

O4

Zagadnienia mechaniki maszyn

Problems of mechanics of machines

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

CEL I PRZEDMIOT PRACY

Celem badań było doskonalenie istniejących i rozwój nowych modeli służących do analizy dynamiki konstrukcji z uszkodzeniami. Przeprowadzono analizę stanów statycznych i dynamicznych kompozytowych elementów konstrukcyjnych wyposażonych w aktywne elementy wykonane z materiałów piezoceramicznych i materiałów z pamięcią kształtu. Ważnym zamierzeniem badawczym była analiza propagacji fal sprężystych w elementach konstrukcyjnych pod kątem możliwości ich zastosowania do detekcji uszkodzeń. Prowadzono także badania nad zastosowaniem metod wibracyjnych i technik sztucznej inteligencji do detekcji uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych z uszkodzeniami. Kontynuowano badania zmierzające do opracowania ogólnej metody modelowania hierarchicznego i statycznej analizy adaptacyjnej złożonych układów mechanicznych. Opracowano koncepcję dynamicznej analizy adaptacyjnej prostych i złożonych elementów konstrukcyjnych.

CHARAKTERYSTYKA UZYSKANYCH WYNIKÓW

W wyniku prowadzonych prac opracowano modele umożliwiające modelowanie zjawisk kontaktowych na powierzchni delaminacji w materiale kompozytowym, jak również modele opisujące zmiany sztywności elementów

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

AIM AND TOPIC OF WORKS

The aim of investigations was to enhance existing and develop new models for the analysis of structural dynamics with defects. Conducted has been the analysis of static and dynamic states of composite construction elements equipped with active elements made of piezoceramic materials as well as of material with the shape memory. An important research objective was the analysis of elastic waves propagation in construction elements with the view to their application in damage detection. Conducted also have been investigations on application of vibration methods and artificial intelligence techniques in damage detection in construction elements with damages. Continued have been investigations aiming at the development of a general method of hierarchical modelling and adaptive static analysis of complex mechanical systems. Developed has been a concept of dynamic adaptive analysis of simple and complex constructional elements.

CHARACTERISTICS OF OBTAINED RESULTS

As a result of conducted works developed have been models enabling description of contact phenomena on the delamination surface in the composite material, as well as models reflecting changes of stiffness of construction

konstrukcyjnych w miejscu pęknięć sprężysto-plastycznych.

W temacie dotyczącym analizy stanów statycznych i dynamicznych kompozytowych elementów konstrukcyjnych wyposażonych w aktywne elementy opracowano nowe modele belek i płyt kompozytowych zawierających aktywne warstwy PZT. Przebadano wpływ sposobu ich aktywacji na stany statyczne i dynamiczne belek i płyt, także zawierających uszkodzenia.

Rozwijano prace związane z analizą propagacji fal sprężystych w elementach konstrukcyjnych pod kątem możliwości ich zastosowania do detekcji uszkodzeń. Zbadano oddziaływanie fal podłużnych i poprzecznych z uszkodzeniami w postaci pęknięć zmęczeniowych i delaminacji. Zaobserwowano silny związek pomiędzy wielkością i położeniem uszkodzenia a zmianami w propagującej fali. Propagujące fale są bardzo czułe nawet na bardzo małe uszkodzenia, co daje szansę na ich wykrywanie w początkowej fazie rozwoju. Stosując metodę algorytmów genetycznych wykazano, że istnieje możliwość rozwiązywania zadania odwrotnego (lokalizacja uszkodzenia) w oparciu o obserwowane zmiany w propagującej fali.

W temacie związanym z zastosowaniem metod wibracyjnych i technik sztucznej inteligencji do detekcji uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych z uszkodzeniami przebadano (pod kątem czułości) różnego rodzaju kryteria wykorzystujące zmiany parametrów dynamicznych konstrukcji

elements at locations of elasto-plastic cracks.

In the topic regarding the analysis of static and dynamic composite materials equipped with active elements developed have been new models of beams and composite slabs containing the active PZT layer. The influence of the way of their activation on static and dynamic states of beams and slabs has been investigated, also in the case where these were containing defects.

