\right) = \xi x_0 v\,\Omega^2\cos(\Omega t) + \gamma\dot{v}^3$$



*Rys. 1. Badany układ i jego odpowiedź: a) bez kontrolera, b) algorytm PPF, c) algorytm P, d) sprzężenie poprzez trzecią potęgę prędkości (wyniki symulacji numerycznych) Experimental setup and numerical time series: a) without control, b) PPF algorithm, c) P algorithm, d) coupling by cubic velocity feedback*

**2. Zastosowanie sterowania rozmytego PI do regulacji piezoelektrycznej struktury kompozytowej.**
**Application of a fuzzy PI controller for active piezoelectric composite structure regulation**

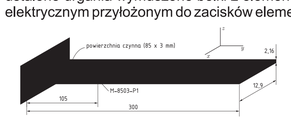
W ramach prowadzonych prac badano tłumienie drgań rezonansowych nieliniowej belki z wbudowanym aktuatorem piezoelektrycznym typu MFC. Zastosowano liniowy i nieliniowy algorytm rozmyty PI. Prace zrealizowano w oparciu o badania laboratoryjne wspomagane obliczeniami i symulacjami w programie Matlab. Eksperymentami zarządzał układ µP zbudowany w oparciu o platformę 64 bitowego procesora DSP typu TMS320C6455.




*Rys. 2. Schemat stanowiska laboratoryjnego oraz schemat blokowy układu ze sterowaniem rozmytym; Laboratory system setup and fuzzy PI controller diagram*

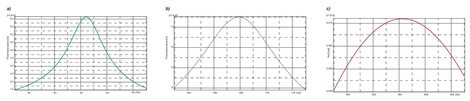
**3. Badanie ustalonych drgań wymuszonych belek kompozytowych z elementami aktywnymi typu MFC w warunkach okołorezonansowych z wymuszeniem sygnałem napięciowym - symulacje w systemie ABAQUS**
**Steady states analysis of a composite beam with embeded active MFC-type element in near resonance conditions by voltage actuation - ABAQUS numerical simuations**

Wyznaczono efektywne własności wytrzymałościowe pojedynczej warstwy materiału kompozytowego (laminy) na podstawie własności materiałowych włókien i wypełniacza kompozytu. Doświadczalne wyznaczono parametry tłumienia materiału kompozytowego konieczne do sporządzenia charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych badanej belki kompozytowej z naklejonym przetwornikiem piezoelektrycznym. Otrzymane wyniki analizy modalnej przetworzono za pomocą analizatora LMS Scadas 305 i oprogramowania LMS TestLab 11B wraz z modułem Impact Test firmy LMS International. Numeryczne zbadano ustalone drgania wymuszone belki z elementem aktywnym typu MFC - układ wymuszany harmonicznie zmiennym napięciem elektrycznym przyłożonym do zacisków elementu aktywnego.




| | mode | 0 [rpm] ntłum. | 0 [rpm] tłumione | 100 [rpm] ntłum. | 100 [rpm] tłumione | 200 [rpm] ntłum. | 200 [rpm] tłumione | 300 [rpm] ntłum. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| xz bending | 1 | 37,90 | 37,88 | 42,46 | 42,44 | 84,45 | 84,44 | 169,88 |
| xy bending | 2 | 167,76 | 167,73 | 167,93 | 167,90 | 170,38 | 170,35 | 179,96 |
| xz bending | 3 | 230,56 | 230,52 | 234,70 | 234,66 | 289,73 | 289,69 | 455,64 |
| torsion | 4 | 563,16 | 562,81 | 563,92 | 563,58 | 575,67 | 575,34 | 623,69 |
| xz bending | 5 | 642,03 | 641,49 | 646,00 | 645,47 | 702,71 | 702,22 | 905,26 |
| xy bending | 6 | 1015,22 | 1012,73 | 1015,96 | 1013,46 | 1026,93 | 1024,47 | 1073,21 |

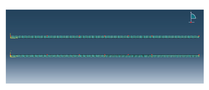
*Rys. 3. Badana próbka i jej częstości drgań własnych; Specimen under consideration and its natural frequencies*



*Rys. 4. Wybrane charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe belki wirującej (100 obr/min). a) pierwsza postać zginania w płaszczyźnie xz, b) pierwsza postać zginania w płaszczyźnie xy, c) pierwsza postać skrętna Selected of a rotating beam (100 rpm). a) first xz bending, b) first xy bending, c) first torsion*

