

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

## Materiały inteligentne oraz bazujące na nich systemy zespolone do zastosowania w lotnictwie

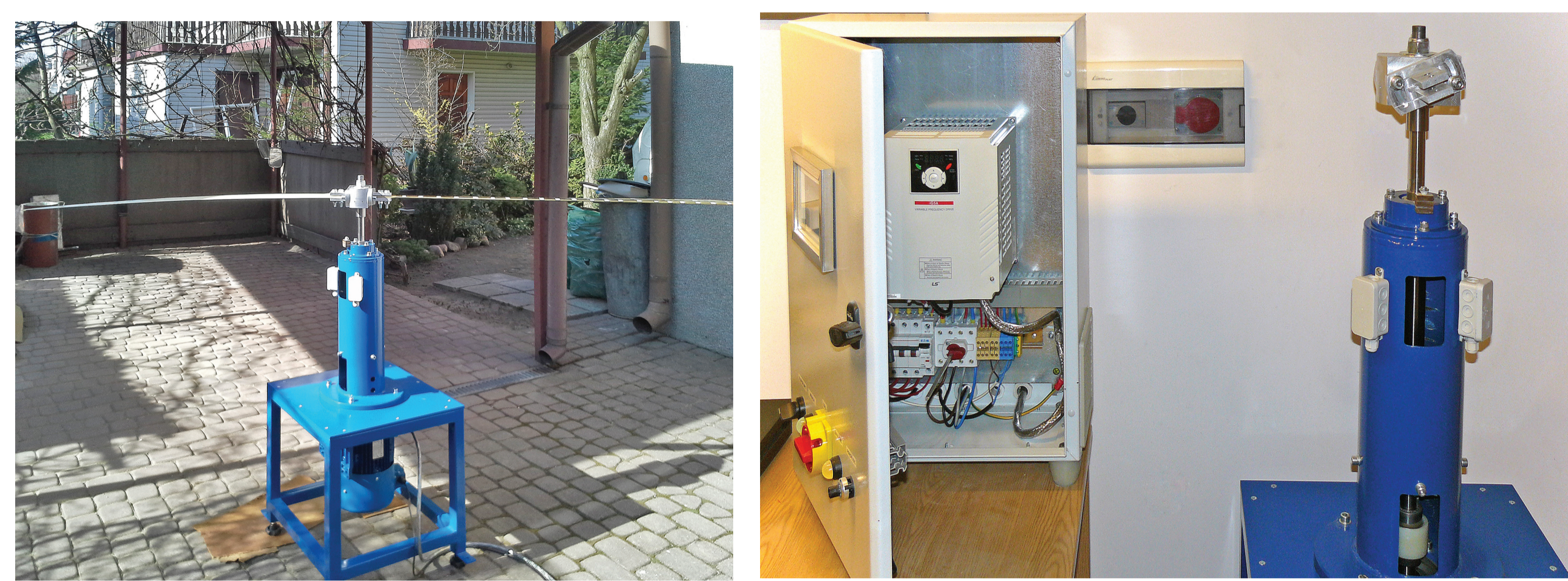
### Smart Materials & smart embedded systems in aerospace applications

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. Stanowisko do badań dwułopatowego modelu wirnika nośnego Test stand for double-blade rotor testing

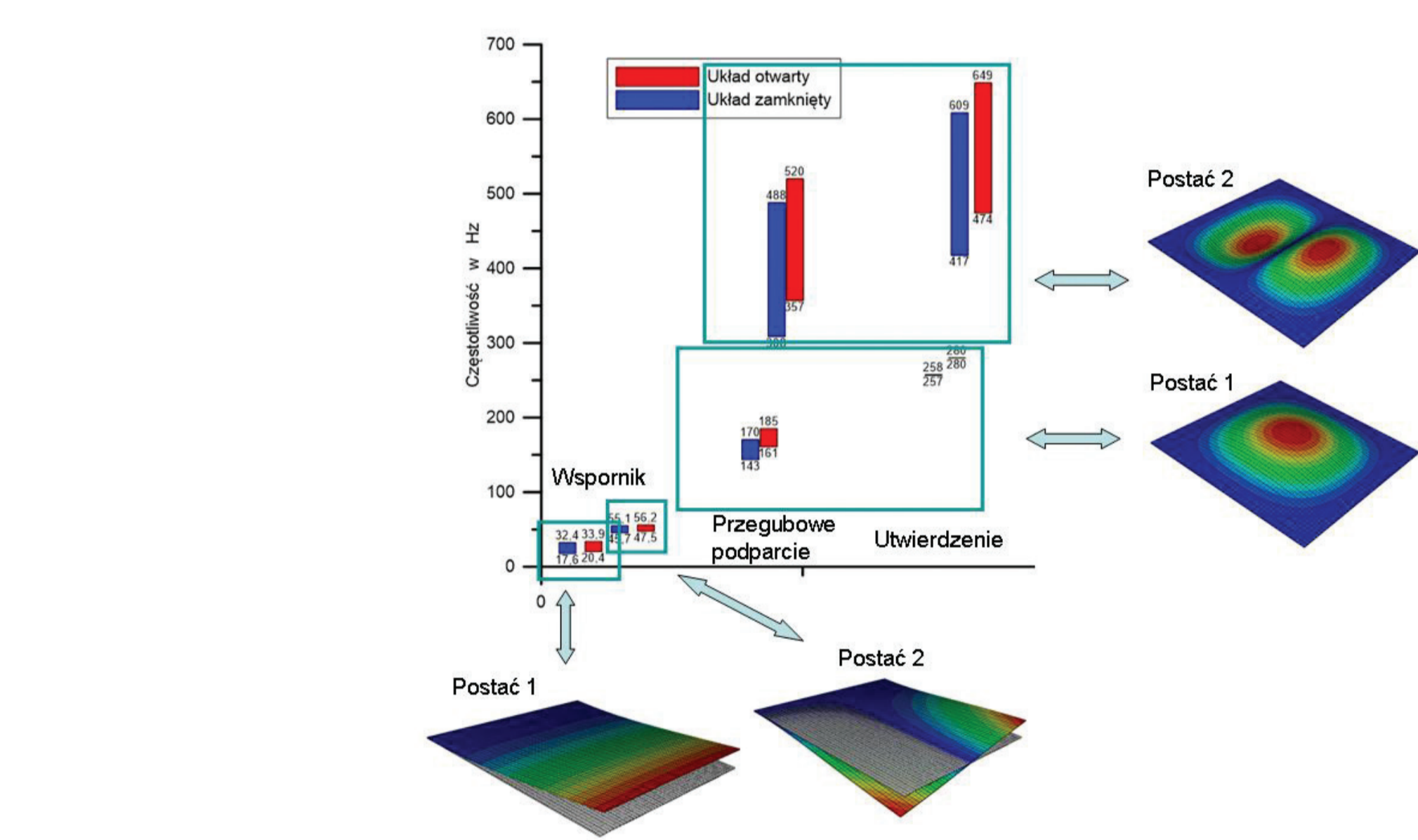
Stanowisko wyposażone jest w przemiennik częstotliwości (falownik) LG serii iG5A współpracujący z wbudowanym silnikiem trójfazowym o mocy 5,5kW i max prędkości 1500 obr/min. Metoda sterowania: wektorowa bezczujnikowa z liniową, kwadratową lub programowaną 5-punktową charakterystyką momentu obrotowego. Oprogramowanie falownika Drive View 7 umożliwia podgląd parametrów tj. napięcie, prąd, moc, moment obrotowy, prędkość obrotowa i częstotliwość pracy falownika.