Advanced have been studies connected with the analysis of propagation of elastic wave propagation in construction elements with the view to their application for damage detection. Investigated has been the interaction of axial and transverse waves with defects in the form of fatigue cracks and delamination. Observed has been a strong relation between the extent and location of the defect as well as between the defect and response of the propagating wave. Propagating waves are prone even to very small defects, which gives hope for their detection in the early phase of development. Using the method of genetic algorithms there is a possibility of solving the inverse problem (location of the defect) based on observed changes in the propagating wave.

In the scope of activities connected with application of vibration methods and artificial intelligence techniques in damage detection in construction elements investigated have been, in the light of sensitivity, various kinds of criteria utilising the change of structure dynamic parameters, which serve for their

z uszkodzeniami służące do ich wykrywania. Wykonano także szerokie badania eksperymentalne. Stwierdzono, że znane z literatury metody nie są w stanie wykrywać uszkodzeń w początkowej fazie ich rozwoju. Stąd główny kierunek badań w obszarze detekcji powinien być związany z metodami bazującymi na zmianach w propagacji fal sprężystych.

W zakresie prac nad ogólną metodą modelowania hierarchicznego i statycznej analizy adaptacyjnej złożonych układów mechanicznych uruchomiono pełny pakiet programów komputerowych realizujących obliczenia błędów aproksymacji i modelowania oraz błędu całkowitego oraz procedury zawiadujące zagęszczaniem sieci elementów i podnoszeniem stopni aproksymacji w częściach bryłowych, powłokowych i przejściowych, niezależnie we wszystkich trzech kierunkach. Oprócz tego prowadzono prace nad poprawieniem efektywności zaproponowanych wcześniej elementów powłokowych i przejściowych opartych na podejściu trójwymiarowym. Uwagę skupiono na procedurach zadawania więzów wymuszających brak normalnych odkształceń poprzecznych, na wprowadzeniu funkcji kształtu typu Legendre'a do elementów bryłowych, powłokowych i przejściowych oraz na poprawieniu uwarunkowania elementów w przypadku ich małej grubości.

O4/Z2/T1 Podstawy mechaniki konstrukcji i materiałów

W monografii *Thermomechanics of*

detection. Conducted also have been extensive experimental investigations. It has been concluded that known from literature methods are not capable to detect defects in their early development stage. Therefore the major direction of investigations in the region of detection should be linked with the methods based on changes in propagation of elastic waves.

In the range of works on the development of a general method of hierarchical modelling and static adaptive analysis of complex mechanical objects commissioned has been a complete package of computer codes realising calculations of approximation and modelling errors as well as the total error and procedures controlling refinement of the element grid and enrichment the approximation order in solids, shells and transition zones independently in three directions. Apart from that independently conducted have been works on increasing the effectiveness of introduced earlier shell and transition elements based on the three-dimensional approach. Attention has been focused on procedures of imposing constraints rendering the lack of transverse normal strains, introduction of the shape functions of the Legendre type in solid, shell and transition elements and improving the element conditioning in the case of their small thickness of the elements.

O4/Z2/T1 Fundamentals of structural and material mechanics

In the monograph "Thermomecha-

Shells with Singular Curves sformułowano globalne i lokalne prawa mechaniki i termodynamiki powłok z osobliwościami różnych pól na stacjonarnych i ruchomych krzywych osobliwych powierzchni podstawowej powłoki. Prawa te sformułowano bez żadnych założeń upraszczających, przez bezpośrednią reprezentację na powierzchni podstawowej powłoki odpowiednich praw, zapisanych w postaci całkowo-impulsowej, dla ciała ciągłego, złożonego z cząstek materialnych. Te nowe, ogólniejsze od znanych prawa termomechaniki powłok opisują nie tylko tradycyjne zagadnienia odwracalnego zachowania się powłok regularnych, lecz również umożliwiają modelowanie opisu procesów powierzchniowych zadań nieodwracalnych i/lub nieciągłych dla powłok nieregularnych. Dodatkowo, skonstruowano ścisłą dwuwymiarową (2W) kinematykę powłoki i ścisłe 2W miary odkształceń. Wykazano, że w ramach takiej ogólnej termomechaniki powłok 2W równania konstytutywne są wymagane dla powierzchniowych miar: sił i momentów wewnętrznych, energii całkowitej, entropii, oraz wektora przepływu ciepła. Ale dodatkowo wymagane są tu równania konstytutywne dla wektorów pędu i momentu pędu, a także kilku dodatkowych nieklasycznych pól. Podano ogólną strukturę równań konstytutywnych, wyrażoną przez funkcjonały z historii ruchu i temperatury, oraz szereg uproszczonych postaci równań konstytutywnych.

