

## Metody modelowania, identyfikacji i prognozowania uszkodzeń w elementach konstrukcji

Kontynuowano prace dotyczące modelowania zjawiska propagacji fal sprężystych w elementach konstrukcji ze szczególnym ich ukierunkowaniem na wykorzystanie do opracowania i budowy systemów monitorowania stanu technicznego elementów konstrukcji lotniczych. Do modelowania zjawiska propagacji fal sprężystych wykorzystano rozwiniętą metodę spektralnych elementów skończonych w dziedzinie czasu. W zakresie rozwoju stosowanej metody opracowano nowe autorskie rodzaje elementów jednowymiarowych wyższych rzędów, tj. dwu-, trzy- i czteromodowe prętowe spektralne elementy skończone do modelowania i analizy propagacji fal wzdłużnych w układach prętowych. Zaproponowano również dwu-, trzy- i czteromodowe belkowe spektralne elementy skończone do modelowania i analizy propagacji fal giętnych w układach belkowych. Opracowano nowy trójwymiarowy model piezoelektrycznego elementu spektralnego. Model ten uwzględnia sprzężenie elektro-mechaniczne w zakresie liniowym i umożliwia modelowanie zjawiska wzbudzenia oraz rejestrowania fal sprężystych przez elementy piezoelektryczne oraz analizę charakterystyk przetworników piezoelektrycznych.

W ramach badań związanych z lokalizacją i identyfikacją uszkodzeń prowadzono prace badawcze, które dotyczyły opracowania i budowy specjalnych

## Methods of analysis and detection of damages in structural elements

*Continued have been works on modeling of propagation of elastic waves with a particular attention paid to their utilization in development and assembly of monitoring systems of the technical state of elements in aircraft structures. In modeling of elastic wave propagation applied was a developed earlier method of final spectral finite elements in time domain. In the area of development of the method elaborated were new original types of one-dimensional finite elements of higher order, i.e. two-, three- and four-mode rod spectral finite elements for modeling and analysis of longitudinal waves propagation in rod systems. Postulated also were two-, three- and four-mode beam spectral finite elements for modeling and analysis of bending waves propagation in beam systems. Developed has been a new three-dimensional model of piezoelectric spectral element. The model considers electrical and mechanical couplings in the linear range and enables modeling of the phenomenon of inducing and recording elastic waves in piezoelectric elements and analysis of characteristics of piezoelectrical transducers.*

*In the frame of investigations related to localization and identification of damages carried out were research works, which regarded development of special algorithms and computer codes for measured signal processing obtained both by numerical simulations and labora-*

algorytmów oraz programów komputerowych do obróbki sygnałów pomiarowych uzyskanych zarówno na drodze symulacji numerycznych jak i pomiarów laboratoryjnych. Opracowano algorytm lokalizacji uszkodzeń w kompozytowych elementach konstrukcji wykorzystujący przetworniki piezoelektryczne w układzie tworzącym sieć trójkątów, zmodyfikowaną metodę paska przetworników, wykorzystującą pięć pasków (w każdym pięć przetworników) oraz kształcie trójkąta równobocznego.

Rozbudowano kod programu komputerowego do modelowania i analizy zjawiska propagacji fal sprężystych (wzdłużnych, giętnych, ścinających) w przypadku płaskich dwuwymiarowych elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów izotropowych oraz laminatów kompozytowych. W nowej wersji oprogramowania wprowadzono zakrzywione elementy powłokowe sformułowane jako trójwymiarowe elementy izoparametryczne. Prace polegały również na rozbudowaniu pre- i post-procesora do możliwości pełnej wizualizacji konstrukcji trójwymiarowych. Program w chwili obecnej pozwala na analizę nie tylko zagadnień płaskich, lecz również zagadnień trójwymiarowych.

