

O4

Zagadnienia mechaniki maszyn

Problems of mechanics of machines

O4/Z1/T1: Metody analizy i detekcji uszkodzeń w elementach maszyn

Badania w tematyce analizy propagacji fal sprężystych w elementach konstrukcyjnych ukierunkowano na opracowanie metod detekcji typowych uszkodzeń. Opracowano nowe typy specjalnych elementów spektralnych umożliwiające analizę propagacji fal sprężystych w jedno i dwuwymiarowych elementach konstrukcyjnych wykonanych z materiałów izotropowych jak i kompozytowych, zawierających uszkodzenia. Powyższe elementy bazują na funkcjach kształtu zbudowanych w oparciu o wielomiany Legendre'a oraz całkowanie numeryczne według kwadratury Gaussa-Lobatto. Podejście takie pozwala na uzyskanie diagonalnej macierzy mas, przez co równania ruchu są rozprężone w momencie ich tworzenia. Dzięki temu czas całkowania równań ruchu jest zdecydowanie krótszy niż w przypadku klasycznej wersji Metody Elementów Skończonych.

Wykorzystując wyżej wspomniane elementy wykonano szereg testów numerycznych dotyczących propagacji fal wzdłużnych i poprzecznych (ścinających) w płytach i membranach. Stwierdzono, że z punktu widzenia diagnostyki zdecydowanie lepsze rezultaty uzyskuje się w przypadku analizy propagacji jedynie fali poprzecznej typu SV (mod płytowy). W przypadku propagacji fali podłużnej towarzyszy jej fala ścinająca typu SH (mod membranowy) co zdecydowania utrudnia analizę dodat-

O4/Z1/T1: Methods of analysis and detection of defects in machine elements

Investigations into the problems of elastic waves propagation in structural elements have been directed towards development of detection methods for selected kinds of typical damages. Developed have been new types of special spectral elements enabling analysis of propagation of elastic waves in one and two-dimensional structural elements made of isotropic and composite materials containing damages. Such elements are based on shape functions constructed on the basis of Legendre polynomials and numerical integration according to Gaussa-Lobatto quadrature. Such approach allows for obtaining a diagonal matrix of masses and hence the equations of motion are decoupled in the moment of their formation. Thanks to that integration time of equations of motion is significantly shorter than in the case of classical method of finite elements.

Utilising mentioned above elements carried out have been a series of numerical tests regarding propagation of longitudinal and transverse (shearing) waves in slabs and membranes. From the point of view of diagnostics it has been concluded that by far the better results are obtained in the case of analysis of merely the transverse wave SV (slab mode). In the case of longitudinal wave propagation a shearing wave SH (membrane mode) accompanies such motion, which significantly impedes analysis of its ad-

kowych odbić wywołanych uszkodzeniami znajdującymi się w badanym obiekcie. Stwierdzono, iż w przypadku kompozytów duże znaczenie na interakcje fali z uszkodzeniem mają własności mechaniczne kompozytu opisywane objętością włókien wzmacniających i ich kątem ułożenia w kolejnych warstwach. Własności mechaniczne kompozytów silnie wpływają na prędkość propagacji fal sprężystych jak również na kształt czoła fali. Poznanie i zrozumienie wpływu tych parametrów jest niezwykle ważne z punktu widzenia projektowania systemów detekcji uszkodzeń wykorzystujących zmiany w propagacji fal sprężystych.

W trakcie realizacji prac zajęto się także zagadnieniem optymalnego rozmieszczenia czujników pomiarowych. Przebadano szereg konfiguracji ułożenia czujników – rozproszone i skupione. Stwierdzono, że układy czujników rozproszonych pozwalają na wykrywanie uszkodzeń w konstrukcji bez informacji o jej stanie pierwotnym jak również charakteryzują się brakiem tzw. "martwych stref", które są charakterystyczne dla konfiguracji opartych na koncepcji układów czujników skupionych.