Shells with Singular Curves formulated have been global and local laws of mechanics and thermodynamics of shells with singularities of different fields on stationary and moving singular curves on the shell base. The above laws have been formulated without any simplifying assumptions, through a direct representation on the base surface of relevant laws written in the integral-impulse form for the solid consisting of material particles. These new, more general than the already known laws of thermomechanics of shells describe not only traditional reversible problems of regular shell behaviour, but also enable modelling of the irreversible surface or/and discontinuous processes for irregular shells. Additionally, constructed has been an exact two-dimensional (2D) kinematics of the shell as well as exact 2D shell strain measures. It has been shown that in the frame of such general thermomechanics of shells 2D constitutive equations are required for surface measures of: internal forces and couples, total energy, entropy and the heat flow vector. Additionally required here are constitutive equations for the vectors of momentum and moment of momentum as well as for some extra non-classical fields. Presented has been a general structure of constitutive equations expressed by functionals of motion and temperature history, as well as several simplified explicit forms of the constitutive equations.

Generalised has been the non-linear 6-parameter theory of irregular shells

Rozszerzono ogólną nieliniową 6-parametrową teorię powłok nieregularnych na nieliniowe zadania dynamiki powłok. Odpowiednie zagadnienie początkowo-brzegowe sformułowano w postaci słabej (wariacyjnej). Opracowano oryginalny rozszerzony algorytm typu Newmarka całkowania po czasie nieliniowych równań dynamiki na przestrzeni konfiguracyjnej, złożonej z rozmaitości $E^3 \times SO_{(3)}$. Wykonano szereg symulacji numerycznych MES skomplikowanych ruchów powłok wymuszanych dynamicznie do lotu w przestrzeni i jednocześnie poddanych dużym deformacjom względnym.

Wektor wodzący powierzchni podstawowej cienkiej powłoki odkształconej wyrażono przez rzut na płaszczyznę odniesienia i funkcję wysokości ponad tę płaszczyznę. Zrutowane składowe tego wektora wyznaczono za pomocą kwadratur zależnych od odkształceń powierzchni i funkcji wysokości, a odnośne pole przemieszczeń wyznaczono przy pomocy prostych wzorów algebraicznych. Opracowano energetycznie konsekwentne uproszczenia układu równań nieliniowej teorii cienkich powłok sprężystych, wyrażonych przez odkształcenia i funkcję wysokości, dla przypadków prawie bezwydłużeniowej deformacji, stanu prawie membranowego i stanu zgięciowego.

W ramach wieloskalowej mechaniki materiałów, zaproponowano sposób modelowania zniszczenia dla kilku poziomów uśredniania. Wyjściowym poziomem jest poziom nanoskalowy.

onto the non-linear problems of shell dynamics. An adequate initial boundary value problem has been formulated in the weak (variational) form. Developed has been an original extended algorithm, of the Newmark type, for integration in time of non-linear equations of dynamics on the configuration space consisting of a variety $E^3 \times SO_{(3)}$. Conducted have been several numerical simulations using FEM of complicated motions of shells, dynamically induced to fly in the space, and exposed to large relative deformations.

The position vector of the base surface of a thin deformed shell has been expressed by a projection onto the reference plane and a height function above that plane. Projected components of that vector have been determined by means of quadratures dependent on the surface strains and the height function, whereas the relevant displacement field has been determined by means of simple algebraic equations. Developed have been energetically consistent simplifications of a set of non-linear equations of thin elastic shells expressed through the surface strains and the height function for the special cases of almost inextensional deformation, the almost membrane state and the bending state.

In the frame of multi-scale material mechanics, proposed has been a way of modelling of damage for several levels of averaging. A starting point is the nanoscale level. Introduced have been accompanying variables associated with generation of damage at the slip surface level. Discussed has been the placement

Wprowadzono zmienne stowarzyszone z generowaniem zniszczenia na poziomie powierzchni poślizgu. Przedyskutowano umiejscowienie kontynuualnej teorii zniszczenia w ramach wprowadzonego modelu wieloskalowego.