**4. Analiza użyteczności metody identyfikacji uszkodzenia opartej na mapach Poincarégo i obliczaniu dynamicznego wskaźnika uszkodzenia do wykrywania i lokalizowania delaminacji w elementach belkowych**
**Numerical Computation of Damage Index for Delaminated Beam**
Metoda polega na porównaniu dynamicznej odpowiedzi układu zawierającego uszkodzenie na zadane wymuszenie harmoniczne z odpowiedzią układu nieuszkodzonego. Miarą jest dynamiczny współczynnik uszkodzenia D:

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i-1}\sqrt{\left(w_{i,j+1}^b - w_{i,j}^b\right)^2 + \left(\dot{w}_{i,j+1}^b - \dot{w}_{i,j}^b\right)^2} - \sum_{j=1}^{N_i-1}\sqrt{\left(w_{i,j+1}^d - w_{i,j}^d\right)^2 + \left(\dot{w}_{i,j+1}^d - \dot{w}_{i,j}^d\right)^2}}{\sum_{j=1}^{N_i-1}\sqrt{\left(w_{i,j+1}^b - w_{i,j}^b\right)^2 + \left(\dot{w}_{i,j+1}^b - \dot{w}_{i,j}^b\right)^2}},$$



Na podstawie diagramów fazowych i map Poincarégo określa się miejsce i rozmiary uszkodzenia (delaminacji). Mapa Poincarégo, jako dyskretna reprezentacja odpowiedzi dynamicznej układu w przestrzeni fazowej, znacznie zmniejsza ilość danych, zapewnia większą przejrzystość i łatwość interpretacji wyników w porównaniu z portretem fazowym czy przebiegiem czasowym.

**5. Opracowanie metody optymalnej aktywacji kontrolera nasyceniowego w celu minimalizacji stanu przejściowego - badania analityczne oraz numeryczne**
**Methods of an optimal activation of Saturation Controller to minimize transient dynamics- analytical and numerical studies**
Badania analityczne i numeryczne przeprowadzono dla układu elektromechanicznego opisanego równaniami różniczkowymi:

$$\dot{\bar{x}}_1 = -2n_1\bar{x}_1 - \omega_1^2\bar{x}_1 + g_{12}x_1x_2H(t)$$
$$\dot{\bar{x}}_2 = -2n_2\bar{x}_2 - \omega_2^2\bar{x}_2 + g_{11}x_1^2H(t) + qB\Omega^2\cos(\Omega t)$$

– Wykorzystując metodę wielu skal czasowych określono warunek występowania efektu „nasycenia":

$$qB\Omega^2 > \sqrt{\left(\frac{8\omega_1\omega_2}{g_{12}}\left(n_1(\Omega-\omega_2) - \frac{(2\omega_1-\Omega)}{2}n_2\right)\right)^2 + \frac{g_{11}^2}{4}b^2}$$

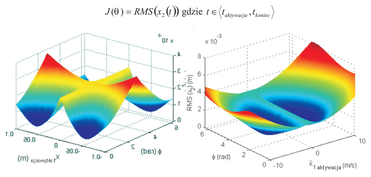
W przeprowadzonych badaniach numerycznych zastosowano dwa warianty dziedziny zmiennych decyzyjnych:

$$\theta = \left(\bar{x}_{1,\text{aktywacja}}, \phi\right) \qquad \theta = \left(\bar{x}_{2,\text{aktywacja}}, \phi\right)$$

gdzie $\bar{x}_{1,\text{aktywacja}}$ i $\bar{x}_{2,\text{aktywacja}}$ są warunkami początkowymi sterownika, $\phi$ początkowym przesunięciem fazowym siły wymuszającej

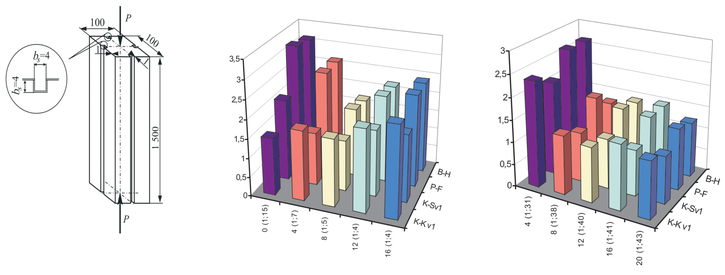
– Przyjęto wskaźnik jakości oceniający wpływ warunków początkowych sterowania na stan przejściowy układu:

$$J(\theta) = RMS\left(x_2(t)\right) \text{ gdzie } t \in \left(t_{\text{aktywacja}}, t_{\text{koniec}}\right)$$



*Rys. 6. Zmiana wskaźnika jakości w zależności od zestawu zmiennych decyzyjnych*
*Change of Quality Index with respect to decision variables selection*

