

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 kontynuowano rozwijając opracowane wcześniej metody detekcji typowych uszkodzeń w izotropowych oraz kompozytowych elementach konstrukcyjnych.

Wykorzystując Metodę Spektralnych Elementów Skończonych prowadzono testy numeryczne dotyczących propagacji fal wzdlużnych i poprzecznych (ścinających) w prętach, belkach, płytach i membranach. Potwierdzono, iż w przypadku materiałów kompozytowych 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 kontynuowano również prace dotyczące optymalnego rozmieszczenia czujników pomiarowych dla celów detekcji uszkodzeń. Przebadano szereg konfiguracji ułożenia czujników – rozproszone i skupione. Stwierdzono, że układy czujników rozproszonych pozwalają na wykrywanie uszkodzeń w konstrukcji

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

Investigations in the area of analysis of elastic wave propagation in structural elements have been continued through refinement of development earlier methods of detection of typical damages in isotropic or composite construction elements.

Using the Method of Spectral Finite Elements numerical tests were performed related to propagation of longitudinal and transverse (shear) waves in wires, beams, slabs and membranes. It has been concluded that in the case of composite materials of significant importance, in interaction between the wave and damage, are composite mechanical properties described by the volume of reinforcing fibers and the angle of their location in subsequent layers. Mechanical properties of composites influence strongly the speed of propagation of elastic waves as well as the shape of the wave front. Recognition and understanding of the influence of these parameters is extremely important from the point of view of designing damage detection systems utilizing the variation in propagation of elastic waves.

During accomplishment of activities continued have also been the works related to optimal distribution of measurement sensors for the purpose of damage detection. Tested has been a series of configurations of sensor alignments, both distributed or lumped. It has been concluded that the systems of

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. Opracowano i zweryfikowano metody tworzenia tzw. *map uszkodzeń* w oparciu o wyniki pomiarowe, które pozwalają na ocenę położenia oraz wielkości uszkodzeń w badanych elementach konstrukcyjnych. Opracowano także metodę identyfikacji rodzaju uszkodzenia na podstawie zmian w propagującej fali mechanicznej. Metoda wykorzystuje między innymi analizę falkową zarejestrowanych sygnałów.

W zakresie adaptacyjnej analizy modalnej struktur prostych i złożonych (zawierających w sobie części płytowe, powłokowe, bryłowe oraz strefy przejściowe) kontynuowano prace nad metodami, algorytmami oraz programami metody elementów skończonych (MES). W szczególności opracowano metody szacowania błędów: aproksymacji, modelowania i błędu całkowitego w adaptacyjnej analizie modalnej. Opracowane programy uruchomiono, przetestowano i włączono do istniejącego pakietu MES, który jest stosowany do analizy adaptacyjnej prostych i złożonych układów mechanicznych. Ponadto zakończono badania nad metodami, algorytmami i podprogramami wykrywania: *lockingu*, niewłaściwej granicy rozwiązania i efektu brzegowego w częściach cienkościennych drgających układów mechanicznych. Opracowano także udoskona-

distributed sensors enable detection of damages in a construction without information about its initial state as well as are characterized by a lack of so called dead zones, which are characteristic to configurations based on a concept of a system of lumped sensors. Developed and verified were the methods of formation of so called damage maps based on the results of measurements, which enable determination of location and the extent of damages in investigated structural elements. Developed also have been methods of intensification of types of damages on the basis of variations in propagating mechanical wave. The method utilized, amongst the others, the wavelet analysis of recorded signals.

In the frame of the topic of adaptive modal analysis of simple and complex structures (containing slab, shell and spatial parts as well as transition zones) continued have been works on the methods, algorithms and codes of finite element method. In particular developed have been methods of estimation of errors, namely due to approximation, modeling in such a way a total error in adaptive modal analysis. Developed codes have been commissioned, tested and included into the existing FEM package, which is used for adaptive analysis of simple and complex mechanical systems. Additionally completed have been works on methods, algorithms and subroutines of detection of: locking, inappropriate limit of solution and the boundary effect in thin walled parts of vibrating mechanical

lone procedury adaptacyjne dla zagadnienia drgań własnych, polegające na wprowadzeniu iteracji na krokach adaptacyjnych h i p . Planowane jest zastosowanie opracowanych do chwili obecnej: teorii, metod (algorytmów) i programów w adaptacyjnej analizie drgań wymuszonych dla prostych i złożonych układów mechanicznych.