Rys. 1. Model wirnika dwułopatowego z układem sterowania  
Fig. 1. Double blade rotor model and control device

#### 2. Ocena wpływu warstw piezoelektryków na częstotliwości drgań własnych płyty kompozytowej Impact of embedded piezoelectric layers on rectangular composite plate natural frequencies

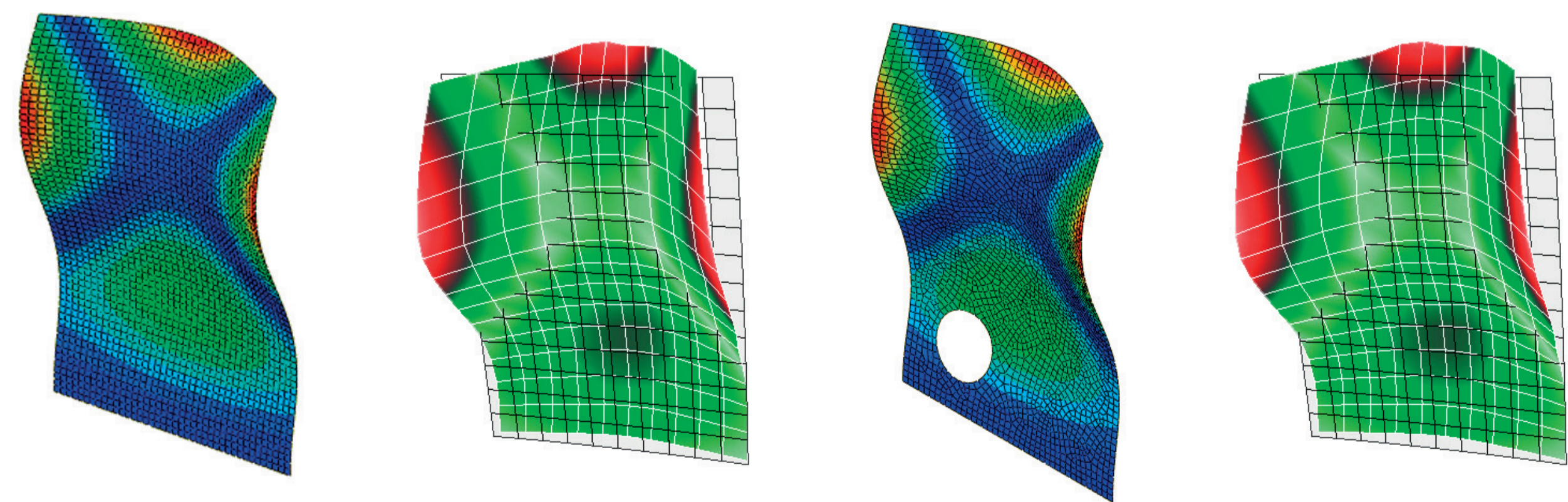
Przedmiotem analizy jest kwadratowa płyta kompozytowa w różnych warunkach brzegowych wykonana z jednodierunkowej taśmy grafitowo-epoksydowej T300/976 o następującym układzie warstw: [piezo/0/θ]. Kąt θ ułożenia warstw kompozytu zmienia się w pełnym zakresie. Grubość pojedynczej warstwy kompozytu wynosi 0,25mm, zaś grubość warstwy elementu aktywnego wynosi 0,1mm. Długość boku płyty kwadratowej wynosiła 120mm. Dla badanego układu płytowego przeprowadzono analizę modalną polegającą na wyznaczeniu częstości i postaci drgań własnych w przypadku, gdy zewnętrzne warstwy PZT był zwarte (tj. zadano potencjał: 0V na zewnętrznych okładzinach piezoelektryka) oraz otwarte (tj. potencjał nie był zadany na zewnętrznych warstwach PZT).