**6. Weryfikacja wybranych kryteriów stateczności dynamicznej w przypadku ściskania słupów o przekrojach poprzecznych posiadających dwie osie symetrii**
**Estimation of dynamic buckling load for thin-walled columns with closed cross sections – different criterions comparison**
W okresie sprawozdawczym zweryfikowano wybrane kryteria stateczności dynamicznej w przypadku ściskania słupów o przekrojach poprzecznych posiadających dwie osie symetrii. Do opisu nieliniowego problemu interakcyjnego wyboczenia zastosowano asymptotyczną teorię Koitera (MAN). Krytyczne wartości współczynnika obciążeń dynamicznego określano stosując kryteria: Budiansky'ego Hutchinsona Rotha, quasi-bifurkacyjnego kryterium Kleibera-Kotuli-Sarana z modyfikacjami wprowadzonymi przez Kubiaka oraz portretów fazowych.



*Rys. 7. Badany ściskany słup zamknięty. Porównanie wartości DLFcr wyznaczonych zgodnie z omawianymi kryteriami stosując MAN. (a) interakcja postaci globalnej i dwóch postaci lokalnych - 1-sze minimum; (b) interakcja postaci globalnej i dwóch postaci lokalnych - 2-gie minimum; Thin–walled column under compression. DLFcr factor for the columns: (a) interaction of global buckling mode with local ones - first minimum (b) interaction of the global buckling mode with two local ones - second minimum*

### Wnioski
*Conclusions*

**1 & 2** Spośród badanych algorytmów sterujących najskuteczniejszy okazał się algorytm PPF - algorytm ten zapewnił całkowite wyeliminowanie drgań belki oraz szybkie osiągnięcie stanu ustalonego. Łatwiejszy w aplikacji jest kontroler P, jednak stan ustalony osiągany jest w tym wypadku po dłuższym czasie niż ma to miejsce w przypadku algorytmu PPF.

To vibrations suppression of parametrically excited structure the most effective was PPF algorithm, which permits to completely elimination of structure vibration and ensure short transient response. However P algorithm is easier to application, steady state response is obtained for longer time.

**3.** Potwierdzono numerycznie możliwość zastosowania sygnału napięciowego do kontrolowania drgań ustalonych struktur kompozytowych, zarówno w przypadku prostych jak i sprzężonych postaci drgań.

The possibility to control the steady-states vibrations of a composite structure by means of voltage actuation is confirmed. This relates to both simple (uni-modal) and combined (coupled) modal shapes.

**4.** Metoda identyfikacji uszkodzenia za pomocą dynamicznego wskaźnika uszkodzenia może znaleźć zastosowanie w lotnictwie do wykrywania i lokalizowania delaminacji w elementach konstrukcyjnych w formie belek, płyt lub powłok, narażonych na występowanie wad ukrytych wad.

The method of damage identification with Damage Index can find an application in aircraft industry for detection and localization of delamination in typical structural elements like beams, plates or shells, which are prone to the hidden flaws occurrence.

**5.** W przypadku zastosowania sterownika nasyceniowego NSC amplituda drgań struktury kompozytowej jest niezależna od amplitudy siły wymuszającej. Przy zastosowaniu różnych warunków początkowych sterowania układ wykazuje znacznie różne stany przejściowe. W celu szybkiego osiągnięcia stanu ustalonego struktura sterownika powinna uwzględniać algorytmy, które określać będą optymalne warunki początkowego sterowania.

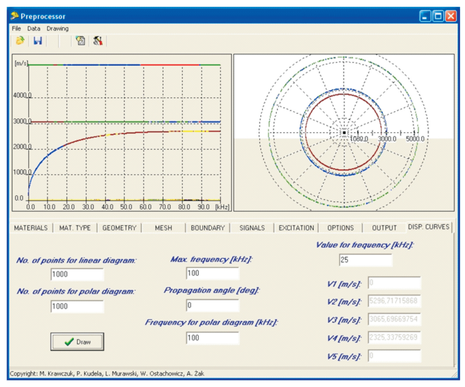
In the case of application of Nonlinear Saturation Control amplitude vibrations of composite structure are independent of the amplitude of excitation. For different initial conditions control system gives very different transient dynamics. To quickly achieve a steady state structure of the controller has to have an algorithm, which will determine optimal initial conditions control.