W roku sprawozdawczym zainicjowano i prowadzono nowy nurt badań, którego przedmiotem jest wykorzystanie właściwości materiałów z magnetyczną pamięcią kształtu do aktywnego sterowania właściwościami mechanicznymi wybranych konstrukcji. W ramach prowadzonych badań opracowano model fenomenologiczny magnetycznego efektu pamięci kształtu oraz dokonano jego implementacji dla przypadku *Metody Elementów Skończonych*. W tym celu opracowano specjalny algorytm oraz przygotowano program komputerowy w języku MATLAB rozwiązujący nieliniowe zagadnienie statyki metodą przyrostową w oparciu o procedurę Newtona-Raphsona. Wykorzystując opracowane narzędzia prowadzono badania numeryczne dotyczące sposobów redukcji drgań wymuszonych za pomocą układu siłowników z magnetyczną pamięcią kształtu dla belek izotropowych lub kompozytowych z uszkodzeniami w postaci pęknięć.

O4/Z2/T1: Podstawy mechaniki konstrukcji i materiałów

Sformułowano ściśle, wypadkowe warunki równowagi dla ogólnej nieliniowej teorii powłok rozwidlonych i przecina-

systems. Developed also have been refined adaptive procedures for the problems of free vibrations, based on introduction of iterations in the adaptive steps h and p . Planned also is application of developed up to date theories, methods (algorithms) and codes in adaptive method of analysis of excited vibrations in the case of simple and complex mechanical systems.

In the reporting year initiated and conducted has been a new stream of investigations aimed at utilization of material properties with magnetic shape memory for active control of mechanical properties of selected structures. In the frame of performed investigations developed has been a phenomenological model of magnetic effect of memory shape and its implementation in the case of FEM method has been accomplished. Having that in mind developed has been a special algorithm as well as a computer code in MATLAB environment, solving the non-linear problem of statics by means of the gradient method, based on the Newton-Raphson method. With the aid of developed tools carried out were numerical investigations regarding the ways of reduction of excited vibrations by means of a system of actuators featuring a magnetic shape memory for isotropic or composite beams with damages in the form of cracks.

O4/Z2/T1: Fundamentals of mechanics of structures and materials

Formulated have been precise, resultant conditions of equilibrium in the case of

jących się. Warunki te zostały wyprowadzone przez bezpośrednie całkowanie po grubości powłoki globalnych warunków równowagi ośrodka ciągłego. W każdym regularnym wewnętrznym i brzegowym punkcie powierzchni podstawowej powłoki wyprowadzone ściśle, lokalne równania równowagi są równoważne, jak oczekiwano, do tych znanych z literatury. Nowe, ściśle i wypadkowe warunki ciągłości sił i momentów uzyskano wzdłuż krzywych osobliwych, modelujących rozwidlenie i samoprzecięcie się powierzchni podstawowych, oraz w punktach osobliwych brzegu powłoki. Wszystkie uzyskane wyniki nie zależą od grubości powłoki, jej struktury wewnętrznej po grubości i własności materiałowych oraz są słuszne dla dowolnej deformacji elementów materialnych powłoki.

Ustanowiono lokalną grupę symetrii dla ogólnej, dynamicznie i kinematycznie ściślej teorii powłok sprężystych. Grupa składa się z trójek tensorów, które pozostawiają niezmienniczą funkcję gęstości energii sprężystej przy zmianie konfiguracji odniesienia powłoki. Poprzez te tensory zdefiniowano powłoki zbudowane z płynu i powłoki z ciała stałego. W ramach powłok zbudowanych z ciała stałego przedyskutowano powłoki izotropowe, ortotropowe i hemitropowe, odpowiadające własnościom niezmienniczym funkcji energii sprężystej. Dla materiału liniowo sprężystego ustalono zredukowane postacie funkcji energii sprężystej dla powłoki izotropowej,

general theory of branching off and intercepting shells. These conditions were derived by direct integration with respect to the shell thickness of resultant conditions of balance for a continuous medium. In each regular internal and boundary point of basic shell surface the derived precise, local equations of balance are equivalent, as expected, to the data available from literature. New, precise and total conditions of continuity of forces and moments have been obtained along singular basic surfaces modeling branching off and self interception as well as in singular points of the shell edge. All obtained results do not depend on the shell thickness, nor its internal structure with respect to thickness and material properties, however are appropriate for arbitrary deformation of shell's material elements.