Rys. 2. Wpływ układu warstw oraz efektu PZT na częstości drgań własnych prostokątnej płyty kompozytowej  
Fig. 2. Impact of laminae stacking sequence and PZT effect on rectangular laminate plate natural frequencies

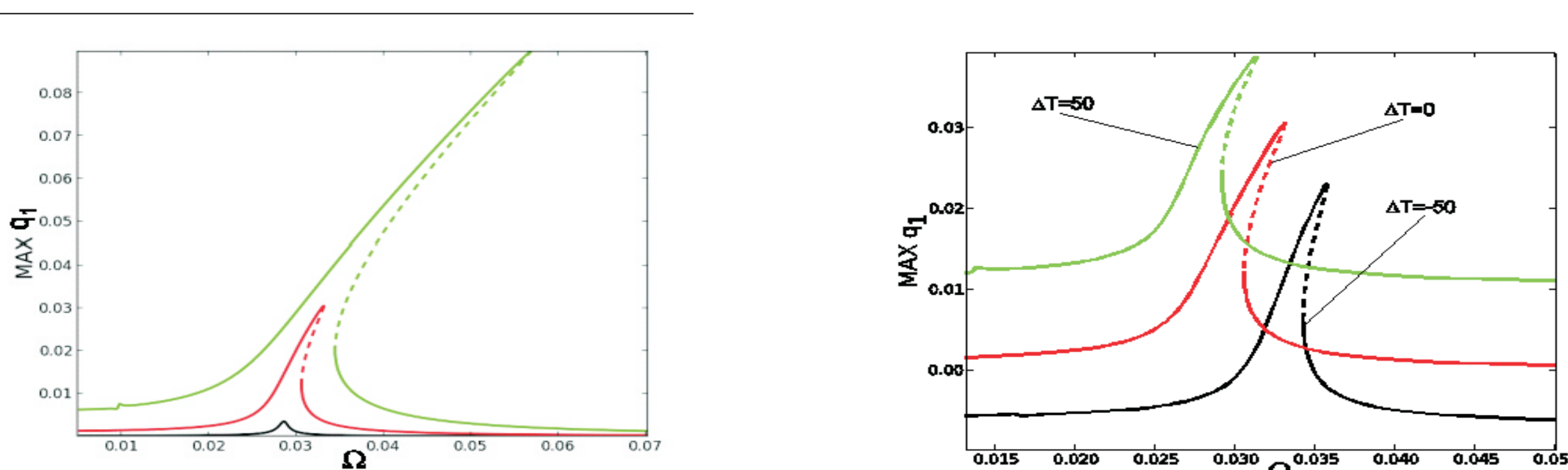
#### 3. Zastosowanie wibrometru laserowego 3-D do określania częstości drgań własnych płyt kompozytowych z uszkodzeniem Application of 3-D laser scanning vibrometer in determination of free vibration frequencies of composite plates with damage

Główną ideą przeprowadzonych badań porównawczych była ocena możliwości wykorzystania wibrometrii laserowej 3D do badania wpływu wad materiałowych występujących w płytach kompozytowych na właściwości dynamiczne tego typu struktur. Analizowano częstości drgań własnych oraz wygląd odpowiadających im postaci drgań własnych poprzez porównanie wyników badań próbek wykonanych z laminatu szklano-epoksydowego wolnego od uszkodzeń oraz z wadami. Do potrzeb eksperymentu przygotowano 8 warstwowe płyty szklano-epoksydowe o różnym ułożeniu warstw laminatu. Równolegle przeprowadzono analizy numeryczne z wykorzystaniem oprogramowania metody elementów skończonych ABAQUS. Badane uszkodzenia materiałowe symulowano za pomocą okrągłych otworów. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 3.

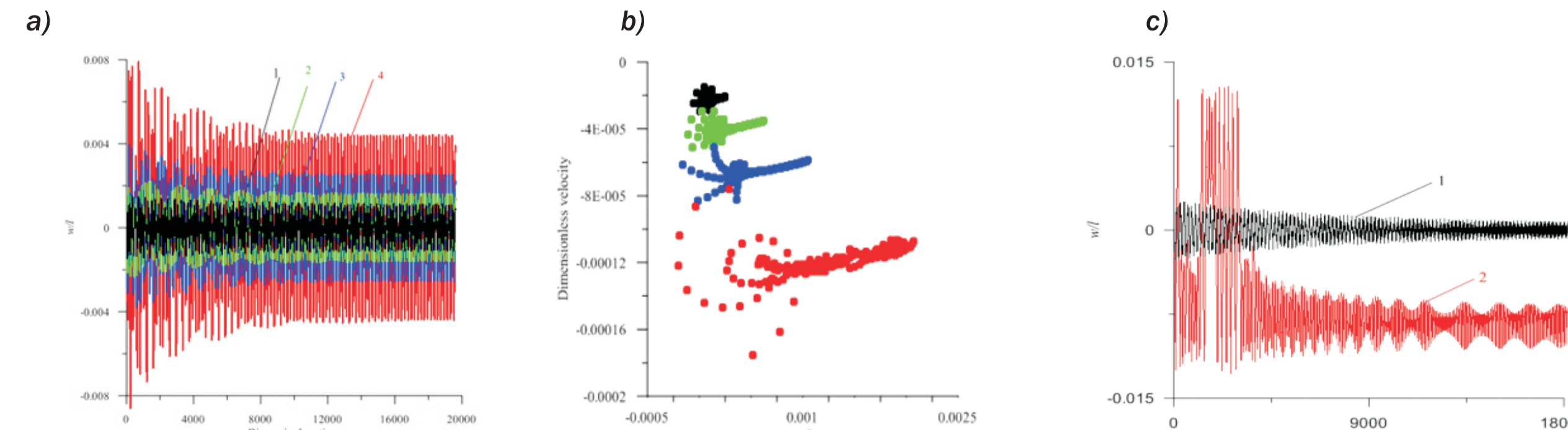


Rys. 3. Wybrane postacie drgań własnych płyty kompozytowej. a) płyta bez uszkodzeń, b) płyta z symulowanymi wadami  
Fig. 3. Selected mode shapes of composite plates obtained numerically and experimentally: a) intact plate, b) plate with a hole

#### 4. Badania dynamiki belek w warunkach obciążeń termicznych; ocena wpływu delaminacji Dynamics of composite beam subjected to thermal loads; delamination impact estimation