W zakresie adaptacyjnej analizy modalnej złożonych układów mechanicznych, zawierających w sobie części płytowe, powłokowe, bryłowe oraz strefy przejściowe, prowadzono prace nad metodami, algorytmami oraz programami metody elementów skończonych (MES) do tej analizy. W szczególności opracowano metodę, algorytm, podprogramy komputerowe do wyznaczania

ditional deflections caused by damages located in the investigated object. It has been concluded that in the case of composites of significant importance in the case of interaction of a wave with a damage have mechanical properties of a composite described by a volume of reinforcing fibres and the angle of their positioning in subsequent layers. Mechanical properties of composites have a strong influence on the speed of elastic wave propagation as well as on the shape of the wave front. Recognition and understanding of the influence of these parameters in of paramount importance from the point of view of designing of systems of detection of damages utilizing changes in propagation of elastic waves.

During realisation of topics also the problem of optima distribution of measurement probes has been considered. Investigated has been a series of configurations of probes location, namely the dispersed and lumped manner. It has been concluded that the systems of dispersed probes enable for detection of structural damages without prior information about the initial state as well as feature a lack of so called "dead zones", which are characteristic to configurations based on the concept of lumped system of probes.

In the range of adaptive modal analysis of complex mechanical systems containing slab, shell, solid elements as well as transitional zones there have been continued activities on the methods, algorithms and codes utilising the finite element method for such analysis. It

postaci i częstości drgań własnych uwzględniające specyfikę adaptacyjnych elementów skończonych. Podprogramy te uruchomiono, przetestowano i włączono do istniejącego pakietu MES do analizy adaptacyjnej złożonych układów mechanicznych. Ponadto kontynuowano badania nad metodami, algorytmami i podprogramami wykrywania: locking, niewłaściwej granicy rozwiązania i efektu brzegowego w częściach cienkościennych oraz rozpoczęto prace nad metodami szacowania błędów w adaptacyjnej analizie modalnej. Warto dodać, że w przyszłości planowane jest objęcie omówionymi powyżej badaniami złożonych elementów konstrukcyjnych zawierających w sobie niejednorodności materiałowe (pęknięcia i delaminacje) oraz konstrukcyjne (kontakt).

O4/Z2/T1: Podstawy mechaniki konstrukcji i materiałów

Opracowano nową, efektywną metodę wyznaczania tensora obrotu i tensorów rozciągnięć, występujących w twierdzeniu o rozkładzie biegunowym gradientu deformacji ośrodka ciągłego. Metoda oparta jest o własność minimum, w normie euklidesowej, odległości tensora obrotu od tensora gradientu deformacji, występujących w tym twierdzeniu. Metoda nie wymaga ani pierwiastkowania ani odwracania tensorów podczas wszystkich operacji matematycznych.

particular, a method, algorithm and subroutines have been developed for determination of forms and frequencies of free-vibrations, which considered the specifics of adaptive finite elements. Such subroutines have been commissioned, tested and incorporated into existing FEM suite of codes for adaptive analysis of complex mechanical systems. Additionally continued have been investigations on the methods, algorithms and subroutines for detection of locking, inappropriate solution limit and the boundary effect in thin-wall parts as well as works have started on the methods of estimation of errors in the adaptive modal analysis. It is worth mentioning here that the future it is planned to include into the scope of investigations the complex structural elements containing material non-homogeneities (cracks and delaminations) as well as structural ones (contact).

O4/Z2/T1: Foundations of structure and material mechanics

Developed has been a new effective method of determination of the tensor of rotation and tension tensors, which can be found in a theorem about polar decomposition of deformation gradient. The method is based on a property related to minimum, in the Euclidean norm, of the distance of rotation tensor from the deformation gradient tensor, which are present in that theorem. The method does not require rooting nor inversion of tensors during all mathematical operations.

Sformułowano ogólne ścisłe warunki ciągłości sił i momentów na powierzchni krzywej osobliwej, modelującej rozwidlenie powłoki trójplątowej. Warunki zostały wyprowadzone przez bezpośrednie całkowanie po grubości powłoki globalnych warunków równowagi ośrodka ciągłego.