Established has been a group of symmetry for the case of general, dynamical and kinematically precise theory of elastic shells. The group consists of a triple of tensors which leave an invariant function of density of elastic energy during the change of the reference of shell's configuration. In relation to shells manufactured from solids discussed have been isotropic, ortotropic and hemitropic cases corresponding with the properties to invariant functions of elastic energy. In the case of material which is linearly elastic determined have been reduced forms of elastic energy functions for isotropic, ortotropic and other symmetries shells. Such reduced forms of elastic energy

ortotropowej i o innych symetriach. Te zredukowane postacie energii sprężystej mają małą liczbę stałych wyznaczanych z badań doświadczalnych. Wyniki te mają podstawowe znaczenie dla ogólnej mechaniki powłok sprężystych.

Nieliniowa teoria powłok sprężystych ze zmianą fazową materiału została rozszerzona poprzez dodatkowe uwzględnienie energii krzywej fazowej oraz sił i momentów działających na samą krzywą. Wszystkie lokalne zależności dla takich powłok zostały wyprowadzone z zasady wariacyjnej stacjonarności całkowitej energii potencjalnej. W szczególności, wyprowadzono rozszerzone naturalne warunki ciągłości na koherentnych i niekoherentnych krzywych, modelujących zmianę fazową. Te warunki ciągłości pozwalają określić pozycję tej krzywej po zmianie fazowej materiału powłoki. Wyniki zilustrowano przykładem przejścia fazowego w nieskończonej płycie z otworem kołowym.

Wykonano obliczenia numeryczne zadania utraty stateczności osiowo ściskanego cienkiego cylindra. Przedstawiono wyniki analizy numerycznej dla szesnastu wariantów warunków brzegowych. Z otrzymanych rezultatów wynika, że krytyczny parametr obciążenia zależy zarówno od rozpatrywanych warunków brzegowych jak i od długości cylindra.

Przedstawiono zaawansowane modele tarcia, które opisują ewolucję anizotropii i niejednorodności tarcia wywołaną kinematyką poślizgu. Sformułowano równania konstytutywne siły

have a small number of constants determined from experimental investigations. These results have a fundamental importance in the case of general mechanics of elastic shells.

A non-linear theory of elastic shells featuring the phase change of material has been extended by additional consideration of the energy of phase curvature as well as forces and moments acting on the curve itself. All local relations for such shells have been derived from a variational principle of invariability of total potential energy. In particular, derived have been extended natural conditions of continuity on coherent and non-coherent curves which model the phase change. Such conditions of continuity enable determination of such curve after the phase change of the shell's material. The results have been illustrated by an example of phase transition in infinite plate with a circular hole.

Carried out were numerical calculation of the stability loss problem of axially compressed thin cylinder. Presented have been results of numerical analysis for the case of sixteen variants of boundary conditions. It stems from the obtained results that the critical parameter of load depends both on considered boundary conditions as well as the cylinder length.

Presented have been advanced models of friction, which describe evolution of anisotropy and non-homogeneity of friction induced by the kinematics of slip. Formulated have been constitutive equations of friction force of the first,

tarcia rzędu pierwszego, drugiego i wyższych ze względu na potęgi krzywizny toru poślizgu. W równaniach konstytutywnych, tensory tarcia rzędu parzystego opisują anizotropię i niejednorodność tarcia oraz efekty związane z kinematyką poślizgu. Przeprowadzono identyfikację stałych materiałowych równania rzędu pierwszego, korzystając z badań ewolucji tarcia i zużycia polimerów. Własności równania rzędu drugiego zilustrowano na przykładach niejednorodności w postaci spirali.

Wyprowadzono równania konstytutywne anizotropowego zużycia, rozszerzające prawa zużycia Archarda, które opisują ścieranie materiałów z mikrostrukturą. W przykładzie ilustracyjnym obliczono ubytek masy i temperaturę trzpienia w stanowisku doświadczalnym typu *pin-on-disc*. Obliczenia wykonano dla stali, aluminium i cyny. Warstwę cząstek zużycia opisano za pomocą mechaniki ośrodka ciągłego o własnej morfologii, kinematyce i równaniach konstytutywnych. Cząstki zużycia mogą przenosić obciążenia i przemieszczenia między stykającymi się ciałami. Obecność cząstek zużycia ma istotny wpływ na przebieg zjawisk tarcia i zużycia.