Przedstawiono model trących i zużywających się ciał stałych, który składa się ze stykających się ciał i zawartej między nimi dwuwymiarowej warstwy cząstek zużycia. Klasyczne silne i słabe sformułowania zagadnień kontaktowych rozszerzono przez uwzględnienie warstwy cząstek zużycia o translacyjnych i rotacyjnych stopniach swobody. Sformułowanie wariacyjne wyprowadzono z zasady stacjonarności całkowitej energii potencjalnej. Warunek stacjonarności funkcjonalów wariacyjnych prowadzi do równań równowagi, przewodnictwa ciepła w stykających się ciałach i warstwie oraz ciągłości masy w warstwie. Równania te podano w postaci dyskretnej, dogodnej do analizy numerycznej. Dla prostego modelu uszczelnienia mechanicznego przeprowadzono obliczenia mające na celu określenie profilu zużycia.

Opisano dwa podejścia do zagadnienia poślizgu dużych mas lodowych. W pierwszym podejściu modeluje się siły tarcia między lodem a podłożem. W drugim podejściu formułowane są bezpośrednio prędkości poślizgu lodu. Anizotropia topografii podłoża skalnego jest źródłem anizotropowych zjawisk trybologicznych. Z tego powodu, rozpatrzono szczegółowo anizotropowe i niejednorodne tarcie oraz anizotropowy poślizg.

of continuum theory of damage in the frame of introduced multiscale model.

Presented has been a model of rubbing and wearing solids, which consist of bodies in contact and contained inside a two-dimensional layer of the wear particles. Classical strong and weak formulations of contact phenomena have been extended by inclusion of a layer of wear particles with translational and rotational degrees of freedom. A variational formulation has been derived from the stationarity principle of total potential energy. A stationarity condition of variational functional leads to the equilibrium equations, heat conduction contacting bodies and a layer as well as continuity of mass in the layer. Such equations have been provided in a discrete form which is straightforward in numerical analysis. In the case of a simple model of mechanical sealing conducted have been calculations aiming at determination of the wear profile.

Described have been two approaches to the problem of slip of large masses of ice. In the first approach modelled are friction forces between ice and the surface. In the second one formulated are directly the slip velocities of ice. Anisotropy of the rocky bed topography is a source of anisotropic tribological phenomena. Due to that fact considered have been in detail anisotropic and heterogeneous friction together with the anisotropic slip.

Summarised have been the results from the area of dynamics of steam turbine blade systems including:

Podsumowano wyniki badań z dziedziny dynamiki układów łopatkowych turbin parowych, w tym: a) opis budowy modeli ułopatkowania, b) analizę oddziaływań zewnętrznych i środowiska agresywnego, c) metody wyznaczania parametrów statyki i drgań, d) procedury oceny wytrzymałości zmęczeniowej i żywotności w warunkach agresywnego środowiska, e) wyniki analiz numerycznych dynamiki wybranych układów łopatkowych. Badano drgania wieńców łopatek z bandażem, z zastosowaniem metody elementów skończonych dla modelu trójwymiarowego. Przeprowadzono obliczenia drgań dwóch typów ułopatkowania: a) łopatek średniej długości, słabo skręconych w stanie naturalnym; b) łopatek długich, silnie wstępnie skręconych, o zmniejszonych średnicach i okręgach węzłowych.

O4/Z2/T2 Analiza numeryczna wybranych zagadnień mechaniki elementów maszyn i materiałów

Dla wybranego profilu łopatek, przeprowadzono badania eksperymentalne dla różnych kątów przesunięcia fazowego pomiędzy łopatkami oraz dla różnych liczb Strouhala, wyznaczając granice flateru. Otrzymane wyniki eksperymentalne porównano z wynikami własnych obliczeń numerycznych. Przeanalizowano granice flateru przy pełnym sprzężeniu drgającej konstrukcji z przepływem bez utrzymania stałego kąta przesunięcia pomiędzy łopatkami.

a) description of construction of blade systems, b) analysis of external influences and aggressive environment, c) methods of determination of parameters of statics and vibrations, d) procedures of fatigue strength and the life under conditions of aggressive environment, e) results of numerical analysis of dynamics of selected blade systems. Investigated have been vibrations of the blade rim with shrouding using the finite element method for a three-dimensional model. Conducted have been calculations of vibrations for two types of blades: a) mean height blades, weakly twisted in natural state, b) long blades, strongly initially twisted with deformed diameters and nodal circles.