Zaproponowano dynamicznie i kinematycznie ścisły dwuwymiarowy (2W) model powłoki, w którym jest ona reprezentowana przez powierzchnię materialną z dołączonym polem tensora struktury. Globalna deformacja powłoki jest opisana przez wektor przesunięcia powierzchni podstawowej i tensor obrotu energetycznie uśredniony na grubości powłoki. Przeanalizowano relacje między 3W polami ciała powłokopodobnego i polami 2W opracowanego modelu powłoki.

Rozwinięto geometrycznie nieliniową teorię cienkich powłok sprężystych wraz z jej implementacją numeryczną. Zagadnienie brzegowe tej teorii powłok wyrażono przez siły błonowe i zmiany krzywizn powierzchni środkowej powłoki jako podstawowe zmienne zależne, co w literaturze nazywa się w skrócie sformułowaniem wewnętrznym. Przeanalizowano numerycznie klasyczny problem wyboczenia cylindra poddanego ścisłaniu osiowemu dla warunków osłabionego swobodnego podparcia. Wykazano, że obciążenie krytyczne w tym przypadku jest o połowę niższe od wartości klasycznej, uzyskanej przy użyciu równań przemieszczeniowych typu Donnella.

Rozwinięto nanoskalowy model pękania oraz nanoskalowy model plastycz-

Formulated have been general exact continuity conditions of forces and couples along the surface singular curve, modeling the bending of a three-layer shell. The conditions have been derived by direct through-the thickness integration of global equilibrium conditions of continuum.

Postulated has been a dynamically and kinematically exact two-dimensional (2D) model of a shell, where it is represented by a material surface with attached structure tensor. A global deformation of the shell is described by a translation vector and a rotation tensor, which are fields work averaged through the shell thickness. Analysed have been relations between 3D fields of a shell continuum and 2D fields of developed model of a shell.

Geometrically developed has been a non-linear theory of thin elastic shells together with its numerical implementation. The boundary problem of such theory of shells has been expressed by the stress resultants and curvature changes of middle surface as fundamental dependent variables, which in literature is named by intrinsic formulation. Numerically analysed has been numerically a classical problem of cylinder buckling under axial compression for the conditions of weakened simple support. It has been shown, that the critical load in such case is by half lower than the classical value obtained using the displacement equations of the Donnel type.

ności. Wymienione modele charakteryzują się wyróżnieniem systemów pęknięcia oraz pojedynczych pęknięć jak też systemów poślizgu i oddzielnych powierzchni poślizgu. Pokazano, że ważny wpływ na ewolucję tensora zniszczenia mają ewolucje zmiennych charakteryzujących pęknięcie oraz poślizg, rozważanych na poziomie nanoskalowym.

Zaproponowano jednowymiarowy model opisujący zachowanie się ciała, w którym pojawia się efekt magnetycznej pamięci kształtu. Opis jest związany z dużym uśrednieniem, powyżej skali 1 mikrometra. Energia sprężysta modelowana jest tu jako kombinacja liniowa energii sprężystych, odpowiadających poszczególnym wariantom martenzytu o strukturach tetragonalnych.

Badano anizotropowe i niejednorodne tarcie i zużycie, wynikające z anizotropowej chropowatości powierzchni ciał stałych oraz anizotropii i niejednorodności mikrostruktury takich materiałów jak kryształy, kompozyty, polimery, materiały ceramiczne, materiały o strukturze warstwowej i biomateriały. Sformułowano zaawansowane modele tarcia, które opisują ewolucję anizotropii i niejednorodności tarcia wywołaną krzywizną toru poślizgu. Krzywizna może być źródłem dodatkowego tarcia (dodatniego lub ujemnego), a tor poślizgu może w sposób istotny zmieniać swój kształt.

Opisano powstawanie profili zużycia wskutek ubytku materiału z powierzchni ciał. Prawo zużycia Archarda rozszerzono o efekty anizotropii i niejednorodności. Definicję luzu (szczeliny) między

Developed has been a nano-scale model of cracking together with a nanoscale model of plasticity. Outlined models are characterized by distinct systems of cracking and single cracks as well as systems of slips and separate slip surfaces. It has been shown that of significant influence in the case of evolution of the damage tensor are evolutions of variables characterizing crack and slip, which are considered at the nanoscale level.