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

Modelowanie heurystyczne wirników. Badania dotyczyły wybranych zagadnień związanych z niepewnością danych

second and higher order with respect to the trajectory of slip curvature.

In constitutive equations the tensors of friction of even order describe anisotropy and non-homogeneity of friction as well as the effects related to kinematics of slip. Carried out was identification of material constants of the first order using the research on evolution of friction and polymer wear. The properties of the equation of the second order have been illustrated on the examples of non-homogeneities in the form of a spiral.

Derived have been constitutive equations of anisotropic wear which extends the wear law due to Archard, which itself describes material attrition with microstructure. In the sample equation calculated has been the mass defect and temperature of the pin on the experimental rig of the pin-on-disc type. Calculations have been carried out for the case of steel, aluminium and zinc. The layer of the wear particles has been described using the concepts from continuum mechanics with own morphology, kinematics and constitutive equations. The wear particles can sustain loads and translations between contacting bodies. The presence of wear particles has an important influence on the course on friction and wear phenomena.

O4/Z3/T1: Theoretical and experimental investigations of dynamical interactions in rotor – bearings systems

Heuristic modelling of rotors. Investigations were related to selected pro-

wejściowych do obliczeń dynamicznych wirnika. Jako model wybrano najprostszyszy wirnik dwupodporowy, bezstopniowy, z jednym dyskiem umieszczonym w osi symetrii.

Prace badawcze obejmowały ocenę wpływu zmienności siły poprzecznej obciążającej wirnik podczas jego obrotów, na drgania poprzeczne wału oraz zjawiska zachodzące w trakcie jego pracy. Założono zmienność wartości siły poprzecznej w każdym kroku iteracyjnym (co 2.5 stopnia obrotu wału). Dokonując różnymi metodami losowania wartości siły obciążającej wirnik obserwowano odpowiedzi modelu. Na podstawie analizy otrzymanych wyników wybrano jedną metodę losowania, którą posługiwano się w dalszych doświadczeniach.

Zakładając zależność nominalnej wartości siły poprzecznej od prędkości obrotowej wału wirnika odpowiadającą resztkowej niewywadze, sporządzono charakterystyki amplitud w dziedzinie prędkości obrotowej dla układów z różnym stosunkiem prędkości wirowania siły poprzecznej i prędkości obrotowej wirnika ($x = -2; -1; -0.5; 0.5; 1; 2$). Następnie, obierając odpowiednie przedziały prędkości obrotowych, dokonano szczegółowej analizy przebiegu zjawisk rezonansowych oraz zjawisk związanych z utratą stabilności, w tym wirów olejowych oraz bicia olejowego, w ujęciu ich wpływu na trajektorię osi wału w płaszczyźnie poprzecznej do jego osi. We wszystkich obliczeniach uwzględniano zmienność losową działającej siły poprzecznej na

blems linked to uncertainty of input data in the case of calculations regarding the dynamics of rotors. As a model the simplest two-support rotor has been selected, which is stage-less and features one disc placed in the symmetry axis.

Research works encompassed evaluation of the influence of variation of transverse force loading the rotor during revolutions on the shaft transverse vibrations and phenomena occurring during its operation. Variation of a value of transverse force has been assumed at each iteration step (every 2.5 degree on the shaft revolution). Performed by different methods stochastic selection of a value of force loading the rotor the different responses of the model have been observed. On the basis of analysis of obtained results one method of stochastic selection has been selected, which was further used in subsequent experiments.

Assuming a relation between the nominal value of transverse force and rotor shaft revolutions corresponding to a residual imbalance characteristics of amplitudes have been constructed in the domain of rotational velocity for systems with different velocity ratio of transverse force rotation and rotor rotational velocity ($x = -2; -1; -0.5; 0.5; 1; 2$). Next, assuming adequate ranges of rotational velocities, a detailed analysis has been conducted on the course of resonance phenomena as well as phenomena related to the loss of stability including oil whirls and oil runout with respect to their influence on the trajectory of the shaft axis in the plane trans-

wał, według wcześniej wybranej metody losowania.