### Wyniki badań
*Results*

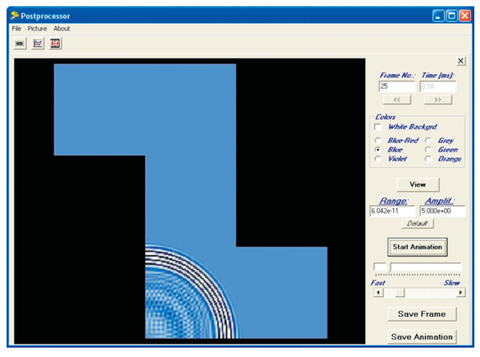
**Opracowanie wersji finalnej programu do symulacji propagacji fal sprężystych EWavePro, który wykorzystuje Metodę Elementów Spektralnych.**

Analiza wykorzystania zjawiska propagacji fal sprężystych (tzw. fal Lamba) do wykrywania i lokalizacji defektów konstrukcji.

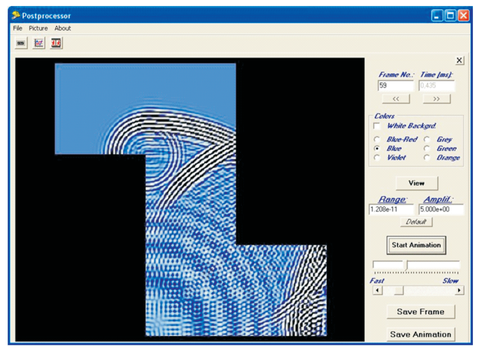
Research was concentrated on development of a final version of EWavePro computer program. This program is designed for simulation of elastic wave proapagtion on the basis of Spectral Element Method.
Investigation also concerned application of elastic waves (Lamb waves) for dmage detection and localization in elements of structures.



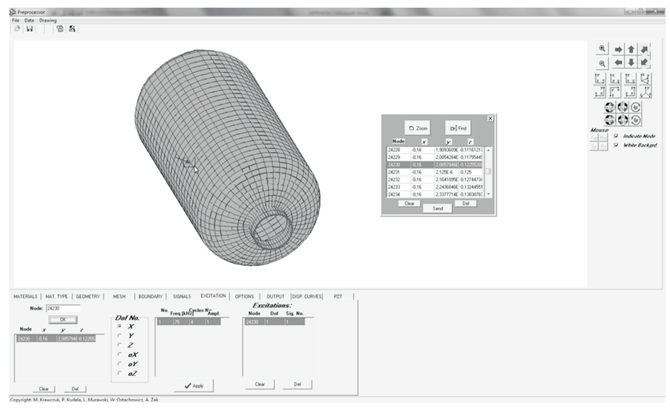
*Rys.1. Okno preprocesora. Wizualizacja krzywych dyspersji fal porapagujacych w wybranym elemencie.*
*Fig.1. Preprocessor window. Dispersion curve vizualization for guided waves propagating in chosen structure.*



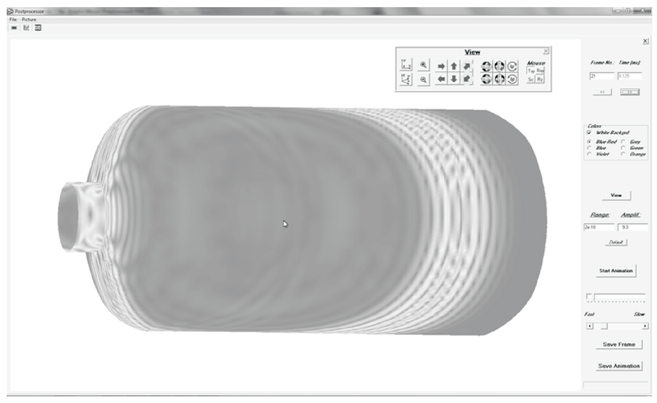
*Rys.2. Wizualizacja propagacji fali w płaskim elemencie w postaci animacji. Klatka 25.*
*Fig.2. Animation of wave propagation visualization in flat element. 25th frame.*



*Rys.3. Wizualizacja propagacji fali w płaskim elemencie w postaci animacji. Klatka 59.*
*Fig.3. Animation of wave propagation visualization in flat element. 59th frame.*



*Rys.4. Modelowanie zbiornika ciśnieniowego. Siatka Elementów Spektralnych.*
*Fig.4. Pressure tank modelling.Spectral Elements mesh.*



*Rys.5. Wizualizacja propagacji fali w zamodelowanym zbiorniku ciśnieniowym.*
*Fig.5. Wave propagation visualization in modelled pressure tank.*

### Wnioski
*Conclusions*

Przygotowano i przetestowano program do modelowania i analizy propagacji fal sprężystych w dwu i trójwymiarowych konstrukcjach cienkościennych. Możliwe jest efektywne modelowanie konstrukcji wykonanych z materiałów izotropowych lub kompozytów laminowanych. Możliwe jest modelowanie wszystkich możliwych rodzajów fal propagujących się w konstrukcjach cienkościennych (ścinających i poprzecznych).