Postulated has been a one dimensional model describing the body behaviour, where the effect of magnetic shape memory appears. The description is related to a large scale averaging, above the scale of 1 micrometer. Elastic energy is modeled here as linear combination of elastic energy, corresponding to particular variants of martensite with tetragonal structures.

Investigated have been anisotropic and non-homogeneous friction and wear resulting from anisotropic roughness of solids and anisotropy and non-homogeneity of microstructure of such materials as crystals, composites, polymers, ceramic materials, materials with a layer-lattice structure and biomaterials. Formulated have been advanced models of friction which describe evolution of anisotropy and friction non-homogeneity caused by sliding trajectory curvature. The curvature can be a source of additional friction (positive or negative) whereas the slip trajectory could seriously modify its shape.

Described has been the development of wear profiles due to material removal from the body surface. The Archard

stykającymi się ciałami zmodyfikowano w ten sposób, że uwzględniono odkształcenia ciał stałych oraz wzrost luzu wskutek procesu zużycia.

O4/Z3/T1: Teoretyczne i eksperymentalne badania oddziaływań dynamicznych w układach wirnik – łożyska

Podsumowano wyniki badań dotyczących budowy prototypowych relacji typu: defekt – symptom odnoszących się do dużej maszyny energetycznej o mocy 200 MW. Kontynuowano badania wpływu imperfekcji konstrukcyjnych i eksploatacyjnych układu wirującego na stan dynamiczny maszyny. Badania zmierzały do ustalenia wpływu takich grup czynników jak: pęknięcia wirnika, rozosiowania linii wałów wskutek dylatacji termicznych i eksploatacyjnych podpór oraz przekoszenia panwi w stosunku do osi czopów łożyskowych. Opisano relacje uwzględniające rozbieg i wybieg maszyny. Zbudowano tzw. kaskadowe widma drgań dla wszystkich wyżej wymienionych grup defektów. Kaskady te znakomicie uzupełniają zbudowane wcześniej relacje diagnostyczne, tworząc unikalny zbiór informacji o obiekcie.

Przedstawiono koncepcję, w myśl której charakterystyki dynamiczne podpór łożyskowych określane są w trakcie obliczeń na podstawie struktury widma drgań węzłów w miejscu posadowienia wirnika. Koncepcja ta umożliwia integrację modelu konstrukcji podpierającej (na ogół liniowego)

wear law has been extended for the effects of anisotropy and non-homogeneity. Definition of clearance (gap) between contacting bodies has been modified in such a way that deformations of solids were considered as well as the clearance increase due to the wear process.

O4/Z3/T1: Theoretical and experimental investigations of dynamical interactions in rotor-bearing systems

Summarised have been results of investigations related to construction of prototype relations of defect-symptom type pertaining to a large power engineering machine of 200 MP power. Continued have been investigations on the influence of structural and operational imperfections of rotating system on the dynamical state of the machine. Investigations were aimed at determination of the influence of such group of factors as rotor crack, line of shaft misalignment due to thermal and operational dilatations of supports and bearing bushes skewness with respect to bearing pins axis. Described have been relations accounting for the machine startup and shut down. Developed have been so called cascade vibration spectra for all mentioned above groups of defects. Such cascades perfectly complement developed earlier diagnostic relations forming a unique set of information about the object.

Presented has been a concept, where dynamical characteristics of bearings supports are determined during calcu-

z modelem linii wirników (z imperfekcjami) i łożysk ślizgowych, który z reguły jest nieliniowy. Obliczenia wymagają określenia przedziałów adekwatności w granicach których dokonuje się transformacji zespolonych charakterystyk podatnościowych na rzeczywiste charakterystyki masowo-tłumiąco-sztynnościowe. Pierwszym krokiem w opisanym wyżej postępowaniu jest wyznaczenie zespolonych macierzy podatności dynamicznej konstrukcji podpierającej. Przedstawiono próby budowy takich charakterystyk zarówno metodą pomiarów eksperymentalnych jak i symulacji komputerowej. Obiektem badań był wirnik laboratoryjny oraz turbospół energetyczny dużej mocy.