O4/Z2/T2 Numerical analysis of selected problems of machine and material mechanics

Conducted have been experimental investigations for different phase shift angle between blades as well as different Strouhal number for a selected blade profile. In such way the limits of flutter have been determined. Obtained experimental results compared have been with the results of own numerical calculations. Analysed have been the limits of flutter at the full coupling of vibrating structure with the flow, without sustaining a constant angle of phase shift between the blades.

Presented have been the numerical results of free vibrations of palisades for a three-dimensional subsonic, transonic

Przedstawiono wyniki numeryczne drgań samowzbudnych palisad dla trójwymiarowego przepływu poddźwiękowego, transonicznego i nad-dźwiękowego wykorzystując metodę superpozycji modalnej. Do realizacji tych zadań wykorzystano komputerowy program opisu parametrów ruchu palisady będącej w niestacjonarnym i niezachowawczym przepływie. Obliczenia przeprowadzono dla IV standardowej konfiguracji oraz dla palisady łopatek wirnikowych turbiny PWK 200.

Przeanalizowano częstości drgań własnych jednej, dwóch i trzech łożopatkowanych tarcz ze 144 łopatkami osadzonych na wale, z uwzględnieniem ruchu obrotowego, przy pomocy programów MES ABAQUS i NASTRAN. Stwierdzono, że wał i łopatki osadzone na tarczy mają duży wzajemny wpływ na formy i częstości drgań układu, szczególnie dla kilku pierwszych form drgań.

Napisano algorytm wzajemnego oddziaływania ruchu łopatek podczas drgań i trójwymiarowego przepływającego gazu poprzez zmieniające się kanały między łożopatkowe.

Obliczono siły niestacjonarne wysoko i niskoczęstotliwościowe, działające na łopatki i wał ostatniego stopnia turbiny PWK200, zakładając nierównomierny rozkład ciśnienia za łopatkami wirnikowymi. Założono, że łopatki wirnikowe różnią się wymiarami geometrycznymi wykonania. Stwierdzono, że dla łopatek jednakowych niestacjonarne siły działające na wał są bardzo małe.

and supersonic flow using the method of modal superposition. A computer code has been used in realisation of these topics, where the palisade was in the non-stationary and non-preserving flow. Calculations have been conducted for a standard IVth configuration and a rotating blade palisade of PWK200 turbine.

Analysed have been frequencies of vibrations of one, two and three bladed discs with 144 blades fixed on a shaft with account of a rotational motion using the FEM, ABAQUS and NASTRAN codes. It has been concluded that the shaft and blades fixed on a disc have a significant influence on forms and frequencies of system vibrations, particularly for first few forms of vibrations.

An algorithm has been developed of interaction of the blade motion during vibrations and two-dimensional gas flow through changing inter-blade passages.

Calculated have been non-stationary forces of high and low frequency character, which act on blades and a shaft of a last stage of PWK200 turbine assuming a non-uniform pressure distribution behind rotor blades. It has been assumed that the rotor blades differ between themselves with geometrical dimensions. It has been concluded that in the case of same blades the non-stationary forces acting on the blades are very small.

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

Opracowanie koncepcji opisu liniowych charakterystyk konstrukcji podpierającej sprzężonej z nieliniowym podukładem typu: linia wirników – łożyska

Dokonano identyfikacji charakterystyk masowo-tłumiąco-sztywnościowych konstrukcji podpierających maszyn wirnikowych odniesionych do analizy w zakresie nieliniowym całego układu łącznie z linią wirników i łożysk ślizgowych. Takie ukierunkowanie tematyki wymusiło konieczność nowego podejścia do zagadnienia analizy charakterystyk dynamicznych konstrukcji podpierającej (fundamentów, stojaków, ram itd.).

Zaproponowano podział całego zakresu częstości wymuszeń na charakterystyczne przedziały, zwane przedziałami adekwatności charakterystyk. Najbardziej wartościowym wkładem poznawczym jest tu opracowanie teorii pozwalającej na wyznaczenie tych przedziałów a także jej obszerna dyskusja i weryfikacja eksperymentalna. Zaproponowano szereg własnych definicji i kryteriów oceny składających się na nową metodologię identyfikacji konstrukcji podpierających. Zaproponowana metodologia identyfikacji może być bezpośrednio wykorzystana w diagnostyce według modelu maszyn wirnikowych, a więc przy budowie zależności typu defekt-symptom.