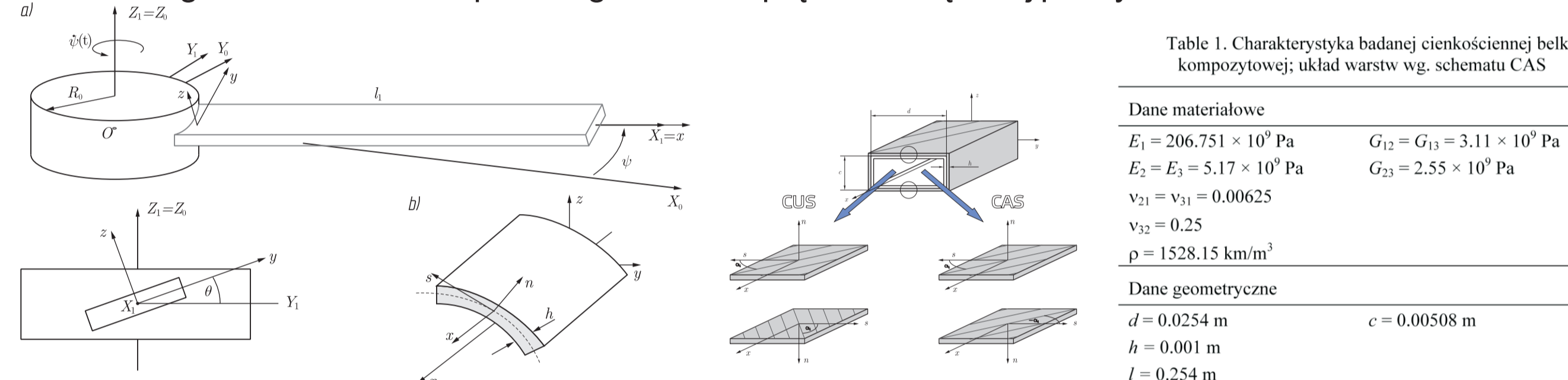
Rys. 4. Krzywe rezonansowe wyznaczone w pobliżu pierwszego rezonansu układu. Amplituda wymuszenia odpowiednio: p=1x10-7 (kolor czarny), p=1x10-6 (kolor czerwony), p=5x10-6 (zielony); Symulacje w warunkach: (a) bez zmian temperatury układu ΔT=0, (b) zmiana temperatury ΔT=50, T=0, ΔT=50 (b).  
Fig. 4. Resonance curves near the first resonance zone for T=0 and selected amplitudes of excitation p=1x10-7 (black), p=1x10-6 (red), p=5x10-6 (green) (a); the temperature influence for p=1x10-6, T=50, T=0, ΔT=50 (b).



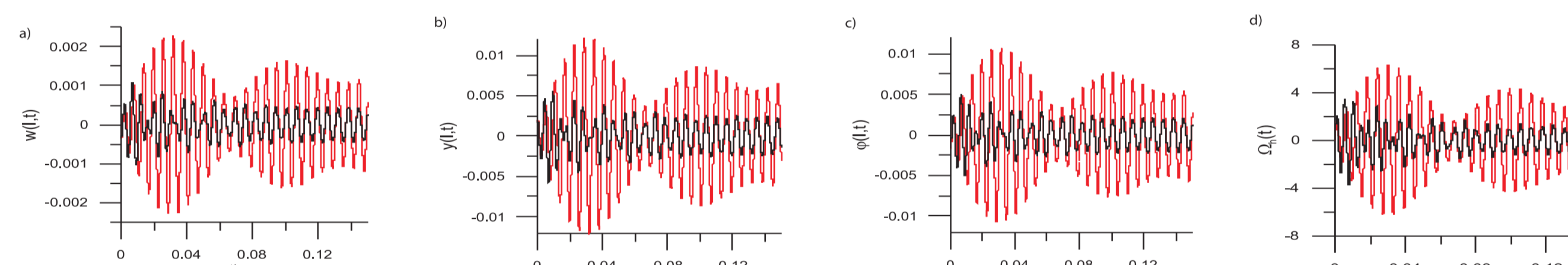
Rys. 5. (a) odpowiedzi dynamiczne belki (w punkcie będącym środkiem obszaru delaminacji) na wymuszenie harmoniczne. P = 150 N/m, ω = 324 rad/s. 1 (kolor czarny) – belka bez delaminacji ΔT=0; 2 (kolor zielony) – ΔT=10; 3 (kolor niebieski) – ΔT=30; 4 (kolor czerwony) – ΔT=50. (b) Mapy Poincare odpowiedzi belki (w punkcie będącym środkiem obszaru delaminacji) na wymuszenie harmoniczne. P = 150 N/m, ω = 324 rad/s. 1 (kolor czarny) – belka bez delaminacji ΔT=0; 2 (kolor zielony) – ΔT=10; 3 (kolor niebieski) – ΔT=20; 4 (kolor czerwony) – ΔT=30; 5 (kolor fioletowy) – ΔT=50. (c) Przebiegi czasowe drgań wymuszonych belki w polu obciążeń termicznych 1 – ΔT = 30K; 2 – ΔT = 50 K.

#### 5. Drgania giętno-skrętne wirujących belek kompozytowych mocowanych do piasty z nieidealnym źródłem energii Coupled flexural-torsional vibrations of a rotating composite beam with a non-ideal energy source

Wyprowadzono równania różniczkowe ruchu wirującej cienkościennej belki kompozytowej mocowanej do piasty z nieidealnym źródłem energii. Ponieważ model wiruje w poziomej płaszczyźnie poziome nie zostały uwzględnione w obliczeniach siły grawitacji. W wyprowadzonych równaniach różniczkowych ruchu założono, że drgania wahadła są małe, a ortotropowy materiał kompozytu jest idealnie sprężysty. Przeprowadzono symulacje numeryczne porównując dynamikę układu w przypadku małej bądź dużej masy piasty. Wyznaczono krzywe rezonansowe oraz przebiegi czasowe przemieszczeń poprzecznych swobodnego końca belki oraz przebiegi czasowe prędkości kątowej piasty.