Otrzymane wyniki dotychczasowych badań pozwoliły na sformułowanie kilku ważnych dla zagadnienia wniosków:

- Analiza konkretnych przypadków wykazała, że wprowadzenie wahań losowych siły poprzecznej do modelu wirnika z jednym dyskiem nie wprowadza większych zmian w trajektorii osi wału wirnika w porównaniu z przypadkiem bazowym (siła poprzeczna o stałej wartości). Widoczny jest jednak wyraźny rozrzut toru osi wirnika w płaszczyźnie poprzecznej osi wału.
- Analiza *fft* nie może być uważana za uniwersalne narzędzie badań wirującego wirnika, na który oddziałuje siła poprzeczna, gdyż nie wykazuje reakcji na wahania tejże siły, a więc nie buduje informacji na temat charakteru siły.
- Prędkość obrotowa wału, przy której występuje zjawisko rezonansu ma związek z wartością współczynnika x , będącego stosunkiem prędkości wirowania siły poprzecznej oraz prędkości obrotowej wirnika.
- Za pomocą przyjętego modelu można zobrazować nie tylko istnienie zjawisk wirów olejowych oraz bicia olejowego, ale również odzwierciedlić ich ewolucję wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika.

verse to its axis. In all calculations considered was stochastic variation of the transverse force acting on a shaft, in line with selected earlier method of selection.

Obtained results of up to date investigations enabled formulation of some important conclusions, which are relevant to that case:

- *Analysis of specific cases showed that introduction of stochastic variations of transverse to the rotor force, featuring one disc, does not introduce greater changes in trajectory of the rotor axis in comparison to the base case (the transverse force with a constant value). However, a clear discrepancy of the rotor axis trajectory is perceptible in the transverse plane of the shaft axis.*
- *Analysis *fft* cannot be regarded as a universal tool in examination of rotating rotor, where the transverse force is acting, as it does not show any reaction to variation of that force and hence does not build information about the force character.*
- *Shaft rotational velocity, at which the resonance phenomenon takes place, has a link to a value of coefficient x , which is a ratio of rotational velocity of transverse force to a rotational velocity of rotor.*
- *By means of assumed model not only the existence of oil whirls phenomenon and oil runout can be depicted but also their evolution*

- Stwierdzono decydujący wpływ modułu prędkości wirowania siły poprzecznej obciążającej wirnik odniesionej do prędkości obrotowej samego wirnika na przebieg zjawisk występujących podczas utraty stabilności przez układ wirnik-łożyska. Oprócz samego modułu wyróżnika x prędkości siły poprzecznej, wykazano znaczenie znaku tegoż wyróżnika nie tylko dla zjawisk związanych z precesją, ale również z drganiami połówkowymi oraz biciem olejowym.
 - Odmiennie niż w przypadku prędkości rezonansowych nie stwierdzono ścisłego związku między wyróżnikiem x , a prędkością obrotową, przy której dochodzi do utraty stabilności.
 - Losowa zmienność siły poprzecznej obciążającej wirnik nie ma wpływu na wartość prędkości obrotowej wirnika, przy której następuje zjawisko rezonansowe.
 - Siłą poprzeczną okresowo losowo zmienną można zamodelować zjawisko obtarć czopa wału o panwie łożysk w jego podporach.
- with the increase of rotor rotational velocity can be reflected.*
- *Concluded has been a decisive influence of rotational velocity modulus of transverse force, loading the rotor and referenced to rotational velocity of the rotor itself, on the course of phenomena occurring during the loss of stability by the rotor-bearing system. Despite the modulus itself of determinant x of transverse force velocity, proved has been the importance of the sign of that determinant, not only in the case of phenomena related to precession, but also to the half vibrations and the oil runout.*
 - *Contrary to the case of resonance velocities there has not been concluded a close relation between the determinant x , and the rotational velocity, at which the loss of stability occurs.*
 - *A stochastic variation of transverse force loading the rotor has no influence on the value of rotor rotational velocity at which resonance phenomenon occurs.*
 - *A transverse force, which is periodically stochastic, can model the phenomenon of the pin rubbing by the bearing bushes in its supports.*

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

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu wału na drgania wymuszone ułopatkowanych tarcz wirnikowych osadzonych na wale. Na podstawie pomiarów częstotliwości