O4/Z3/T1 Theoretical and experimental investigations of dynamic interactions in the rotor-bearing systems

Development of a concept of description of supporting structure linear characteristics coupled with a non-linear subsystem of the line of rotors-bearings type

Conducted has been identification of mass-damping-stiffness characteristics of support structure of rotating machinery referred to the analysis in the non-linear range of the entire system together with the line of rotors and slide bearings. Such focus of research rendered the necessity of a new approach to the problem of analysis of dynamic characteristics of the supporting structure (foundation, stand, frames, etc.)

Suggested has been a division of the entire range of excitations onto the characteristic intervals, called the intervals of characteristics adequacy. The most valuable fundamental contribution is the development of a theory enabling determination of such intervals together with a throughout discussion and experimental verification. Suggested have been several own definitions and criteria of assessment contributing to the new methodology of identification of supporting structures. Suggested methodology of identification can be directly used in the model based diagnostics of rotating machinery, and hence during construction of relations of the defect-symptom type.

Ocena wpływu „przekoszenia” panwi na własności małych i dużych maszyn wirnikowych

Prace dotyczyły zagadnień związanych z modelowaniem imperfekcji kształtu szczeliny smarnej łożysk ślizgowych typu zukosowanie panwi. Tego typu defekty są często przyczyną awarii zarówno małych jak i dużych maszyn wirnikowych, a doniesienia literaturowe dotyczące matematycznego i numerycznego opisu tego zjawiska są bardzo skromne.

Wyprowadzono odpowiednie równanie kształtu szczeliny smarnej dla zukosowanej panwi, zmodyfikowane zostało równanie Reynoldsa i równania zakłócające a następnie, poprzez model numeryczny, opracowany został nowy moduł komputerowy o nazwie IZOSKOS kompatybilny z systemem MESWIR. Moduł ten stanowi rozszerzenie możliwości obliczeniowych zwłaszcza z punktu widzenia modelowania zależności typu defekt-symptom.

Wykorzystując opracowane narzędzia badawcze, przeprowadzono badania wpływu zukosowania panwi przyjmując jako przedmiot badań dwupodporową maszynę wirnikową oraz turboset o mocy 200 MW. Wskazano na mocno zróżnicowany, zależny od maszyny i warunków pracy, wpływ defektu typu zukosowanie panwi na własności statyczne i dynamiczne obiektu. Warta podkreślenia jest zaproponowana metodologia badań, w której proponuje się zamiennie dwa

Assessment of the influence of bush misalignment on properties of small and large rotating machinery.

The works regarded the problems connected with modelling of imperfections of the shape of lubrication slot in slide bearings of the bush misalignment type. Such type of defects are often the main reason for the failure of both small and large rotating machinery, whereas the literature evidence on such type of problems is very modest.

Derived has been the equation describing the lubrication slot shape for the case of a misaligned bush. The Reynolds equation and the disturbance equations have been modified and then, in the form of a numerical model, developed has been a new computer procedure named IZOSKOS, compatible with the MESWISR suite of codes. The procedure is the extension of calculation capabilities, mainly from the point of view of modelling of the relations of the defect-symptom type.

Utilising developed research tools conducted have been investigations of the influence of bush misalignment assuming the rotating machinery and a turboset of 200 MW power as the object of investigations. Indicated has been a strongly differentiated, machine and operation conditions dependent, influence of the bush misalignment type of defect on static and dynamic properties of the object. Postulated methodology of investigations is worth to be distinguished, especially the fact that there are two types of models of rotor-bea-

modele układów typu wirnik-łożyska w zależności od potrzeb i charakteru analizy.

Ocena wpływu uszczelnień labiryntowych na własności dynamiczne dużej maszyny wirnikowej

Opracowano tzw. „łożyskowy” model teoretyczny uszczelnień labiryntowych turbosespołu 13K215. Określono parametry przepływu czynnika roboczego w stopniach turbiny oraz warunki pracy całego obiektu. Opracowany moduł „łożyskowy” uszczelnień zintegrowany został z systemem NLDW do nieliniowej analizy dynamiki wirników. Przeprowadzono cykl obliczeń testujących a następnie obliczeń symulacyjnych, których celem było określenie wpływu charakterystyk uszczelnień na dynamikę turbosespołu w warunkach przemieszczeń termicznych panwi i utraty stabilności układu. Jednocześnie kontynuowane były prace nad adaptacją innego „koncentrycznego” modelu uszczelnień labiryntowych. Model ten również został zintegrowany z systemem NLDW stwarzając tym samym interesujące możliwości badań porównawczych. Na podstawie dotychczas uzyskanych wyników można stwierdzić, iż wpływ uszczelnień w przypadkach „głęboko” stabilnej pracy turbosespołu jest niewielki. Wpływ ten może być większy jedynie w sytuacji, kiedy układ znajduje się na granicy stabilności.