Rys. 7. Model badanej wirującej belki kompozytowej z nieidealnym źródłem energii  
Fig. 7. Rotating composite beam model with non-ideal energy source



Rys. 8. Przebiegi czasowe przemieszczenia poprzecznego końca belki w(t,t) (a), kąta obrotu przekroju poprzecznego φ(t,t) (b), kąta skręcenia ω(t,t) (c) oraz prędkości kątowej piasty Ω(t,t) (d) dla danych zestawionych w Tab. 1. Piasta aluminiowa – kolor czarny, piasta stalowa – kolor czerwony.  
Fig. 8. Time histories of the displacement w(t,t) (a), angle of cross-section rotation φ(t,t) (b), angle of twist ω(t,t) (c) at the tip point, and angular velocity of the hub Ω(t,t) (d), computed for data as in Tab. 1. Aluminium hub – black colour, Steel hub – red colour

#### Wyniki badań Results

- Ad. 1. Dotychczas uzyskane wstępne wyniki pomiarów potwierdzają wysoką użyteczność opracowanego stanowiska badawczego. W ramach oceny sprawdzono zarówno mechaniczne aspekty konstrukcji stanowiska, jak również wybrany sposób sterowania prędkością ruchu obrotowego piasty.
- Ad. 2. a) Płyta ze zwartymi warstwami aktywnymi PZT zachowuje się jak układ niewykazujący własności piezoelektrycznych. Różnica częstości w tych przypadkach nie przekracza 0,5%. b) W przypadku układu otwartego stwierdzono wzrost częstości drgań własnych o kilka procent (od 5% do 9%) w porównaniu do układu zamkniętego w przypadku, gdy płyta była zamurowana na jednej krawędzi. c) W przypadku, gdy wszystkie krawędzie płyty były przegubowo podparte lub utwierdzone stwierdzono istotny wzrost częstości drgań własnych w przypadku układu otwartego.
- Ad. 3. Przeprowadzone eksperymenty wykazały dużą zgodność pomiędzy wynikami badań stanowiskowych i symulacji numerycznych. Obserwowane różnice pomiędzy częstościami drgań struktur uszkodzonych oraz wolnych od wad pozwalają na jednoznacznie ocenę ich stanu za pomocą badań laserowych wibrometrem 3D.
- Ad. 4. a) wykazano, że nierównomierne pole obciążeń termicznych istotnie wpływa na dynamikę belek drgających. Występujący efekt niewielkiego, wstępnego odkształcenia warstwy obojętnej prowadzi do powstania nowych punktów bifurkacji oraz zmienia przebieg charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych. b) w toku przeprowadzonych symulacji wykazano, że zmiana warunków obciążeń termicznych może prowadzić, w przypadku belek kompozytowych, do złożonych efektów nieliniowych. Stwierdzono ponadto możliwość wystąpienia ruchów nieokresowych układu, a także wybożenia struktury. Przeprowadzone symulacje udowodniły tym samym konieczność uwzględnienia zmian temperatury drgających struktur kompozytowych w badaniach dynamiki tego typu układów. c) badając wpływ wielkości zmian temperatury na dynamikę układu, stwierdzono że zwiększenie obciążeń termicznych prowadzi do wzrostu amplitudy drgań; efekt ten jest szczególnie dobrze widoczny w przypadku belek z międzywarstwowym uszkodzeniem struktury.

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

#### Referaty

- Teter A., Gawryluk J.: *Zastosowanie metody elementów skończonych do oceny wpływu warstw piezoelektryków na zachowanie płyty kompozytowej*. XIII Konferencja Naukowo-Techniczna TKI2014, Techniki Komputerowe w Inżynierii w Licheniu Starym, 6-9.05.2014 r. Streszczenia str. 189-190.
- Warmińska A., Warmiński J., Manocha E.: *Thermal effects on internal and external resonances of a nonlinear Timoshenko beam*. Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2014, DETC2014-34078, August 17-20, 2014, Buffalo, New York, USA
- Warmiński J., Latański J., Szmít Z.: *Coupled flexural-torsional vibrations of a composite beam attached to a rotating hub*, EURO DYN 2014, Porto 29.06.-3.07.2014
- Mannoach E., Warmiński J., Warmińska A.: *Large amplitude vibrations of Timoshenko beams with delamination in temperature environment*, EURO DYN 2014, Porto 29.06.-3.07.2014
- Warmińska A., Mannoach E., Warmiński J.: *Dynamics of Timoshenko beam under mechanical and thermal loadings* ENOC 2014, July 6-11, 2014, Vienna, Austria
- Mannoach E., Warmiński J., Warmińska A.: *Large amplitude vibrations of Timoshenko beams with delamination and delamination detection*, ENOC 2014, Vienna 6.-11.07.2014
- Latański J., Warmiński J.: *On coupled vibrations of thin-walled rotating composite beams: parametric studies*, ENOC 2014, Vienna 6.-11.07.2014
- Samborski S.: *Numerical modeling of delamination influence on mechanical characteristics of composite cantilever beam*. XIII Konferencja Naukowo-Techniczna TKI2014, Techniki Komputerowe w Inżynierii w Licheniu Starym, 6-9.05.2014 r. Streszczenia str. 159-160