Prowadzono badania nad możliwością wykorzystania różnych systemów pomiarowych wykorzystujących włókna optyczne wraz z czujnikami typu FBG do detekcji uszkodzeń. Badano możliwości pomiarów w przypadkach obciążeń statycznych i dynamicznych w trakcie pracy urządzenia oraz bieżącą

*tory measurements. Developed has been an algorithm for localization of defects in composite structural elements, which uses piezoelectric transducers in the system coupled in the network of triangles and also a modified method of transducers arrangement, which uses five sets of arrangements (each consisting of five transducers) as well as in the form of an equal sides triangle.*

*The computer code has been extended for modeling and analysis of propagation of elastic waves (longitudinal, bending and shearing) in the case of two-dimensional structural elements made of isotropic materials and composite laminates. In a new version of software introduced were curved shell elements formulated as three-dimensional iso-parametric laminates. The activities were based also on the development of the pre- and post-processor to the capability of full visualization of three-dimensional structures. The code at the moment enables for analysis of not only the 2D but also three-dimensional problems.*

*Executed were investigations on the possibility of application of different measurement systems using optical fibres featuring the FBG type transducers for damage detection. Investigated were the possibilities of measurements in cases of static and dynamic loads during the device operation and on-line analysis of recorded operational parameters, at the same time determining instantaneously the technical condition of the structure. Applied diagnostic technique enables localization of*

analizę rejestrowanych parametrów pracy, a tym samym określanie w sposób ciągły stanu technicznego konstrukcji. Zastosowana technika diagnostyczna umożliwia zlokalizowanie takich uszkodzeń jak pęknięcia zmęczeniowe, delaminacje czy też zmiany wywołane obciążeniem udarowym. Określono charakterystykę i błędy pomiarowe takiego systemu pomiarowego. Przeprowadzono analizę wyników dla skrzydła małego samolotu, w którym umieszczone zostały elementy wykonawcze wytworzone ze stopu z pamięcią kształtu oraz czujniki światłowodowe. Zastosowanie stopu z pamięcią kształtu pozwoliło na zmianę kształtu skrzydła. Lokalizacja uszkodzenia została przeprowadzona poprzez porównanie wartości zmierzonych odkształceń dla skrzydła uszkodzonego i nieuszkodzonego po aktywacji poszczególnej sekcji silownikiem, który wytworzono ze stopu z pamięcią kształtu. Wyniki badań pokazały, że czujniki światłowodowe typu FBG mogą być z powodzeniem wykorzystywane do detekcji i lokalizacji uszkodzeń konstrukcji.

W zakresie metod analizy zagadnień: falowych, dynamicznych i statycznych, uwzględniających modelowanie hierarchiczne i podejście adaptacyjne, prowadzono prace nad budową modeli i metod (opartych na MES) do analizy zagadnienia drgań wymuszonych. W szczególności opracowano algorytm estymatora residualnego do szacowania błędów dyskretyzacji i modelowania dla tego zagadnienia. Zakończono prace nad algo-

*such damages as fatigue cracks, delaminations or changes induced by a impulse load. Determined was characteristics and measurement errors of such measurement system. Accomplished was analysis of results for a small aircraft wing, where elements were placed made of alloy with shape memory and optical waveguide transducers. Application of the shape memory alloy enabled for the change of the wing's shape. Localisation of the damage was carried out by comparison of the measured values of deformations of damaged and not damaged wing after activation of particular sections with the servo-motor, which was made of the shape memory alloy. The results of investigations showed that the optical waveguide sensors of FBG type can be successfully used for detection and localization of the structure damages.*

*In the area of methods of analysis of wave, dynamic and static issues considering the hierarchical modeling and adaptive approach executed were works on the development of models and methods (FEM based) for analysis of the excited vibrations problems. In particular developed was the algorithm of the residual estimator for forecasting of the discretisation error and modeling of such problem. Completed have been works on the FEM algorithm for a generalized shell element for that problem. The element is devoted to amongst the others the use in damage detection as a tool for analysis of the four-mode wave phenomena. As a specific case develo-*

rytmami MES dla uogólnionego elementu powłokowego trzeciego rzędu. Element ten przeznaczony jest m.in. do wykorzystania w detekcji uszkodzeń, jako narzędzie analizy czteromodowych zagadnień falowych. Jako przypadek szczególny opracowano także algorytm elementu powłokowego pierwszego rzędu, dopuszczający odkształcenia poprzeczne.