Badania wpływu pęknięcia wału na charakterystyki dynamiczne maszyny wirnikowej

rings type suggested to be used interchangeably depending on the needs and the character of analysis.

Assessment of the influence of labyrinth sealings on dynamic properties of large rotating machine

Developed has been a so called "bearings" theoretical model of labyrinth sealings of the turboset 13K215. Determined have been parameters of the working medium flow in turbine stages as well as the conditions of operation of the entire object. Developed "bearings" module of sealings has been integrated with the NLDW system for the non-linear analysis of rotor dynamics. Conducted has been a series of testing calculations and then numerical simulations with the aim to determine the influence of sealing characteristics on the dynamics of turboset under conditions of bush thermal displacements and the loss of stability of the system. At the same time continued have been works on adaptation of another - "concentric" model of labyrinth sealings. That model has also been integrated with the NLDW system enabling in that way interesting comparative studies. Based on hitherto obtained results it can be concluded that the influence of sealings in cases of well into the stable region operation of the turboset is negligible. Such influence can be greater only in the case when the system is at the stability threshold.

Investigations of the influence of rotor crack on dynamic characte-

Model elementu MES z pęknięciem zaadaptowany został do systemu NLDW umożliwiając tym samym badanie wpływu pęknięcia wału na dynamikę małej i dużej maszyny wirnikowej. Przeprowadzono rozległe badania symulacyjne, w których analizowano nie tylko głębokość i położenie pęknięcia, ale również jego obwodowe usytuowanie w stosunku do płaszczyzny działania sił wymuszających. Okazało się, iż pęknięcie wirnika może wygenerować tzw. sprzężone formy drgań silnie zależne od usytuowania pęknięcia na wale. Sprzężenia te mogą mieć duże znaczenie w diagnostyce technicznej tego typu obiektów ponieważ formy wzdłużne i skrętne drgań wywołane drganiami poprzecznymi są lepszym „wyróżnikiem” diagnostycznym niż tradycyjne widma zdejmowane tylko z trajektorii przemieszczeń poprzecznych. Również fazowe widma drgań stanowiąc mogą doskonale uzupełnienie informacji diagnostycznych o defektach typu pęknięcie wału. Opracowana metodologia diagnozowania w oparciu o sprzężone formy drgań i widma fazowe stanowi największe osiągnięcie poznawcze w temacie. Wyniki badań mogą mieć również duże znaczenie użytkowe, ponieważ istnieje łatwość ich implementacji np.: do systemów nadzoru turbozespołów nowej generacji.

Badania doświadczalne wpływu imperfekcji maszyny wirnikowej na jej własności dynamiczne

Przeprowadzono badania eksperymentalne na stanowisku doświadczal-

ristics of rotating machinery

The FEM model with the crack has been incorporated into the NLDW suite of codes enabling in such way investigations of the influence of the shaft crack on dynamics of small and large rotating machine. Conducted have been extensive simulation investigations, where analysed have been not only the depth and the crack location but also its circumferential location with respect to the plane of action of excitation forces. It turned out that the rotor crack can be generated through a so called coupled forms of vibrations, strongly dependent on crack location in the shaft. Such couplings can be of a great significance in technical diagnostics of such type of objects as the axial and torsional forms of vibrations, rendered by transverse vibrations, are a better diagnostic "determinant" than traditional spectra taken only from transverse displacement trajectories. Also the phasic spectra of vibrations can serve as perfect supplement to diagnostic information about the defects of the shaft type. Developed methodology of diagnostics based on the coupled forms of vibrations and phasic spectra is the most valuable fundamental achievement in the topic. The results of investigations can be of a significant utilitarian value as there is a relative simplicity of their implementation, for example in systems for the control of turbosets of new generation.