#### Publikacje

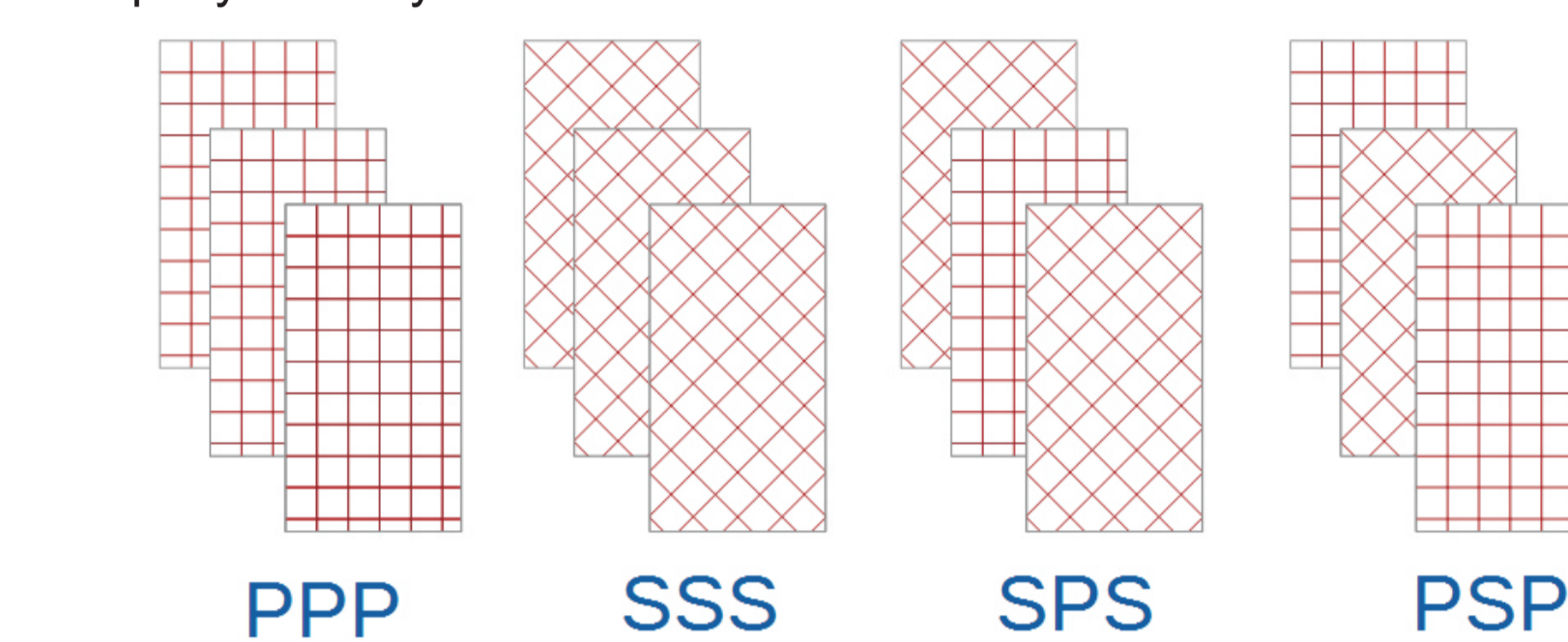
- Latański J., Bocheński M., Warmiński J., Jarzyna W., Augustyniak M.: *Modelling and simulation of 3 blade helicopter's rotor model*. Acta Physica Polonica A, (praca po pozytywnej recenzji)

#### Wyniki badań Results

#### Opracowanie technologii wytwarzania materiałów kompozytowych bazujących na piezo-włóknach Development of technology for production of composite materials based on piezo-fibers

#### Wybór materiałów i przygotowanie próbek Materials selection and preparation of samples

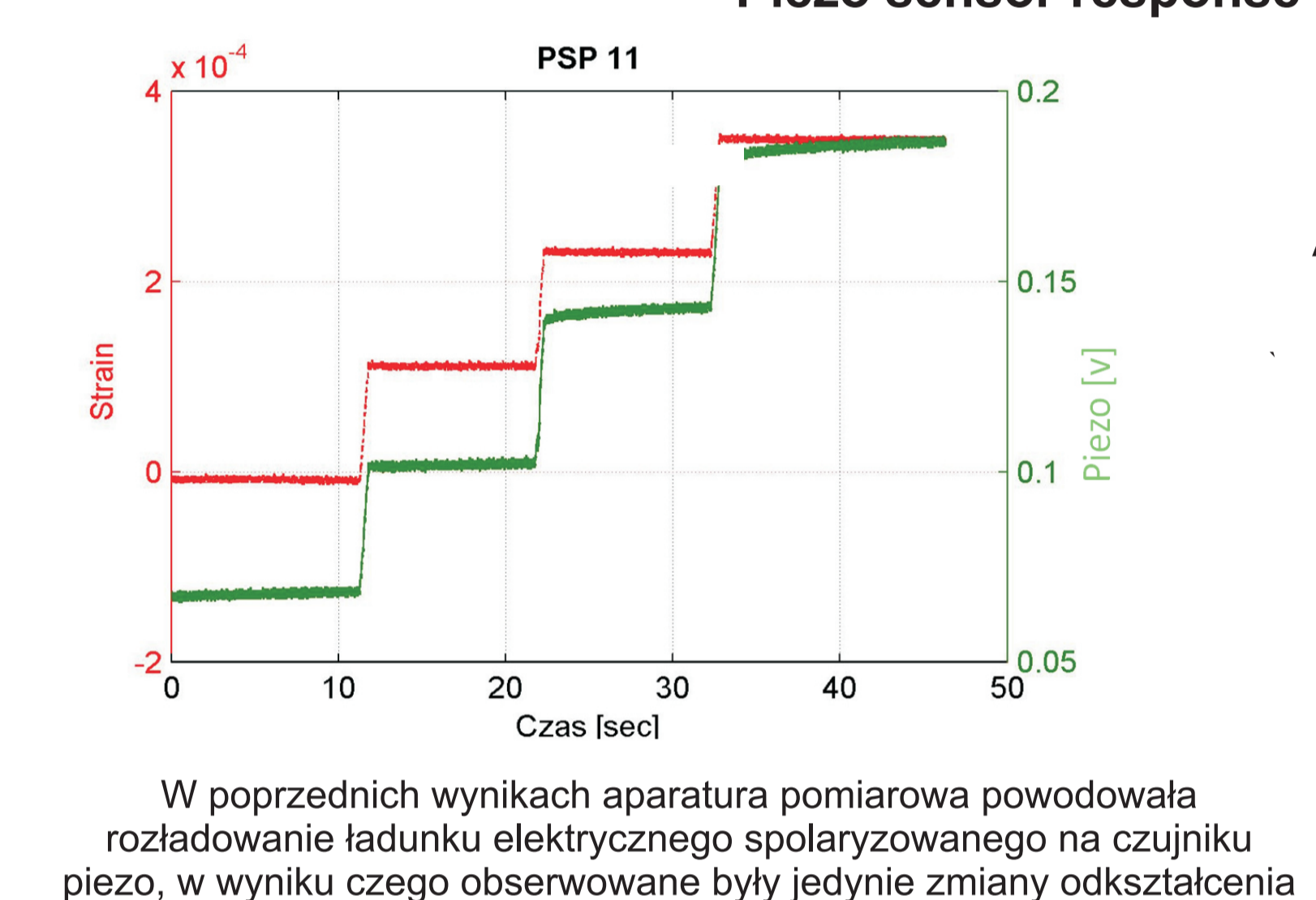
Trójwarstwowy, symetryczny kompozyt szklany wykonany z tkaniny 0/90° oraz żywicy EP53 stanowi próbkę bazową. Na jej powierzchni przyklejono piezoelektryczny czujnik odkształceń. Badano wpływ relatywnie sztywnego czujnika na cienki kompozyt szklany.