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

The objective of carried out investigations was determination of the influence of the shaft on excited vibrations of

drgań własnych rzeczywistego wirnika turbiny parowej składającego się z ośmiu ułatkowanych tarcz osadzonych na wale stwierdzono sprzężenie częstotliwości drgań własnych poprzez wał. Pomiar przeprowadzono tylko dla ostatnich dwóch stopni. W celu przeanalizowania sprzężeń uproszczono geometrię łopatek oraz zmieniono ich liczbę. Wymuszono kolejno drgania na ułatkowanych tarczach wirnikowych z zerową, pierwszą i drugą średnicą węzłową. Badano drgania wymuszone na innych ułatkowanych tarczach. Stwierdzono, że drgania wymuszone pozwalają na określenie dodatkowych sprzężeń drgań ułatkowanych tarcz poprzez wał, które nie było widoczne przy analizie drgań swobodnych. Najważniejszym wnioskiem płynącym z analizy jest konieczność uwzględnienia sprzężenia poprzez wał przy projektowaniu łopatek i ułatkowanych 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 wymuszone ułatkowanych tarcz wirnikowych osadzonych na wale. Stwierdzono uszkodzenie łopatek ostatniego stopnia turbiny silnika lotniczego. Zaistniała konieczność przeanalizowania przyczyn awarii. Przeanalizowano drgania wymuszone pojedynczej ułatkowanej tarczy wymuszone trzema średnicami

rotor's bladed disc fixed on the shaft. On the basis of measurements of free vibrations frequencies of a real rotor of steam turbine consisting of eight bladed discs fixed on a shaft there has been concluded the coupling between frequencies of free vibrations through the shaft. Measurements were carried out only for the last two stages. In order to analyse the coupling the geometry of blades has been simplified as well as their number has been changed. Subsequent vibrations were excited in the bladed rotor discs with a zeroeth, first and second nodal diameter. Investigated were excited vibrations on other bladed discs. It has been concluded that excited vibrations enable for determination of additional couplings between bladed discs vibrations through the shaft, which was not perceptible during the analysis of free vibrations. The most important conclusion stemming from the analysis is the necessity of accounting for coupling through the shaft in the design of blades and bladed rotor discs, if in the fluid-flow system there are low frequency excitations stemming from flow asymmetry (the control stage, bleed, last turbine stage).

Another problem was determination of the influence of a loss of part of the shroud on excited vibrations of bladed rotor disc fixed on a shaft. There has been concluded a damage of blades in the last turbine stage of an aircraft engine. There appeared a necessity of analysis of the reasons of the breakdown. Analysed were excited vibrations

węzłowymi (3EO) i 32 średnicami węzłowymi (32EO) wynikającymi z liczby łopatek kierowniczych.

Zamodelowano ułopatkowaną tarczę, dla przypadku powstania nieciągłości bandaża integralnego w jednym i dwóch miejscach. Przy analizie drgań wymuszonych z wymuszeniami 3EO i 32 EO bandaża z jedną nieciągłością pojawiają się dodatkowe lokalne ekstrema naprężeń, które nie występują dla bandaża integralnego. W przypadku bandaża z dwoma nieciągłościami pojawiają się ekstrema związane z drganiami pojedynczej łopatki wolnonośnej.

Na podstawie algorytmu 3D flutteru w przepływie lepkiem napisano program komputerowy dla przepływu trójwymiarowego lepkiego dla siatek strukturalnych. Wyniki numeryczne porównano z wynikami badań eksperymentalnych dla 11 konfiguracji i kąta przesunięcia fazowego pomiędzy łopatkami 90, -90, 72 i -72 stopni otrzymując wystarczającą zbieżność z eksperymentem.

of a single bladed disc excited by three nodal diameters (3EO) and 32 nodal diameters (32EO) resulting from a number of guide blades. Modelled has been a bladed disc in the case of appearance of discontinuity of integral shroud in one or two locations. In the analysis of excited vibrations with excitations 3EO and 32 EO of a shroud with one discontinuity there appear additional local stress extremes which do not exist in the case of integral shroud. In the case of a shroud with two discontinuities there appear extremes related to vibrations of a single slow motion blade.

On the basis of 3D algorithm of flutter in viscous flow there has been elaborated a computer code for the three dimensional viscous flow for the case of turbulent meshes. Numerical results have been compared with the results of experimental investigations for 11 configurations as well as an angle of phase displacement between blades 90, -90, 72 and -72 degrees. Obtained has been a sufficient consistency with experimental data.

