

BADANIE WPLYWU STANU NAPRĘŻEŃ NA PROCES PROPAGACJI FALI NAPRĘŻENIOWEJ W STRUKTURACH SPRĘŻONYCH

Stanisław RADKOWSKI, Krzysztof SZCZUROWSKI

Instytut Podstaw Budowy Maszyn PW
Ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, ras@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono badanie zjawiska rozchodzenia się fali akustycznej w materiałach sprężonych, a szczególnie wpływ stanu naprężenia w przekroju poprzecznym elementu obciążonego. W dalszej części pracy przedstawiono próbę budowy płaszczyzny klasyfikacji która umożliwiłaby jednoznaczne zakwalifikowanie poszczególnych pomiarów do odpowiednich grup opisujących stan naprężeń. W kolejnym kroku przedstawiono budowę modeli MES opisujących rozchodzenie się fali naprężeniowej w materiałach o różnym stanie naprężeń w przekroju poprzecznym.

Słowa kluczowe: Diagnostyka wibroakustyczna, diagnostyka materiałów sprężonych.

STRESS DISTRIBUTION IMPACT ON THE WAVE PROPAGATION IN PRESTRESSED STRUCTURES.

Summary

The paper presents the results of wave propagation investigation in prestressed structure and particularly an impact of stress distribution in cross-section on wave propagation process. The second part of the paper presents the attempt design classification plane and results of classification process of the different stress distribution groups. In the final part are presented two FEM models of the wave propagation process in solids with the different cross-section stress distribution.

Keywords: vibroacoustic diagnostic, diagnostic prestressed structure.

1. WPROWADZENIE

Przyjmując założenie, że wczesnym fazom makroszkodzeń struktury sprężonej będzie towarzyszyć zmiana rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym, celem studium jest opracowanie bezinwazyjnej metody wykrywania zmian rozkładu na podstawie informacji zawartej w sygnale wibroakustycznym, generowanym podczas badań testowych.

Odnosząc się do obecnego stanu wiedzy warto zaznaczyć, że w badaniach struktur sprężonych główną uwagę jest i była skupiona na wykrywaniu występowania, wad i uszkodzeń materiałów. Podobnie podejmowane są próby wykorzystania odpowiedzi dynamicznej struktury, których głównym problemem jest wykrywanie, lokalizacja i określania stopnia rozwoju uszkodzeń. Definiując strukturalne uszkodzenie jako swego rodzaju dewiacje geometrycznych, materiałowych właściwości, można oczekiwać zmian w dynamicznej odpowiedzi układu na ustalone obciążenie.

W ciągu ostatnich lat wiele zadań badawczych było bezpośrednio lub pośrednio związanych z problematyką detekcji uszkodzeń na podstawie

analizy dynamicznej odpowiedzi struktury. Między innymi można wskazać na zastosowanie technik identyfikacji [1, 2], metod analizy transmitancji systemu, FRF (Frequency Response Function) [3], intensywnie rozwijanej techniki estymacji losowego dekrementu tłumienia [4] oraz technik diagnostycznych wykorzystujących informację o zmianach parametrów modalnych [5]. Istotą tych wszystkich metod jest wykorzystanie względnej zmiany częstotliwości drgań własnych struktury w związku z powstawaniem pęknięć, korbów lub innych uszkodzeń mających wpływ na dynamiczne właściwości struktury [6, 7].

Pomimo wielu przeprowadzonych badań między innymi analizy wielkości charakteryzujących zmiany kształtu funkcji własnej struktury [8] i uzyskania wielu interesujących rezultatów (vibration – based damage detection), do tej pory nie udało się uzyskać w pełni satysfakcjonujących rezultatów szczególnie w sytuacji, gdy nie dysponujemy wzorcowym sygnałem wibroakustycznym dla układu nieuszkodzonego. Trudności narastają wraz z niepewnością odnośnie modelowania, pomiaru i analizy otrzymanego sygnału i wraz z podejmowaniem prób identyfikacji wczesnych

fazach rozwoju uszkodzeń. W proponowanym, w ramach projektu sposobie diagnozowania, w odróżnieniu od dotychczasowych ujęć przewiduje się analizowanie związków pomiędzy rozkładem naprężeń w przekroju poprzecznym, a zmianami parametrów sygnału wibroakustycznego.

2. ZAŁOŻENIA MODELU

Podstawą tego sposobu diagnozowania jest wykorzystanie zjawiska zależności parametrów propagacji fali dźwiękowej od stanu naprężeń panujących w badanym obiekcie. Objawia się to zmodulowaniem parametrów sygnału wibroakustycznego, wynikającym ze zmienności prędkości propagacji fali dźwiękowej w materiale będącej funkcją rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym konstrukcji sprężonej. Wychodząc z założenia, że występujące uszkodzenia mogą prowadzić do spadku naprężeń ściskających można oczekiwać na tyle mierzalnej zmiany rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym, że możliwym będzie wykrycie zmodulowania odpowiednich parametrów sygnału wibroakustycznego.

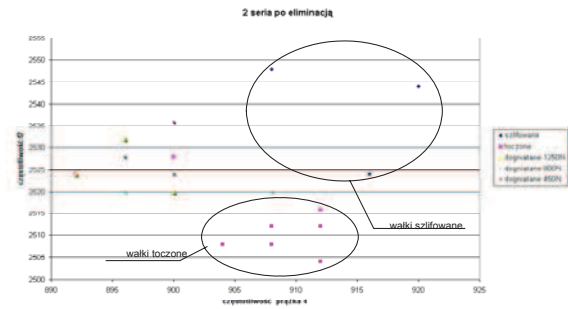
Z dotychczas prowadzonych w Pracowni Wibroakustyki PW szczególnie, badań nad zmianami naprężeń w warstwie wierzchniej wynika, że zmiany struktury naprężeń można wykrywać i identyfikować metodami demodulacji sygnału wibroakustycznego.