P - tkanina szklana zorientowana w układzie 0/90° w stosunku do osi symetrii próbki  
S - pod kątem 45°  
P - glass fabric oriented 0/90° with respect to the symmetry axis of the sample  
S - 45°

Rys. 1. Cztery typy badanych próbek kompozytowych  
Fig. 1. Four types of investigated composite samples

#### Badanie odpowiedzi czujnika piezo Piezo sensor response research



Zastosowanie nowego osprzętu pomiarowego pozwoliło na pomiar odpowiedź czujnika piezo w dużo bardziej liniowej zależności

Application of new measuring hardware allowed for measuring the piezo sensor in a much more linear relationship

Rys. 2. Odpowiedź z tensometru i czujnika piezo na kolejne wymuszenie skokiem jednostkowym

Fig. 2. Subsequent step function load response from strain gauge and piezo sensor

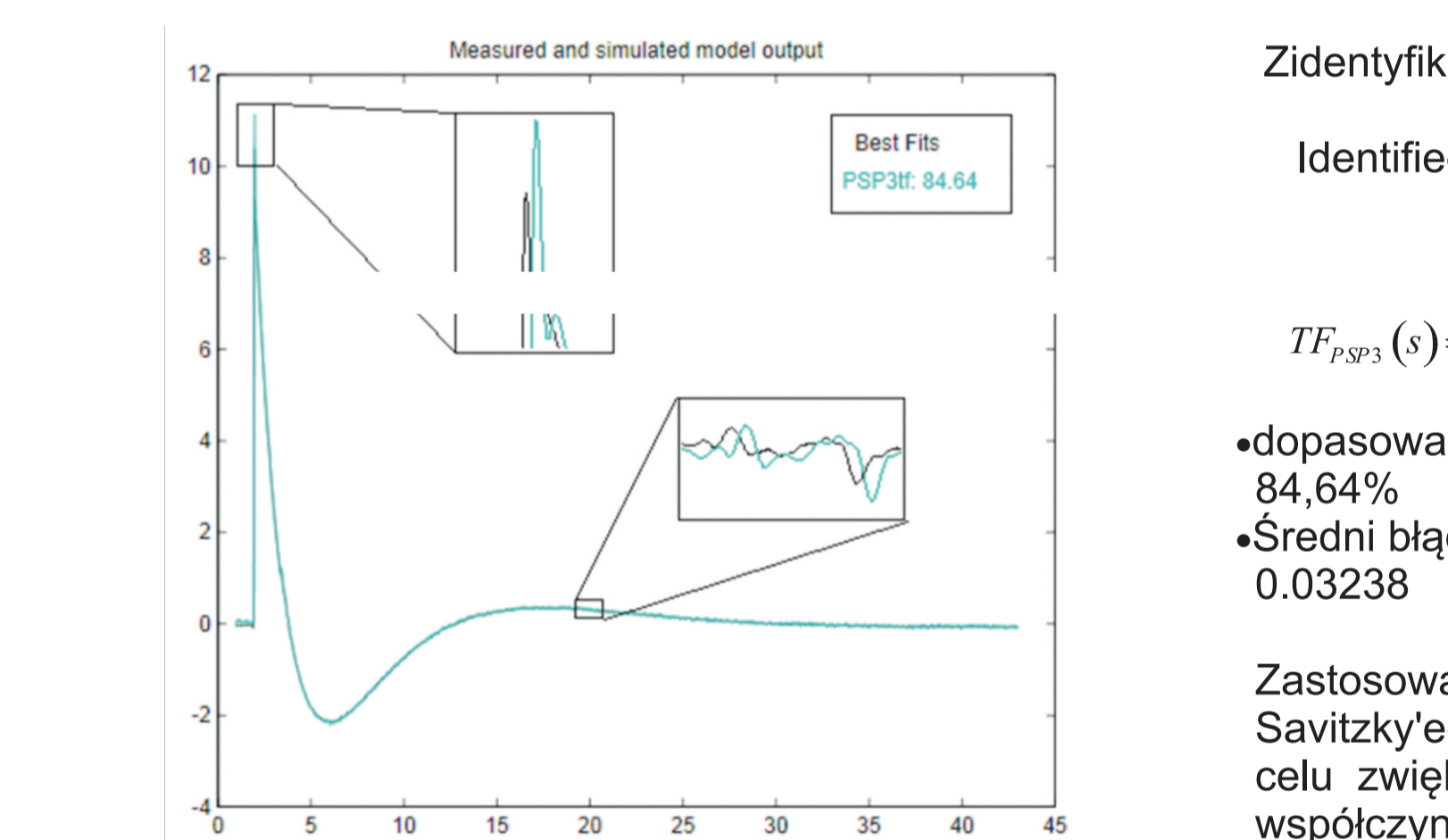
W poprzednich wynikach aparatura pomiarowa powodowała rozładowanie ładunku elektrycznego spolaryzowanego na czujniku piezo, w wyniku czego obserwowane były jedynie zmiany odkształcenia

The results of previous measuring apparatus to cause discharge of the electric charge polarized by piezo sensor, whereby only changes of deformation were observed