Experimental investigations of the influence of rotating machine imperfections on its dynamic properties

nym dynamiki wirników. Badano trzy cykle badań, symulujące następujące defekty maszyny wirnikowej:

- niewyważenie wirnika o różnej konfiguracji przestrzennej
- rozosiowanie poziome i pionowe poszczególnych łożysk
- niewspółosiowość obu odcinków wału składających się na wirnik.

Niewyważenie realizowano za pomocą ciężarków montowanych na dwóch dyskach wirnika w środku odległości między łożyskami. Rozosiowanie łożysk realizowano poprzez przesuwanie łożyska środkowego o określoną wielkość w stosunku do osi przechodzącej przez dwa pozostałe łożyska. Niewspółosiowość wałów realizowano poprzez zukosowanie wirnika na sprzęgle łączącym te wały, podkładając między czołowe powierzchnie tarcz sprzęgła metalowe taśmy.

Na podstawie uzyskanych wyników badań wykonano wykresy trajektorii elementów wirujących. Obliczone amplitudy drgań pozwoliły narysować wykresy zależności amplitud drgań w funkcji prędkości obrotowej wirnika. Wykresy tego rodzaju są przydatne do analiz między innymi obrotów krytycznych wirnika i wpływu zadanych defektów na amplitudy drgań elementów maszyny.

Wyniki badań doświadczalnych będą służyły do weryfikacji wyników obliczeń dynamiki maszyn wirnikowych. Porównywanie wyników tych doświadczeń z wynikami obliczeń wykonanych dla analogicznych warun-

Conducted have been experimental investigations on the research rig for investigations of rotor dynamics. Studied have been three cycles of investigations where simulated have been the following rotating machine defects:

- *Rotor imbalance with different spatial configuration*
- *Horizontal and vertical misalignment of particular bearings*
- *Misalignment of both shaft sections constituting for the rotor.*

The imbalance has been realised by means of weights mounted on two rotor discs in the middle distance between the bearings. Bearings misalignment has been realised by shifting of the middle bearing by a specified quantity with respect to the axis intercepting two remaining bearings. The shaft misalignment has been realised by the rotor skewness in the coupling connecting these shafts by inserting the metal tapes into the front surfaces of discs.

On the basis of obtained results of investigations the trajectories of rotating elements have been depicted. Calculated amplitudes of vibrations enabled to draw the relations between the amplitudes of vibrations in function of rotor revolutions. The graphs of such type are useful in analysis of, amongst the others, critical rotor revolutions and the influence of imposed defects on the amplitudes of vibration of machine elements.

The results of experimental investigations will serve for verification of the results of calculations of the dynamics

ków ruchowych i zadanych imperfekcji maszyny służyć będzie doskonaleniu modeli obliczeniowych maszyn wirnikowych.

Wyniki badań doświadczalnych wirnika o skrzywionej osi pozwoliły na sformułowanie zależności wiążących kształt trajektorii czopów łożyskowych z rodzajem imperfekcji w postaci nieosiowości części składowych wirnika maszyny. Okazało się, że ruch obrotowy takiego wirnika generuje silne drgania w okolicach drugiej prędkości krytycznej. Amplituda tych drgań jest w niewielkim stopniu zależna od niewyważenia wirnika, jest zatem swoistą cechą wirnika o zgiętej osi i podpartego w trzech łożyskach ślizgowych. Wyniki tej serii badań pozwoliły na wyjaśnienie obserwowanego we wcześniejszych badaniach wzrostu amplitud drgań w pobliżu drugiej prędkości krytycznej. Były one spowodowane zukosowaniem dwóch odcinków wału na sprzęgle.

of rotating machinery. A comparison of the results of those experiments with the results of calculations performed for analogical motion conditions and imposed machine imperfections will serve in further modification of calculation models of rotating machinery.

The results of experimental investigations of a rotor with a skewed axis enabled to formulate relations linking the bearing pin trajectory shape with a kind of imperfection in the form of misalignment of a constituting parts of machine rotor. It turned out that the rotational motion of such rotor generates strong vibrations in the vicinity of second critical velocity. Amplitude of these vibrations is dependent only to a small extent on the rotor imbalance and is therefore individual feature of the rotor with a bended axis and supported in three slide bearings. The results of that series of investigations enabled explanation of, observed in earlier studies, the increase of amplitude of vibrations in the vicinity of second critical velocity. These were rendered by misalignment of two shaft sections in the coupling.

Wiesław Ostachowicz

Translated by Dariusz Mikielwicz