Doboru przedziałów adekwatności dokonano na podstawie analizy modalnej. W tym przypadku rozbieżności pomiędzy analizą teoretyczną i eksperymentalną okazały się dużo mniejsze. Określono zarówno przedziały adekwatności jak i charakterystyki dynamiczne konstrukcji podpierającej. Możliwa stała się ocena wpływu zaproponowanej metodologii obliczeń poprzez zastosowanie tzw. funkcji wagowych na stan dynamiczny obu obiektów. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie kart diagnostycznych. Okazało się, że w przypadku obiektów pracujących w warunkach nominalnych obraz drgań obiektu pozyskany metodą funkcji wagowych jest bardziej bezpieczny, co wyraża się bardziej stonowaną strukturą widma drgań. Wpływ ten jednak można ocenić jako niewielki. Sytuacja wygląda inaczej w przypadku, kiedy obiekt pracu-

lations on the basis of structure of nodal vibration spectra at the location of rotor foundation. Such concept enables integration of the model of support structure (usually of linear type) with a model of line of rotors (with imperfections) and slide bearings, which on the other hand is usually non-linear. Calculations require determination of the intervals of adequacy in the limits where transformation of complex susceptibility characteristics is performed onto real mass-damping-stiffness characteristics. The first step in the described above procedure is determination of complex characteristics of dynamical susceptibility of supporting structures. Presented have been attempts to construction of such characteristics both by method of experimental measurements and computer simulations. The object of investigations was a laboratory rotor and a professional turboset of large power.

Selection of the interval of adequacy was conducted on the basis of modal analysis. In such case discrepancies between theoretical and experimental analysis appeared to be significantly smaller. Determined have been both the ranges of adequacy and dynamical characteristics of supporting structures. An assessment of the influence of postulated methodology of calculations became possible by implementation of so called weighting functions on the dynamical state of both objects. The results of calculations have been presented in the form of diagnostic cards. It turned out that in the case of objects operating

je w warunkach rozwiniętej już niestabilności. Przykład maszyny energetycznej z pękniętym wirnikiem pokazał, że wpływ funkcji wagowych jest znaczny i zmierza w kierunku pogorszenia stanu dynamicznego obiektu. Stwierdzono, że w sytuacji kiedy układ pracuje spokojnie i charakteryzuje się mało rozbudowaną strukturą widm drgań posadowień wirnika to można spodziewać się niewielkiego wpływu metody ważenia charakterystyk. W innych przypadkach obserwuje się złożoną strukturę widm drgań o wielu silnych składowych i wpływ ten jest niewątpliwie zdecydowanie większy.

O4/Z4/T1: Analiza numeryczna wybranych zagadnień mechaniki elementów maszyn i materiałów

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu wału na drgania własne ułopatkowanych tarcz wirnikowych osadzonych na wale. Na podstawie pomiarów częstotliwości drgań własnych rzeczywistego wirnika turbiny parowej składającego się z ośmiu ułopatkowanych tarcz osadzonych na wale stwierdzono sprzężenie częstotliwości drgań własnych poprzez wał. Pomiary przeprowadzono tylko dla ostatnich dwóch stopni. W celu przeanalizowania sprzężeń uproszczono geometrię łopatek oraz zmieniono ich liczbę. Przeanalizowano drgania własne takiego układu. Stwierdzono, że wał wpływa na częstotliwości i formy drgań własnych ułopatkowanych tarcz wirnikowych dla postaci

under nominal conditions the picture of the object vibrations acquired by means of weighting functions is more safe which is expressed in the form of a more moderate structure of vibration spectrum. Such influence, however, can be regarded as small. Situation looks differently in the case when the object operated under conditions of fully developed instability. An example of professional machine with a cracked rotor showed that the influence of weighting functions is significant and tends towards a direction of impairing of the dynamical state of the object. It has been concluded that in the case when the system operated normally and is characterized by a not excessive structure of vibration spectra of rotor foundations then a small influence of the method of characteristics weighting can be expected. In other cases a complex structure of vibration spectra is observed with several components introducing influences and such effect is undoubtedly significantly stronger.