W ramach badań prowadzonych nad wykorzystaniem właściwości materiałów z magnetyczną pamięcią kształtu do aktywnego sterowania wybranymi charakterystykami dynamicznymi konstrukcji opracowano metodę redukcji drgań poprzecznych wirnika przy użyciu siłownika (z magnetyczną pamięcią kształtu). Badania eksperymentalne prowadzono w przypadku wprowadzenia niewyważenia do układu. W ogólnym przypadku efektywność pracy siłownika zmienia się liniowo w funkcji częstotliwości. Metoda jest bardziej efektywna dla wyższych częstotliwości aktywacji siłownika.

Opracowano ścisłą dwuwymiarową kinematykę dla powłoki rozwidlonej. Wykazano, że w tym przypadku w zasadzie prac wirtualnych pojawia się dodatkowa całka wzdłuż krzywej osobliwej rozwidlenia, modelująca dodatkowe współdziałanie na styku brzegu powłoki i krzywej osobliwej. Tę nową całkę określono dla szeregu typów rozwidlenia, m.in. sztywnego, przegubowego, częściowo przegubowego i odkształcalnego.

W ramach tematyki trójwymiarowego ośrodka Cosserat, opracowano

*ped also was the algorithm of the shell element of the first kind, which allows for transverse deformations.*

*In the frame of investigations carried out on the utilization of material properties with magnetic shape memory for active control of selected dynamic characteristics of structures developed has been a method of transverse vibrations reduction of the rotor using the servo-motor (with a magnetic shape memory). Experimental investigations were carried out for the case of introducing the imbalance into the system. In a general case the effectiveness of the servo-motor operation varies linearly in function of frequency. The method is more effective for higher frequencies of the servo-motor activation.*

*Developed has been a strict two-dimensional kinematics for a bifurcated shell. It has been shown that in that case in the principle of virtual labors there appears an additional integral along the singular curve of bifurcation which models additional interaction at the border of the shell and the singular curve. Such new integral has been determined for a series of bifurcations, amongst the others the stiff, joint, partially joint and deformable.*

*In the frame of three-dimensional Cosserat medium topic there has been developed a three different way of defining two non-linear measures of deformations in such medium. They enabled unanimous formulation of the so called natural measures of deformations in the absolute description, which are important in infinite translations, deforma-*

trzy różne sposoby definiowania dwóch nieliniowych miar odkształceń w takim ośrodku. Pozwoliły one sformułować w sposób jednoznaczny tzw. naturalne miary odkształceń w zapisie absolutnym, które są ważne przy nieograniczonych translacjach, odkształceniach i obrotach oraz znikają przy braku deformacji ośrodka. Te naturalne miary odkształceń zostały następnie wyrażone poprzez ogólną postać wektora obrotu skończonego. Nowe wyniki badań opracowano w zwartej postaci jako Rozdział 9 w książce, wydawanej przez Springer/New York.

Wydano książkę zawierającą pełne teksty 77 referatów wygłoszonych przez uczestników z 17 krajów podczas międzynarodowej konferencji 9th Conference "Shell Structures: Theory and Applications", 14-16 Oct., 2009, Jurata (Poland). Podczas tej konferencji Prof. Pietraszkiewicz przewodniczył Komitetowi Naukowemu i współredagował ww. materiały wydane przez czołowe wydawnictwo międzynarodowe CRC Press/Taylor & Francis Group, London 2009. Podczas konferencji odbyła się specjalna sesja z okazji 70-lecia Prof. Pietraszkiewicza i 48-lecia jego pracy naukowej.

Mechanizm zużycia podczas zjawiska tarcia ciał stałych prowadzi do powstawania cząstek zużycia. Generowane w procesie zużycia cząstki tworzą jednorodną i prawie ciągłą warstwę pośrednią rozdzielającą ślizgające się powierzchnie ciał. Cząstki zużycia mogą przenosić obciążenia i przemieszczenia między stykającymi się ciałami. Warstwę cząstek zużycia opisano za pomocą dwóch

*tions and revolutions and which disappear at the lack of the medium deformation. These natural measures of deformations have been subsequently expressed by a general form of the vector of finite pivot. New results of investigations have been elaborated in the concise form as Chapter 9 in a book issued by Springer/New York.*

*Issued has been a new textbook containing full texts of 77 papers presented by the participants from 17 countries during the 9th International Conference "Shell Structures: Theory and Applications", 14-16 Oct. 2009, Jurata, Poland. During that conference Prof. Pietraszkiewicz chaired the Scientific Committee and co-edited the conference proceedings published by a leading international Publishing House CRC Press/Taylor & Francis Group, London 2009. During that conference a special session was devoted to 70th birthday anniversary of Prof. Pietraszkiewicz and 48 years of his scientific activity.*

*The mechanism of wear during friction of solids leads to appearance of wear particles. Generated during the wear particles form a homogeneous and almost continuous layer separating sliding surfaces of bodies. The particles of wear can carry loads and displacements between bodies in contact. The layer of wear particles has been described by means of two different models, namely (a) continuous medium with own morphology, kinematics and constitutive equations, and (b) medium of granulated material described by a discrete*

różnych modeli: (a) ośrodka ciągłego o własnej morfologii, kinematyce i równaniach konstytutywnych, (b) ośrodka materiału granulowanego opisanego modelem dyskretnym. Szczegółowo omówiono korzyści i ograniczenia każdego z proponowanych opisów w modelowaniu warstwy cząstek zużycia. Obecność cząstek zużycia ma istotny wpływ na przebieg zjawisk tarcia i zużycia.

### **Analiza numeryczna i eksperymentalna wybranych zagadnień mechaniki i dynamiki elementów maszyn**

#### **Badania właściwości dynamicznych mikroturbin i mikrołożysk**

Prowadzono badania właściwości dynamicznych mikroturbin i ich systemów łożyskowania. Prace te były realizowane w ramach projektu kluczowego finansowanego ze środków POiG. Prace prowadzono we współpracy z innymi zespołami badawczymi a ich celem było prototypowe rozwiązanie konstrukcyjne mikrośilowni kogeneracyjnej małej mocy, funkcjonującej w oparciu o ORC.

Prace realizowane w O4/Z3 polegały przede wszystkim na badaniach symulacyjnych wirnika, łożysk oraz pozostałych elementów mikroturbiny, stanowiącej kluczowy element mikrośilowni. Przeprowadzono analizę różnych sposobów łożyskowania wysokoobrotowego wirnika turbogeneratora mikrośilowni parowej. Analiza dotyczyła hydrodynamicznych oraz hybrydowych łożysk ślizgowych, łożysk foliowych a także

*model. The advantages and drawbacks of each approach have been discussed in detail for modeling of wear particles. The presence of wear particles has a significant influence on the course of friction and wear.*

### **Numerical and experimental analysis of selected problems of mechanics and dynamics of machine elements**

#### **Investigations into dynamical properties of microturbines and microbearings**

*Accomplished were investigations of dynamical properties of microturbines and the systems of their bearings. These activities were realised in the frame of the project financed from POiG resources. The works were carried out in cooperation with other research groups with the objective to develop a prototype structural design of a domestic micro CHP of small power, operating with a low-boiling point fluid according to the Organic Rankine Cycle.*

*The works realised at O4/Z3 were based primarily on simulation investigations of the rotor, bearings and remaining microturbine elements, which is the key device in the micro CHP. Accomplished was analysis of different ways of high-speed bearings systems of the turbogenerator of the steam micro CHP. Analysis regarded hydrodynamical and hybrid slide bearings, foil bearings as well as ceramic bearings. Presented have been different concepts*

łożysk ceramicznych. Przedstawiono różne koncepcje rozwiązań konstrukcyjnych systemów łożyskowania wirnika. Przeprowadzono obliczenia testowe dla kilku wskazanych do dalszej realizacji wariantów konstrukcyjnych wirnika turbogeneratora. Obliczenia przeprowadzono przy uwzględnieniu właściwości docelowego czynnika smarowego łożysk w postaci czynnika niskowrzącego, zastosowanego w obiegu termodynamicznym mikrośilowni. W obliczeniach uwzględniono różne konfiguracje tarczy łopatkowej, łożysk oraz generatora. Dla wybranych wariantów wirnika turbogeneratora przeprowadzono również analizę modalną przy pomocy programu ABAQUS. Dla wariantu wirnika turbogeneratora odpowiadającego jednostopniowej turbinie promieniowoosiowej wyznaczono częstotliwości oraz postaci drgań własnych z uwzględnieniem wstępnej geometrii tarczy łopatkowej oraz właściwości łożysk.

Równolegle rozwijano własne oprogramowanie służące do analizy stanu dynamicznego różnego typu maszyn wirnikowych w zakresie liniowym i nieliniowym. Przeprowadzona została weryfikacja programów w zakresie analizy modalnej. Podczas weryfikacji wykorzystano wynik badań eksperymentalnych oraz wyniki obliczeń wykonanych przy pomocy komercyjnych, wcześniej zweryfikowanych programów komputerowych. Wyniki weryfikacji potwierdziły przydatność opracowanych programów komputerowych w przewidywaniu właściwości dynamicznych maszyn wirnikowych. Wyniki wykazały również

*of designs of rotor bearings systems. Completed were test calculations for several selected for further realization of structural cases of turbogenerator rotor. Calculations have been accomplished at the consideration of the properties of final lubrication fluid for bearings in the form of low-boiling point fluid, applied in a thermodynamical cycle of the micro CHP. In calculations considered were different configurations of the blade disc, bearings and generator. For selected cases of turbogenerator rotor accomplished was also the modal analysis using the ABAQUS software. For the case of the turbogenerator rotor corresponding to a single stage radial-axial turbine determined were frequencies and forms of natural vibrations with account of initial geometry of blade disc and bearings properties.*

*In parallel developed was the in-house software for the analysis of the dynamic state of different types of rotor machinery in the linear and non-linear range. Accomplished was verification of codes in the area of modal analysis. During verification the results of experimental investigations were used as well as the results of calculations completed using the commercial, verified earlier, computer software. The results of verification confirmed the applicability of developed earlier computer software for forecasting of dynamic properties of rotating machinery. The results showed also some constraints of these programmes in the area of modal analysis of small size rotors. For selected codes developed was a new graphical post-pro-*

pewne ograniczenia tych programów w zakresie analizy modalnej małogabarytowych wirników. Dla wybranych programów opracowano nowy postprocesor graficzny, przyspieszający i ułatwiający interpretację uzyskiwanych wyników.

### **Diagnostyka symulacyjna maszyn wirnikowych**

Kontynuowano prace związane z diagnostyką symulacyjną maszyn wirnikowych zwracając szczególną uwagę na turbosespoły energetyczne 200 MW. Prace były prowadzone w ramach projektu habilitacyjnego pt. "Nieliniowy opis dynamiki układu wirnikowego dużej maszyny wirnikowej z imperfekcją w postaci pęknięcia wału."

Przeprowadzono symulacyjne obliczenia dynamiki układów wirnikowych turbosopłów dużej mocy w obecności pęknięcia wału. Do obliczeń wykorzystano własne, opracowane w IMP PAN programy serii MESWIR. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano istnienie sprzężeń dynamicznych pomiędzy łożyskami ślizgowymi i defektem w postaci pęknięcia wirnika. Sprzężenia te w warunkach stabilnej pracy układu okazały się stosunkowo niewielkie. Jednak po przekroczeniu granicy stabilności układu sprzężenia te okazały się znaczne. Ich wpływ uwidaczniał się w zmianach okresowości pracy pęknięcia, co prowadziło do wzbudzenia składowych subharmonicznych drgań. Składowe te z kolei były odpowiedzialne za silny wzrost drgań wirnika, a także za zjawisko tzw. rezonansu wglębnego.

*cessor, which accelerates and simplifies interpretation of obtained results.*

### **Simulation diagnostics of rotor machines**

*Continued was the research related to the simulation diagnostic of rotor machines, with particular emphasis on the 200 MW turbo generators. These works were conducted in the frame of a habilitation project titled " Non-linear description of dynamics of rotor system of large power machine with imperfection in the form of a crack on the shaft".*

*Completed were simulation calculations of dynamics of rotor systems of turbogenerators of large power in the presence of the shaft crack. In calculations were used in-house codes belonging to the MESWIR suite of codes. On the basis of obtained results there has been shown the existence of dynamical couplings between slide bearings and the defect in the form of the rotor crack. Such couplings prove to be relatively negligible under stable operation conditions. However, beyond passing the threshold of system stability these couplings proved to be significant. Their influence showed up in the form of changes of periodicity of crack operation, which led to induction of subharmonic components of vibrations. These components, on the other hand, were responsible for a strong increase of rotor vibrations as well as the phenomenon of so called penetrating resonance.*

### **Analiza dynamiczna korpusów silników lotniczych**

Celem prowadzonych badań było opracowanie modelu MES korpusu silnika lotniczego SO-3. Zbudowano model MES i obliczono częstotliwości drgań własnych pierwszych siedmiu stopni sprężarki silnika SO-3. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami uzyskanymi z eksperymentu uzyskując bardzo dobrą zbieżność. Stwierdzono, że sprzężenie drgań łopatek wirnikowych poszczególnych stopni poprzez korpus jest znacznie większe niż sprzężenie drgań łopatek wirnikowych poprzez wirnik. Fakt ten ma duże znaczenia w analizie żywotności silnika lotniczego.

### **Drgania wymuszone i samowzбудne ułópatkowanej tarczy wirnikowej sprężarki**

Przeprowadzono analizę wpływu liczby łopatek kierowniczych na niestacjonarne siły obciążające łopatki wirnikowe ostatnich stopni turbin 100 oraz 200 MW. Opracowano algorytm i program komputerowy dla przepływu nielepkiego wykorzystując przy tym metodę Godunova-Koljana. Przeprowadzono obliczenia numeryczne dla różnej liczby łopatek kierowniczych. W przypadku turbiny 200 MW uwzględniono drgania łopatki wirnikowej. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem liczby łopatek kierowniczych niestacjonarne siły obciążające łopatki wirnikowe maleją.

### **Dynamic analysis of bodies of aircraft engines**

*The objective of investigations was development of FEM model of the body of aircraft engine SO-3. Such model has been developed and calculated were natural frequencies for first seven stages of the compressor engine SO-3. The results of numerical calculations have been compared with the ones obtained experimentally and a very good consistency between them was observed. It has been concluded that the coupling of rotor blades vibrations of particular stages through the body is significantly greater than coupling of rotor blades vibrations through the rotor. That fact has a significant importance in the analysis of the life span of the aircraft engine.*

### **Excited and natural vibrations of compressor's bladed rotor disc**

*Accomplished was analysis of the influence of the number of guide vane blades on non-stationary forces loading the rotor blades of last stages of 100 and 200 MW turbines. Developed has been algorithm and computer code for inviscid flow using the Godunov-Kolgan method. Completed were numerical calculations for a different number of guide vanes. In the case of a 200 MW turbine considered were rotor blade vibrations. It has been concluded that with the increase of the number of guide vane blades non-stationary forces acting on the rotor blades are decreasing. It has also*

Stwierdzono także, że istnieje optymalna liczba łopatek kierowniczych z punktu widzenia sił działających na łopatkę wirnikową. Zmiana liczby łopatek kierowniczych w stopniu zmienia sprawność stopnia.

*been concluded that there is an optimal number of guide vane blades from the point of view of forces acting on the rotor blade. The change of the number of guide vane blades at the stage modifies the stage efficiency.*

Wiesław Ostachowicz

*Translated by Dariusz Mikielwicz*