The computer program was prepared and tested. It was designed for modelling an analysis elastic waves propagating in 2D and 3D thin-walled structures. It is possible to model efficiently structures made out of isotropic and laminated composite materials. All types of waves present in in thin-walled structures can be considered (shear and transverse).

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

#### Referaty


1. Dębski H., Latalski J.: ***Numeryczna analiza struktur kompozytowych z piezoelektrycznymi elementami aktywnymi.*** Techniki Komputerowe w Inżynierii, 18-21 października 2011, Skok k. Bełchatowa, Poland.
2. Jarzyna W., Augustyniak M.: ***PD and LQR Controllers Applied to Vibration Damping of an Active Composite Beam.*** 7th International Conference "Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection" ELMECO–7, 28 – 30 September 2011, Nałęczów, Poland.
3. Jarzyna W., Augustyniak M., Warmiński J., Bocheński M.: ***Evaluation of Suppression Methods used for Reduction of Vibrations of the Active Composite Beam.*** 3rd International Conference on Computer, Communication, Control and Automation (3CA 2011), 19 – 20 November 2011, Zhuhai, China.
4. Jarzyna W., Augustyniak M., Wójcik A.: ***Application of a fuzzy PI controller in regulation of active piezoelectric composite structure.*** 7th International Conference: New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, 28 June – 1 July 2011, Zakopane, Poland.
5. Latalski J., Georgiadis F., Warmiński J.: ***Dynamic analysis of a rotating beam with an active piezoelectric element***. II Kongres Mechaniki Polskiej, Poznań 28-32 sierpnia 2011.
6. Latalski J., Georgiades F., Warmiński J.: ***Mode shapes variation of a composite beam with piezoelectric patches***. VIII Krajowe Forum Wiropłatowe, 18 czerwca 2011, Warszawa.
7. Mitura A., Warmiński J., Bocheński M., Kaźmir T., Augustyniak M., Jarzyna W.: ***Optimization of NSC controller in two-dimensional parameters space***, ENOC 2011 7th European Nonlinear Dynamics Conference, 24- 29 July 2011, Rome, Italy
8. Warmiński J., Mitura A., Bocheński M., Jarzyna W., Augustyniak M., Filipek P.: ***Aktywne tłumienie drgań lekkich struktur kompozytowych z zastosowaniem elementów aktywnych oraz nieliniowego sterowania***, II Kongres Mechaniki Polskiej, 28-31 sierpień 2011, Poznań, Polska
9. Warmiński J., Mitura A., Bocheński M., Kaźmir T., Jarzyna W., Augustyniak M., Filipek P.: ***Analysis of active vibration suppression by application of macro fiber composite***, 19th French-Polish Seminar of Mechanics, 8-11 June 2011, Perpignan, France


#### Publikacje


1. Dębski H., Latalski J.: ***Numerical Analysis of Composite Structures with Embedded Piezoelectric Active Elements.*** (praca wysłana do redakcji czasopisma *Journal of Kones*).
2. Latalski J.: ***Modelowanie w systemie ABAQUS piezoelementów aktywnych typu MFC***. *Eksploatacja i Niezawodność --- Maintenance and Reliability* 2011, 52(4): 72--78.
3. Latalski J., Georgiades F., Warmiński J.: ***Mode shapes variation of a composite beam with piezoelectric patches***. *Zeszyty Naukowe Instytutu Lotnictwa* --- praca przyjęta do druku.
4. Mitura A., Warmiński J., Bocheński M.: ***Active vibration suppression by application of macro fiber composite***. (praca wysłana do redakcji czasopisma *Machine Dynamics Research*)
5. Warmiński J., Bocheński M., Jarzyna W., Filipek P., Augustyniak M.: ***Active suppression of nonlinear composite beam vibrations by selected control algorithms.*** *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16(5), 486-508.


#### Monografie


1. Warmiński J.: Nieliniowe postacie drgań. Układy dyskretne, PWN 2011.


#### Prace mgr, dr, hab.

**Prace magisterskie**

- Mateusz Zasada: Estymatory Kalmana w napędzie elektrycznym i mechatronicznym. Promotor: dr hab.. inż. Wojciech Jarzyna
- Adam Wójcik: Badanie regulatorów rozmytych w układzie mechatronicznym. Promotor: dr hab. inż. Wojciech Jarzyna
- Jarosław Dziura: Układy zasilania kompozytów piezoelektrycznych w lotnictwie. Promotor: dr hab. inż. Wojciech Jarzyna


**PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO**