

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 kilku rodzajów typowych uszkodzeń. Opracowano nowe typy specjalnych elementów spektralnych. Funkcje kształtu elementów sformułowano na podstawie dokładnych rozwiązań w dziedzinie częstotliwości układu równań różniczkowych opisujących zagadnienie propagacji fal sprężystych. Przyjęto założenie, że funkcje wynikowe stanowią funkcje interpolujące w spektralnym sformułowaniu zagadnienia. Zdefiniowane w ten sposób zadanie umożliwia dokładny opis rozkładu masy i sztywności wewnątrz każdego elementu. Takie postępowanie prowadzi do sformułowania dokładnej macierzy sztywności dynamicznej. Fakt ten prowadzi do znaczącej redukcji liczby równań rozwiązywanego układu (w porównaniu do metody elementów skończonych).

Spektralne elementy skończone można wykorzystać do analizy propagacji fal poprzecznych w belkach oraz płytach z uszkodzeniami w postaci pęknięć zmęczeniowych. Wykazano, że pęknięcia generują dodatkowe odbicia oraz osłabienie propagujących się fal. Efekty te można wykorzystać jako sygnały diagnostyczne. Uzyskane wyniki wskazują na fakt, iż w przypadku kompozytów duże znaczenie na interakcje fali z uszkodzeniem mają własności

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 a detection methods of selected kinds of typical damages. Developed have been new types of special spectral elements. Element's shape function have been formulated based on accurate solutions in the frequency domain of differential equations describing the problem of propagation of elastic waves. It has been assumed that the resulting functions are the interpolation functions in spectral definition of the problem. The problem defined in such a way enables accurate description of mass and stiffness distribution within each element. Such procedure leads to formulation of accurate matrix of dynamical stiffness. That leads to a significant reduction of a number of equations of a system under scrutiny (in comparison to the method of finite elements).

Spectral finite elements can be used in analysis of propagation of transverse waves in beams and plates with damages in the form of fatigue cracks. It has been proved that cracks generate additional reflections and damping of propagated waves. Such effects can be used as diagnostic signals. Obtained results indicate a fact that in the case of composites of significant importance, during interaction between the wave and defect, are mechanical properties of the composite described by the volume of

mechaniczne kompozytu opisywane objętością włókien wzmacniających i ich kątem ułożenia w kolejnych warstwach. Przeprowadzono badania eksperymentalne, które miały na celu zbadanie zjawiska propagacji fali sprężystej w elementach wykonanych z materiału kompozytowego. Dokonano analizy propagacji fali w elemencie płytowym a także pomiaru propagacji fali w elemencie belkowym. Badania eksperymentalne pokazały, że wyższa częstotliwość wymuszenia znacznie poprawia czułość metody. Ponieważ wyższe częstotliwości wymuszenia wymagają stosowania teorii wyższych rzędów dodatkowo opracowano modele elementów prętowych, które umożliwiają analizę tak sformułowanych zagadnień.

W grupie badań dotyczących zastosowań metod wibracyjnych opracowano uniwersalną metodę wykrywania uszkodzeń zmęczeniowych wykorzystując do tego celu oprogramowanie optymalizacyjne firmy EADS (*European Aerospace and Defence Systems*). Wykorzystano przy tym własne modele elementów skończonych z pęknięciami zmęczeniowymi. Zbadano, czy zastosowanie oprogramowania optymalizacyjnego umożliwia identyfikację nieciągłości. Udało się zidentyfikować pęknięcie zmęczeniowe w rzeczywistym elemencie konstrukcyjnym samolotu wojskowego. Do tego celu wykorzystano zmiany częstości i postaci drgań własnych analizowanego elementu. Badania zmierzały do przygotowania modeli elementów skończonych z pęknięciami w ten sposób, aby możliwa była ich integracja z oprogra-

reinforcing fibres and their angle of positioning in subsequent layers. Conducted have been experimental investigations, which were aimed at investigation of the elastic wave propagation in elements manufactured from composite material. Conducted has been analysis of wave propagation in the plate element as well as measurement of wave propagation in the beam element. Experimental investigations proved that higher frequency of excitation significantly improves the sensitivity of a method. Due to the fact that higher frequencies of excitation require application of a theory of higher orders therefore developed have been models of rod elements, which enable analysis of the problems formulated in such a way.

In the group of investigations regarding applications of vibration methods has been developed a universal method of fatigue defect detection using the EADS (European Aerospace and Defence Systems) optimization software. In the process utilized have been authors own models of finite elements with fatigue cracks. It has been investigated whether application of optimization software will enable identification of discontinuities. It was possible to identify a fatigue crack in real structural elements of a military aircraft. In doing so, the changes of frequency and forms of free vibrations of analysed element were monitored. Investigations were aimed at development of models of finite elements with cracks in such a way that their integration with EADS software was possible. Developed have also been

mowaniem EADS. Opracowano także procedury pozwalające na analityczne wyznaczenie gradientów macierzy sztywności elementu belkowego z pęknięciem zmęczeniowym. Opracowano także program komputerowy dla skończonego elementu powłokowego z pęknięciem zmęczeniowym. Niemniej ważnym osiągnięciem jest opracowanie procedur, które umożliwiają optymalizację pod kątem identyfikacji nieciągłości.

W grupie zagadnień dotyczących materiałów wielofunkcyjnych opracowano metody zmierzające do wykorzystania tych materiałów do aktywnego sterowania drganiami a także kontroli kształtu elementów. Badania koncentrowały się nad opracowaniem uogólnionego trójwymiarowego modelu przemiany martenzytycznej w skali „makro”. Opracowany model przystosowano do wykorzystania go z metodą elementów skończonych. Koniecznym było opracowanie odpowiednich i skutecznych algorytmów numerycznych rozwiązywania zagadnień silnie nieliniowych uwzględniających powstawanie dużych stref pseudoplastycznych związanych ze zjawiskiem *supersprężystości* oraz *efektem pamięci kształtu*. Podjęto także zagadnienie tworzenia opisu przemiany martenzytycznej dla uśrednionej kompozycji wariantów martenzytu i austenitu w kontekście współpracy takiego opisu z nanoskalowymi modelami przemiany martenzytycznej. Zaproponowano różne zmienne wewnętrzne, które mogłyby być użyteczne w tego typu modelowaniu. Modelowanie kształtu wykresu funkcji energii swobodnej, w wybranych

procedures allowing for analytical determination of stiffness matrix gradients of the beam element bearing the fatigue crack. Developed also has been a computer code for a finite shell elements with a fatigue crack. However, by far the biggest achievement is development of procedures, which enable optimization with the view of discontinuities identification.

Within the group of problems regarding the multi-functional materials developed have been methods aimed at utilization of these materials for active control of vibrations as well as element shape monitoring. Investigations were concentrated on development of a general three-dimensional models of martensitic transformation in the “macro” scale. Developed model has been tailored to use together with a method of finite elements. Therefore it was necessary to develop relevant and efficient numerical algorithms for solving strongly nonlinear problems making an allowance for formation of large pseudo-plastic zones related to the super-elasticity phenomenon and the shape memory effect. The works also have started on the development of description of martensitic transformation for averaged composition of martensite and austenite variants in the context of support of such description with nanoscale models of martensitic transformation. Postulated have been different internal variables, which would be useful in such kind of modeling. Modeling of the shape of free energy function distribution in selected sectors of the domain is usually conduc-

sektorach dziedziny, przeprowadza się w oparciu o formalizm wiązek włókni- stych, który jest odpowiedni dla wyra- żania złożonych kształtów geometrycz- nych. Wskazano na problemy, które po- winny być pokonane w procesie rozwi- niania proponowanego modelu. Wprowa- dzono nanoskalowy model pęknięcia dla monokryształu, widziany jako podsta- wa dla określenia tensora zniszczenia oraz tworzenia równań ewolucji opisu- jących ten proces. Nanoskalowy model pęknięcia rozważany jest razem z nano- skalowym modelem plastyczności opi- sującym poślizgi na oddzielnych po- wierzchniach.

W tematyce analizy stanu naprężeń i odkształceń konstrukcji doskonalono metody modelowania hierarchicznego. Przeprowadzono statyczną analizę adaptacyjną złożonych układów mecha- nicznych a także analizę modalną struk- tur złożonych. Przedmiotem badań by- ły adaptacyjne elementy skończone o charakterze bryłowym, powłokowymi i przejściowym. Poprawiono efektywność istniejących algorytmów i programów komputerowych MES w zakresie obej- mującym płytowe i powłokowe elemen- ty konstrukcyjne. Zasadniczy cel zwią- zany z adaptacyjną analizą modalną polegał na opracowaniu algorytmów i programów w zakresie dotyczącym trój- wymiarowych elementów konstrukcyj- nych. Badania ukierunkowano na opra- cowanie teorii oraz metod statycznej i dynamicznej analizy adaptacyjnej rze- czywistych elementów maszyn, wykona- nych z materiałów tradycyjnych, mate- rialów kompozytowych oraz materiałów

ted on the basis of the fibre-beam for- malism, which is adequate for determi- nation of complex geometrical shapes. Indicated have been problems, which ought to be overcome in the process of development of suggested model. In- troduced has been a nanoscale model of cracking for the case of a monocry- stal, which is perceived as a founda- tion for determination of a damage ten- sor and formation of the evolution equa- tion describing such process. A nano- scale model of cracking is considered to- gether with a nanoscale model of pla- sticity which describes slips at separate surfaces.

Within the topic of analysis of the state of stresses and structure deforma- tion modified have been methods of hier- archical modeling. Conducted has be- en a static adaptive analysis of complex mechanical systems, as well as modal analysis of complex structures. The to- pic of investigations were adaptive finite elements of a lump, shell or transition- al character. Corrected has been effec- tiveness of existing algorithms and MES computer software in the area of slab and shell structural elements. The prin- cipal objective related to adaptive mo- dal analysis was based on development of algorithms and codes in the area regarding three-dimensional structural elements. Investigations were directed on the development of theory and me- thods of static and dynamic adaptive analysis of real machine elements, ma- nufactured from traditional materials, composite materials as well as materials with controllable mechanical proper-

o sterowalnych własnościach mechanicznych. Planowane jest uwzględnienie niejednorodności materiałowych (pęknięcia zmęczeniowe, delaminacje) i konstrukcyjnych (kontakt). Poprawiono efektywność numeryczną algorytmów adaptacyjnych elementów powłokowych pierwszego rzędu, opartych na aproksymacji typu *hp* poprzez wprowadzenie nowego sposobu wymuszania zerowych odkształceń w kierunku poprzecznym i skalowanie niewiadomych. Przystosowano rodzinę pryzmatycznych elementów adaptacyjnych do potrzeb adaptacyjnej analizy modalnej. Zakończono prace nad tworzeniem globalnej macierzy sztywności i mas do tej analizy.

Interesujące są wyniki badań, które podjęto wspólnie z zespołem Ośrodka Techniki Plazmowej i Laserowej IMP PAN. Wkład badawczy zespołu O4/Z1 dotyczył modelowania zjawisk termosprężystych podczas procesu laserowego spawania.

O4/Z2/T1: Podstawy mechaniki konstrukcji i materiałów

Celem badań było opracowanie nowych i dalsze rozwinięcie znanych metod modelowania i analizy numerycznej dwuwymiarowych elementów konstrukcji maszyn, a także wybranych zagadnień mechaniki ciał stałych z mikrostrukturą oraz zjawisk tarcia i zużycia na powierzchni ciał.

Wydano obszerną monografię pt. „Statyka i dynamika powłok wielopłatowych: Nieliniowa teoria i metoda

*ties. Considered is also incorporation of material non-homogeneities (fatigue cracks, delaminations) and structural ones (contact). Improved has been numerical effectiveness of adaptive algorithms of shell elements of the first order, based on *hp* type approximation through introduction of a new way of exciting null deflections in the transverse direction and scaling of unknowns. Adapted has been a family of prismatic adaptive elements for the sake of modal adaptive analysis. Concluded have been activities on development of a stiffness and mass matrices for such analysis.*

Interesting are the results of investigations, which have commenced in co-operation with the group from the Centre for Plasma and Laser Techniques of IMP PAN. The contribution of the O4/Z1 group referred to modeling of thermo-elastic phenomena during the laser welding process.

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

The objective of investigations was a development of new and further extension of known methods of modelling and numerical analysis of two-dimensional elements of machine structures as well as selected problems of solid mechanics with microstructure and friction and wear phenomena on the body surface.

An extensive monograph titled “Statics and dynamics of multi-fold shells: Non-linear theory and finite element method have been published. It contains original, extensive contribu-

elementów skończonych”. Zawiera ona oryginalny, całościowy pogląd autorów na ogólną nieliniową teorię oraz analizę numeryczną MES powłok kawałkami regularnych i nieregularnych, wielopłatowych konstrukcji powłokowych w zakresie dowolnej deformacji. Monografia składa się z dwóch części – teoretycznej i numerycznej.

W części teoretycznej sformułowano ściśle powierzchniowe zasady dynamiki powłok wielopłatowych jako wynik całkowania po grubości odpowiednich zasad dynamiki ośrodka ciągłego. Odpowiadająca im powierzchniowa kinematyka powłoki jest konstruowana ściśle z rozważań energetycznych, ale już na poziomie dwuwymiarowym. W takim sformułowaniu jedyne przybliżenia są w równaniach konstytutywnych, które są z definicji zależnościami przybliżonymi, opartymi o badania eksperymentalne. Konsekwencją takiego podejścia jest nieklasyczna kinematyka powłoki, wyrażona przez wektor przesunięć i tensor obrotów jako podstawowe zmienne niezależne.

W części numerycznej monografii przedstawiono różne aspekty analizy zagadnień początkowo-brzegowych na przestrzeni konfiguracyjnej, zawierającej grupę obrotów $SO(3)$. W szczególności, opracowano nietrywialne zasady parametryzacji, dyskretyzacji, interpolacji, akumulacji, linearyzacji, iteracji, całkowania, zbieżności rozwiązań itp. na grupie $SO(3)$. Skonstruowano odpowiednie rodziny powłokowych elementów skończonych oraz przedstawiono wyniki obszernej analizy nume-

tion of authors to a general non-linear theory and FEM numerical analysis of shells of partially regular and non-regular character, multi-fold shell structures in the range of arbitrary deformation. The monograph consists of two parts, namely theoretical and numerical one.

In the theoretical part two-dimensional principles of multi-fold shell dynamics have been formulated by integration across the thickness of relevant principles of continuous medium dynamics. Corresponding surface kinematics of shell is developed directly from energetical considerations, but at the two-dimensional level. In such formulation the only approximations are in the constitutive equations, which are approximate by definition and are based on experimental investigations. A consequence of such approach is a non-classical kinematics of the shell, expressed by a vector of translation and a rotation tensor as basic independent variables.

In the numerical part of the monograph various aspects of analysis of initial-boundary problems in the configuration space containing a rotations group $SO(3)$ have been presented. In particular, developed have been non-trivial principles of parametrisation, interpolation, accumulation, linearisation, iteration, integration, solution convergence etc. on the group $SO(3)$. Developed have been relevant families of finite shell elements and presented have been results of abundant numerical analysis using FEM of several tens

rycznej MES kilkudziesięciu skomplikowanych, odpowiednio dobranych przykładów nieliniowych zadań równowagi, stateczności i dynamiki powłok regularnych i nieregularnych powłokowych konstrukcji wielopłatowych. Te obszernie wyniki numeryczne ilustrują różne aspekty nieliniowej teorii i analizy numerycznej skomplikowanych konstrukcji powłokowych.

Sformułowano kompletne zagadnienie brzegowe dla geometrycznie nieliniowej teorii cienkich powłok sprężystych, wyrażone całkowicie poprzez zmienne wewnętrzne: siły membranowe i zmiany krzywizn powierzchni środkowej powłoki. Wyprowadzono również odpowiednie równania stateczności powłok wyrażone w tych zmiennych wewnętrznych, stosując technikę perturbacji stanu dokrytycznego. Powyższe zagadnienia brzegowe zostały następnie uproszczone dla trzech przypadków szczególnych deformacji: a) stanu prawie bezwydłużeniowego, b) stanu prawie membranowego i c) stanu zgięciowego.

Opracowano ogólną nieliniową teorię powłok sprężystych z uwzględnieniem zmian fazowych materiału powłoki. Sformułowanie oparto na statycznie i kinematycznie ścisłej redukcji zagadnienia trójwymiarowego do zagadnienia dwuwymiarowego, formułowanego na powierzchni podstawowej powłoki. Wszystkie zależności wyprowadzono z zasady wariacyjnej stacjonarności całkowitej energii potencjalnej. Wyprowadzono, w szczególności, po raz pierwszy w literaturze ogólną postać dynamicz-

of complex, specially selected examples of non-linear equilibrium, stability and dynamics of regular and irregular multi-fold shell structures. These abundant numerical results illustrate various aspects of non-linear theory and numerical analysis of complex shell structures.

Formulated has been a complete boundary value problem for the case of a geometrically non-linear theory of thin elastic shells, which is expressed entirely through internal variables, namely membrane forces and changes of curvature of middle surface of the shell. Derived also have been relevant equations of stability of shells expressed by internal variables, using a technique of precritical state perturbation. Above boundary value problems have been subsequently simplified to three specific cases of deformations: a) almost in extensional state, b) almost membrane state and c) bending state.

Developed has been a general non-linear theory of elastic shells with account of phase changes of the shell material. Formulation is based on statically and kinematically exact reduction of the three-dimensional problem to a two-dimensional problem, formulated on the base surface of the shell. All relations have been derived from a variational principle of stationarity of total potential energy. Derived has been, in particular, for the first time in literature, a general form of dynamical continuity conditions on a movable, coherent, and non-coherent singular curve, which models the phase change of a shell

nych warunków ciągłości na ruchomej, koherentnej i niekoherentnej krzywej osoblwej, modelującej zmianę fazową materiału powłoki.

Wprowadzono równania systemu dynamicznego, opisującego zachowanie się ciała dwuwymiarowego podlegającego poślizgom na oddzielnych powierzchniach. Podano przykład numeryczny MES, w którym jest realizowana inicjacja powierzchni poślizgu, jej propagacja poprzez brzeg aż do uaktywnienia całej powierzchni poślizgu przecinającej ciało, a następnie symulowana jest numerycznie dynamika tego poślizgu. Podjęto zagadnienie tworzenia opisu przemiany martenzytycznej dla uśrednionej kompozycji wariantów martenzytu i austenitu w kontekście współpracy takiego opisu z modelami nanoskalowymi przemiany martenzytycznej. Zaproponowano metody tworzenia funkcji energii swobodnej w pewnych sektorach jej dziedziny i dla pewnej ustalonej temperatury odpowiadającej ferrosprężystości.

Analizowano kształty, rozmiary i liczbę cząstek zużycia w styku dwóch trących się ciał. Zwrócono uwagę na to, że cząstki o pierwotnie płaskich kształtach mogą być „zrolowane” w kule, walce i igiełki. Opisano kinematykę cząstek względem siebie za pomocą przemieszczeń (translacji i obrotów). Sformułowano modele konstytutywne cząstek w dwóch różnych opisach – kontynualnym i dyskretnym.

Badano anizotropowe i niejednorodne tarcie i zużycie, które mogą wynikać z anizotropowej chropowatości powierz-

material.

Derived have been equations of a dynamical system describing behaviour of a two-dimensional body subjected to slips at separate surfaces. Presented has been a FEM numerical example, where realized is initiation of the slip surface, its propagation through the border until actuation of the entire slip surface transecting the body and then simulated is, numerically, the dynamics of such slip. Commenced have been activities related to development of description of martensitic transformation for a case of averaged composition of martensite and austenite variants in the context of cooperation of such description with nanoscale models of martensitic transformation. Postulated have been methods of formation of free energy function in selected sectors of such domain and for some specified temperature corresponding to the ferroelasticity.

Analysed have been shapes, dimensions and a number of wear particles at the contact of two rubbing bodies. Attention has been paid to the fact that the particles with originally flat shapes can be “rolled into” balls, cylinders and needles. Kinematics of particles with respect to each other has been described by means of a displacements (translations and rotations). Formulated have been constitutive models of particles in two different descriptions – continuum and discrete ones.

Investigated has been anisotropic and non-homogeneous friction and wear, which could result from anisotropic roughness of solid body surfaces and

chni ciał stałych oraz anizotropii i niejednorodności mikrostruktury wielu materiałów inżynierskich. Sformułowano zaawansowane modele tarcia, które opisują ewolucję anizotropii i niejednorodności tarcia wywołaną krzywizną toru poślizgu. Są to równania rzędu pierwszego, drugiego i wyższych ze względu na potęgi krzywizny toru poślizgu. Krzywizna może być źródłem dodatkowego tarcia (dodatniego lub ujemnego), a tor poślizgu może w sposób istotny zmieniać swój kształt.

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

I. Analiza stanu dynamicznego dużych maszyn energetycznych

Kontynuowano badania dotyczące wpływu imperfekcji konstrukcyjnych i eksploatacyjnych układu wirującego na stan dynamiczny maszyn energetycznych. W szczególności badano wpływ takich czynników jak pęknięcia wirnika, rozosiniowanie linii wałów wskutek dilatacji termicznych i eksploatacyjnych podpór a także „przekoszenia” panwi w stosunku do osi czopów łożyskowych.

Przeprowadzono zaawansowane obliczenia komputerowe dla tysięcy zestawów danych tak, aby można było uzyskać wiarygodne informacje dotyczące wpływu np.: usytuowania i powolnej propagacji pęknięcia wału, stopniowych przemieszczeń podpór aż do wielkości granicznych czy też „przekoszeń” panwi aż do zatarcia łożysk na stan dynamicz-

aniosotropy and non-homogeneity of microstructures of several engineering materials. Formulated have been advanced models of friction, which describe evolutions of anisotropy and friction non-homogeneity rendered by the sliding trajectory curvature. There are first, second and higher-order equations with respect to the power of the sliding path curvature. The curvature sliding path can be a source of additional friction (positive or negative), whereas the slip trajectory can significantly change its shape.

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

I. Analysis of dynamic state of large power engineering machinery

The investigations of rotor system imperfections (either construction or operation ones) influence on the power machinery dynamic state have been continued. In particular, investigated has been the influence of such factors as rotor crack, shaft line misalignment due to thermal and operational dilatations of supports as well as bearing-bush skewness with respect to axis of bearing journals.

Advanced computer calculations for the case of thousands of datasets have been conducted so that it could be possible to obtain reliable information about the influence of for example location and slow propagation of the shaft crack, gradual support displacements

ny obiektu. Takie postępowanie pozwoliło ujawnić szereg bardzo interesujących zjawisk jak:

- Analiza kaskadowych widm drgań w odniesieniu do propagacji pęknięcia wykazała istnienie pewnego rezonansu drgań układu w funkcji głębokości pęknięcia; potwierdziło się przypuszczenie, że imperfekcje typu pęknięcie wału mogą wywołać znaczące sprzężone formy drgań a także, że mogą być one dobrym wyróżnikiem diagnostycznym.
- Badania rozosiowania linii wałów doprowadziły do spostrzeżenia, że w przypadku wielopodporowych maszyn wirnikowych można zaobserwować pewną antysymetrię granicznych przemieszczeń panwi dla sąsiadujących ze sobą podpór. Można więc zbudować płaszczyzny akceptowalnych przemieszczeń panwi dla jednej podpory i na tej podstawie szybko oszacować ewentualne zagrożenia w podporach sąsiednich.
- Badania „przekoszeń” panwi ujawniły mocno zróżnicowany wpływ tego defektu w zależności od jego usytuowania wzdłuż linii wirników. Okazało się, że znaczący wpływ mogą wywierać zdeformowane w ten sposób panwie w podporach dość odległych od miejsc uznanych za nieważne dla układu pod względem dynamicznym.

increasing to reach limiting values or the bearing-bush skewness, until the bearings seizure, on the dynamical state of the object. Such activities enabled to reveal a series of very interesting phenomena such as:

- *Analysis of cascade vibration spectra with respect to crack propagation proved existence of some resonance of system vibrations in function of the crack depth; the assumption has been confirmed that imperfections of the shaft crack type can induce significant coupled forms of vibrations and can be also a decent diagnostic determinant (indicator).*
- *Investigations into shaft line misalignment led to a conclusion that in the case of multi-supported rotor machinery there can be observed some asymmetry of limiting bearing-bush displacements in the case of neighbouring supports. Therefore there can be developed planes of acceptable bush displacements for a single support and on such basis relatively quickly estimate eventual dangers in neighbouring supports.*
- *Investigations of bush skewness revealed strongly differentiated influence of such defect with respect to its location along the line of rotors. It turned out that skewed bushes placed relatively far from elements regarded crucial to the system's dynamics can demonstrate significant influence on the machine dynamic state.*

II. Studium flutteru hydrodynamicznego

Przeprowadzono badania flutteru hydrodynamicznego na przykładzie laboratoryjnego wirnika dwupodporowego za pomocą systemu komputerowego NLDW. Z badań wynika interesujące spostrzeżenie, iż wiry olejowe rozwijają się poprzez powolne „rozszczenie się” eliptycznej trajektorii na dwie pętle: zewnętrzną i wewnętrzną. Pętla wewnętrzna ulega w pierwszej fazie zmniejszeniu, po czym zaczyna się jej wzrost i zamiana z pętlą zewnętrzną. Dotychczasowa pętla zewnętrzna zanika i w końcowej fazie wirów mamy już jedną (zbliżoną do kołowej) trajektorię. Wiry przechodzą do kolejnej, znacznie bardziej już niebezpiecznej fazy, a mianowicie do bicia olejowego. Obserwacja znaczników fazy, a więc położenia na trajektoriach którym odpowiadają wektory wymuszeń zewnętrznych usytuowane w przyjętym układzie współrzędnych poziomo w prawo dostarcza praktycznych informacji dotyczących wyróżnika diagnostycznego związanego z niestabilnością hydrodynamiczną. Wynika stąd, że temu samemu położeniu wektora siły wymuszającej (wektora niewyważenia), w przypadku zaawansowanego już bicia olejowego, odpowiadają trzy różne rozkłady ciśnienia i tym samym zupełnie inny stan dynamiczny łożyska. Oznacza to, że stan ten znamieny jest posiadaniem aż trzech znaczników fazy w rejestrowanym przedziale trajektorii od 0 do 720 stopni. W tej konwencji wiry olejowe posiadają dwa znaczniki fazy, a stabilny zakres pracy maszyny jeden

II. A study of hydrodynamical flutter
Investigations into hydrodynamical flutter have been conducted on the basis of a laboratory two-support rotor using the NLDW computer software. An important observation emerges from investigations that the oil whirls develop through a gradual bifurcation of elliptic trajectory into two loops, namely external and internal one. Internal loop shrinks in the first phase and then subsequently starts its growth and exchange with the external loop. Hitherto present external loop diminishes and in final stage of whirls we deal only with one (approximately circular) trajectory. Whirls pass to a subsequent, more dangerous phase, namely the oil whipping. Observation of phase indicators and hence locations on trajectories with corresponding excitation vectors, situated in the assumed coordinate system horizontally left, delivers practical information regarding diagnostic determinant connected with hydrodynamical instability. It stems from that that the same location of the excitation force (influence vector) is referenced by three different pressure distributions and hence different dynamic state of the bearing. It means that such state features three phase indicators in recorded range of trajectory from 0 to 720 degrees. In such conventions the oil whirls possess two phase indicators whereas the stable machine operation has one indicator. The above discovery can have significant importance in monitoring of hydrodynamical instability as these deliver practical measure for

znacznik. Powyższe spostrzeżenia mogą mieć duże znaczenie w monitorowaniu niestabilności hydrodynamicznej gdyż dostarczają praktycznej miary tego rodzaju stanów w postaci ilości znaczników fazy.

III. Rozwój koncepcji „funkcji wagowych” w analizie stanu układu: wirnik–podpora–konstrukcja podpierająca

Dokonano modyfikacji systemu komputerowego NLDW zgodnie z przyjętym algorytmem. Ze względu na złożoność zagadnienia modyfikację rozpoczęto od uproszczenia algorytmu poprzez przyjęcie następujących założeń:

- charakterystyki masowe pozostają stałe;
- dla danej prędkości obrotowej prążki 1X, 2X, 3X znajdują się w różnych przedziałach adekwatności;
- liczba kroków w procesie doboru charakterystyk tłumiąco-sztywnościowych jest określana z góry;
- wartości t_{\max} dla każdego kroku przyjmowane są jak dla pełnego cyklu obliczeń.

Przeprowadzono obliczenia dla przypadku o szczególnej postaci widma drgań dla wirnika trójpodporowego, które wskazują na poprawność koncepcji i dokonanych modyfikacji numerycznych. Rozpoczęto prace związane z opracowaniem kryteriów zbieżności zmodyfikowanych programów NLDW-WAGI.

such type of states in the form of a number of phase indicators.

III. Development of a concept of “weigh functions” in analysis of the state of the rotor-supports-foundation system

Modification of the computer system NLDW has been accomplished in accordance with the assumed algorithm. Due to a complexity of the problem modification has commenced from the algorithm simplification by taking up the following assumptions:

- *mass characteristics remain constant;*
- *for a given rotational velocity the fringes 1X, 2X, 3X remain in different ranges of adequacy;*
- *number of steps in the selection process of damping-stiffness characteristics is determined ahead of calculations;*
- *values of t_{\max} for each step are assumed as for the full cycle of calculations.*

Calculations have been conducted for a case showing a specific form of a vibration spectrum for a three-support rotor. They indicate appropriateness of a concept and performed numerical modifications. Activities related to setting out of convergence criteria of modified NLDW-WAGI codes have been started.

Alternative regions of adequacy have been determined for a case of a three-support power machine rotor indispensable in verification of method and

Wyznaczono alternatywne przedziały adekwatności dla wirnika trójpodporowego maszyny energetycznej niezbędnych do weryfikacji metody i opracowanego programu. Dla wirnika wyznaczono przedziały adekwatności w oparciu o kryterium rezonansowe. Dokonano zestawienia charakterystyk opracowanych różnymi metodami – opartymi na matematycznym modelu maszyny, jak i na wynikach badań eksperymentalnych. Z uwagi na fakt, iż odpowiedni dobór przedziałów adekwatności ma decydujący wpływ na jakość otrzymanych wyników konieczne jest staranne przeanalizowania różnych metod ich wyznaczania i weryfikacja z eksperymentem.

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

Celem badań było opracowanie kompleksowego systemu programów numerycznych wyznaczania rozkładów przemieszczeń i naprężeń oraz parametrów ruchu, występujących podczas drgań wymuszonych i samowzbudnych, układu łopatek wirnikowych znajdujących się w przepływie ściśliwym, przy różnych warunkach pracy maszyny przepływowej.

Opracowano model i algorytm wyznaczania parametrów 2D i 3D flutteru w przepływie lepkim. Do realizacji oceny drgań samowzbudnych wykorzystano model drgającej palisady dla modelu przepływu lepkiego (według modelu Boldwina-Lomaksa), metodą Goduno-

developed code. In the case of a rotor regions of adequacy have been determined and based on resonance criteria. Tabulation of characteristics obtained by means of different methods – based on a mathematical model of machine have been conducted as well as results of experimental investigations. Due to a fact that relevant selection of regions of adequacy has a decisive influence on the quality of obtained results it is deemed necessary to carefully analyse different methods of their determination and experimental verification.

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

The objective of investigations was a development of numerical codes for determination of distributions of displacements and stresses as well as motion parameters occurring during forced and free vibrations of a system of rotor blades in a compressible flow at different conditions of operation of a fluid-flow machinery.

A model and algorithm for determination of 2D and 3D flutter in the compressible flow has been developed. In realization of the assessment of self-excited vibrations utilized has been a model of vibrating palisade for a model of a viscous flow (according to a Boldwin-Lomax model), using a Godunov-Kolgan method. Numerical calculations of 3D flutter for 11 configurations and non-structural grids

va-Koljana. Przeprowadzono obliczenia numeryczne 3D fluteru dla 11 konfiguracji i siatek niestrukturalnych. Porównano wyniki numeryczne z eksperymentalnymi uzyskując dobrą zbieżność.

Określono siły niestacjonarne wysoko i niskoczęstotliwościowe w stopniu regulacyjnym i stopniu z upustem turbiny 13K215.

Przeprowadzono analizę częstości drgań własnych dwóch ułotkowanych tarcz ze 24 łopatkami osadzonych na wale i fundamencie przy pomocy programu ABAQUS. Stwierdzono, że wał, łopatki osadzone na tarczy i fundament mają duży wzajemny wpływ na formy i częstości drgań układu, szczególnie dla kilku pierwszych form drgań. Fakt ten stanowi nowość w literaturze przedmiotu. Porównano także częstości drgań własnych dwóch tarcz osadzonych na wale i zamocowanych w fundamencie pomierzonych eksperymentalnie i obliczonych przy pomocy programu ABAQUS.

Przeprowadzono analizę częstości drgań własnych nastrojonych i rozstrojonych dwóch ułotkowanych tarcz na wale. Stwierdzono, że rozstrojenie łopatek powoduje sprzężenie drgań giętno-skrętnych układu, co jest nowością w literaturze przedmiotu. Do analizy wykorzystano program MES-ANSYS.

were done. The results of numerical calculations have been compared with experimental results and a satisfactory agreement has been achieved.

High and low-frequency non-stationary forces in the control stage with bleeding of 13K215 turbine have been determined.

Free vibrations of two bladed discs with 24 blades embedded on the shaft and foundation using the ABAQUS software were done. It has been concluded that the shaft, blades fixed on a disc and foundation have a significant mutual influence on the forms and natural frequencies of system, particularly for first few forms of vibrations. Such fact introduces a novelty into the literature of the subject. Compared also have been frequencies of natural vibrations of two discs, fixed to the shaft and foundation, which have been experimentally measured and calculated using the ABAQUS code.

Analysis of frequencies of natural tuned and mistuned vibrations of two bladed discs on a shaft has been conducted. It has been concluded that mistuning of blades couple bending and torsional modes vibrations, which is a novelty in the literature of the subject. A code MES-ANSYS has been used in calculations.