Rys. 3. Odpowiedź układu uzyskana na poprzednim osprzęcie

Fig. 3. The system response obtained on the previous accessory

#### Określenie transmitancji czujnika piezo Transfer function of the piezo sensor investigation



Rys. 4. Rzeczywiste oraz zasymulowane wyjście modelu  
Fig. 4. Measured and simulated model output

#### Korelacja wzajemna sygnałów Cross-correlation of signals

Zidentyfikowana transmitancja elementu MFC na podstawie eksperymentu dla próbki typu PSP

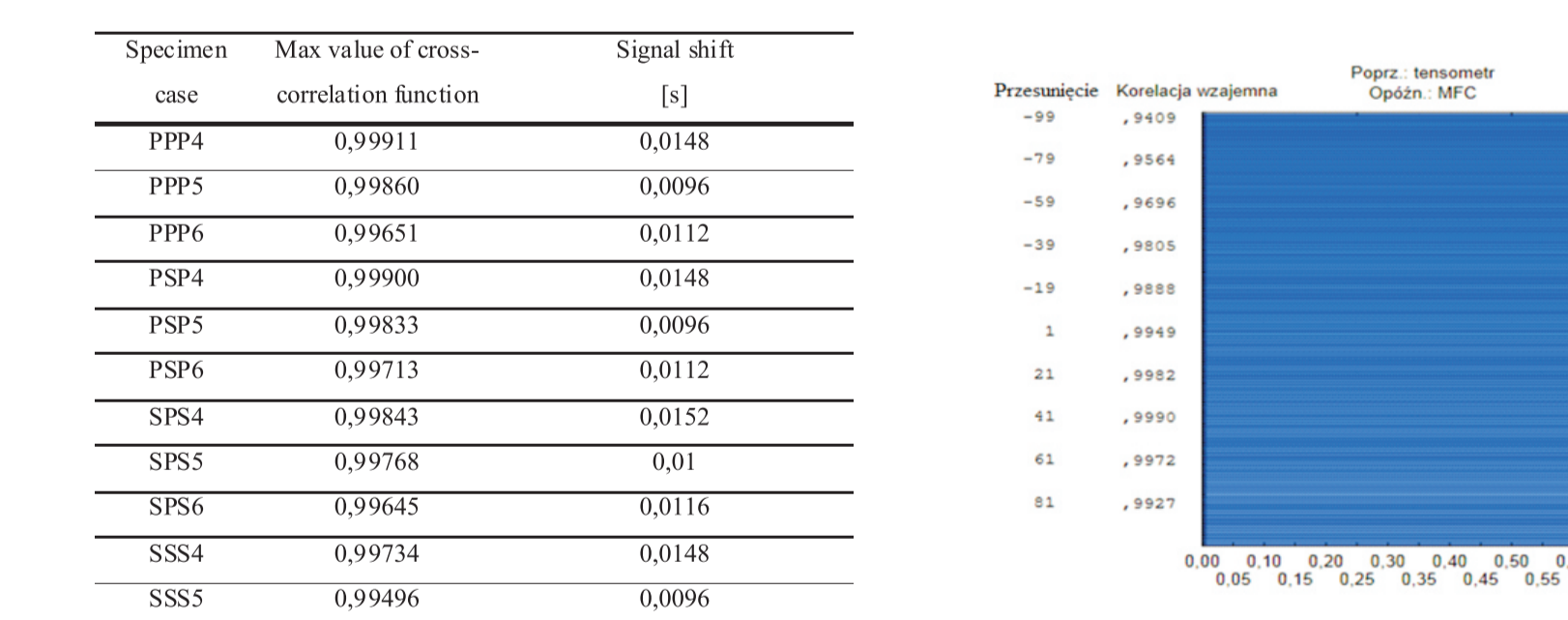
Identified element MFC transmittance based on the PSP specimen type experiment

$TF_{PSP}(\omega) = \frac{3,799e-08s^2 - 2,367e-07s + 1,384e-06s - 6,654e-04}{s^4 + 128,2s^3 + 1,429e04s^2 + 1,287e04s + 3522s + 355,5}$

dopasowanie do danych: 84,64%  
Średni błąd kwadratowy 0,03238

Zastosowano filtrację Savitzky'ego-Golaya, w celu zwiększenia współczynnika SNR

Savitzky-Golay filter was used, to increase the SNR coefficient



Rys. 5. Wykres wartości funkcji korelacji wzajemnej dla PPP

Fig. 5. Chart of cross-correlation function for PPP specimen

#### Wnioski Conclusions

dynamika odpowiedzi czujnika MFC na wymuszenie na próbkach kompozytowych jest różna z uwagi na strukturę zbrojenia próbki. Czujniki na próbkach o strukturze PPP i SSS wykazują wyższą dynamikę od tych na próbkach PSP i SPS

Urządzenia MFC wykazuje wysoką korelację z wartością zmierzonego przy pomocy tensometru odkształcenia, szczególnie w przypadku zmian periodycznych o częstotliwościach powyżej 1Hz

dynamic response of the MFC sensor to load on composite samples is different due to the reinforcement structure of the sample. Sensors on samples with the structure of a PPP and SSS show a higher dynamics of these samples PSP and SPS

MFC has a high correlation with the value measured by resistive strain gauge, especially when the periodic changes of the frequency is above 1 Hz

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

Czujnik odkształceń poszycia. Strain sensor.  
Aktywny tłumik drgań. Active vibration dumper.

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

- Prace magisterskie i doktorskie
- Witold Rządowski: *"Badanie stanu odkształceń materiałów kompozytowych z zastosowaniem czujników piezoelektrycznych"*. Przewód doktorski otwarty w listopadzie 2012.
- Tomasz Bońkowski: *"Badania eksperymentalne właściwości mechanicznych i elektrycznych czujników MFC"*. Praca magisterska obroniona.
- Wiktor Nalewaj: *"Numeryczne symulacje interakcji kompozytu szklanego i piezoelektrycznego czujnika odkształceń"*. Planowane ukończenie wczesień 2014.