O4/Z4/T1: Numerical analysis of selected problems of machine elements and materials mechanics

The objective of carried out investigations was determination of the influence of the shaft on free vibrations of bladed rotor discs on the shaft. On the basis of measurements of frequency of free vibrations of a real rotor of steam turbine consisting of eight bladed discs on the shaft there has been concluded coupling between frequency of free vibrations

z zerową, pierwszą i drugą średnicą węzłową. Wpływ ten jest większy dla łopatek z bandażem integralnym. Najważniejszym wnioskiem płynącym z analizy jest konieczność uwzględnienia sprzężenia poprzez wał przy projektowaniu łopatek i ułopatkowanych tarcz wirnikowych, jeżeli w układzie przepływowym występują wymuszenia niskoczęstotliwościowe wynikające z niesymetrii przepływu (stopień regulacyjny, upust, ostatni stopień turbiny).

Kolejnym zadaniem było określenie wpływu utraty części bandaża na drgania własne ułopatkowanych tarcz wirnikowych osadzonych na wale. Stwierdzono uszkodzenie łopatek ostatniego stopnia turbiny silnika lotniczego. Zaistniała konieczność przeanalizowania przyczyn awarii. Przeanalizowano drgania własne pojedynczej łopatki i ułopatkowanej tarczy. Zamodelowano ułopatkowaną tarczą, dla przypadku powstania nieciągłości bandaża integralnego. Stwierdzono, że taka nieciągłość powoduje rozstrojenie układu oraz drgania wolnonośne łopatek, co w tym przypadku było przyczyną awarii, gdyż dwie pierwsze częstotliwości drgań własnych wolnonośnej łopatki znajdowały się w przedziałach rezonansowych. Stwierdzono także występowanie nowych postaci drgań ułopatkowanej tarczy, niewynikających z analizy układu nieuszkodzonego.

Na podstawie algorytmu 3D flutteru w przepływie lepkiem napisano program komputerowy dla przepływu trójwymiarowego lepkiego dla siatek strukturalnych. Otrzymane wyniki numeryczne

through the shaft. Measurements were carried out only for last two turbine stages. In order to analyse couplings the blade geometry has been simplified as well as their number has been changed. Free vibrations of such system have been analysed. It has been concluded that the shaft influences frequencies and forms of free vibrations of bladed rotor discs for the forms with zeroeth, first and second nodal diameter. Such influence is greater for the shrouded bladed discs. The most important conclusion stemming from the analysis is the necessity of considering coupling through the shaft in the design of blades and bladed rotor discs, if in the flow system there exist low frequency excitations resulting from flow asymmetry (regulation stage, bleed, last turbine stage).

Another issue was development of the influence of a loss of a part of shroud on free vibrations of bladed rotor discs on the shaft. There arose a necessity of analysis of the reasons of breakdown. Analysed were free vibrations of a single blade as well as bladed disc. The bladed disc has been modeled for the case of developed discontinuity of integral shroud. It has been concluded that such discontinuity renders system mistuning as well as low propagation vibrations of blades, which in such case was a reason for the breakdown, as two first frequencies of free vibrations of a low-propagation blade were contained in the range of resonance. There has also been concluded the presence of new forms of vibrations of bladed discs,

dla 11 konfiguracji porównano z wynikami badań eksperymentalnych.

which did not result from the analysis of undamaged system.

On the basis of algorithm of 3D flutter in viscous flow there has been developed a computer code for the case of three-dimensional viscous flow on structural grids. Obtained numerical results for 11 configurations have been compared with the results of experimental investigations.

Wiesław Ostachowicz

Translated by Dariusz Mikielewicz