Wystąpieniu w warstwie wierzchniej naprężeń rozciągających towarzyszy jakościowa zmiana rozkładu amplitud w paśmie zmodulowanym wokół odpowiedniej częstotliwości nośnej. Wykorzystując otrzymane rezultaty, w proponowanym projekcie istotnym zadaniem będzie określenie sposobu i kryteriów doboru zmodulowanych pasm diagnostycznie istotnych częstotliwości nośnych [9, 10].

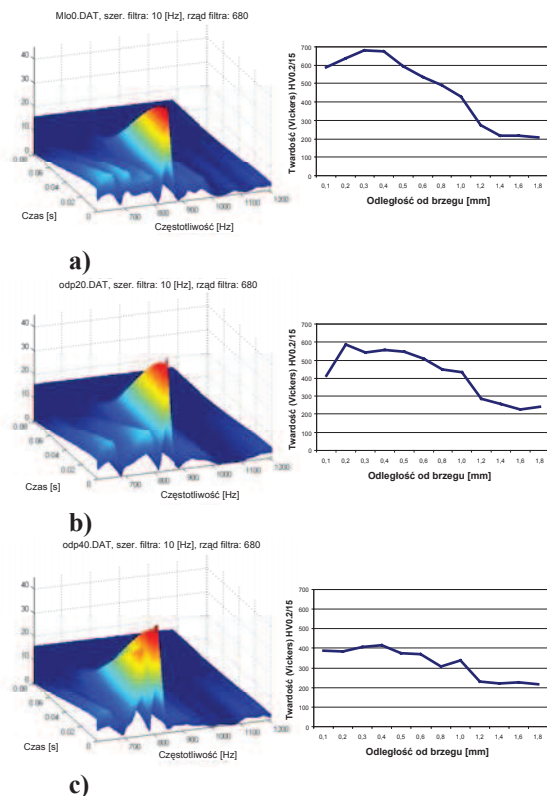
Wyniki przeprowadzonego eksperymentu pokazują, iż wybranie przestrzeni klasyfikacyjnej dla próbek o różnym stanie warstwy wierzchniej nie jest łatwe (rys. 1).

Badany sygnał wibroakustyczny zawiera bowiem nie tylko informacje o stanie warstwy wierzchniej, ale także dodatkowe zaburzenia związane z niejednorodnością materiału próbek czy zróżnicowaniem pozornie tych samych procesów obróbkowych.

Porównując wykresy przedstawione na rys. 2 możemy zauważyć różne wartości zmodulowania częstotliwości nośnej, wyrażające się deformacją listków bocznych. Efekt ten był zauważalny dla każdej próbki badanych elementów. Stanowi to potwierdzenie tezy, że zmiana struktury warstwy wierzchniej, wyrażona w tym przypadku przez różną twardość warstwy prowadzi do mierzalnych zmian parametrów sygnału wibroakustycznego.



Rys. 1. Płaszczyzna klasyfikacji serii pomiarów wałów w zależności od sposobu obróbki technologicznej [9]



Rys. 2. Wyniki analizy dla wałka hartowanego na głębokość 0,5mm a następnie odpuszczanego w różnej temperaturze [10]:

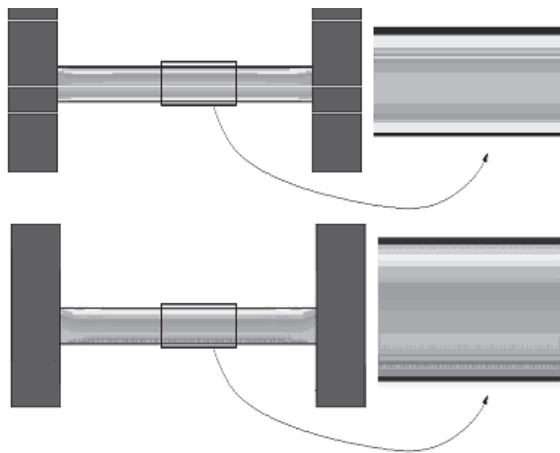
- zmodulowane pasmo częstotliwości dla wałka hartowanego na gł. 0,5 mm oraz rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej;
- zmodulowane pasmo częstotliwości dla wałka hartowanego na gł. 0,5 mm a następnie odpuszczanego w temp. 200°C oraz rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej;
- zmodulowane pasmo częstotliwości dla wałka hartowanego na gł. 0,5 mm a następnie odpuszczanego w temp. 400°C oraz rozkład mikrotwardości w warstwie wierzchniej.

Proponowana metoda jest dalszym rozszerzeniem metody diagnozowania zastosowanej do badań struktury naprężeń panujących w warstwie wierzchniej elementu. Tym razem głównym zadaniem jest wykrycie zmian

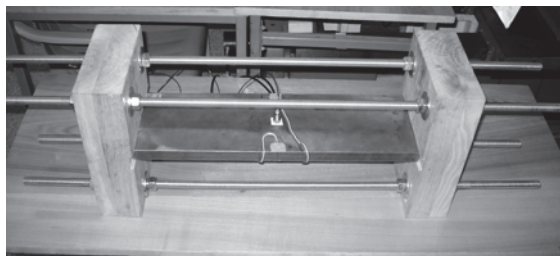
w rozkładzie naprężeń w całym przekroju poprzecznym. Szczególnie interesującym jest wykrycie jakościowej zmiany w warstwach zewnętrznych przekroju z naprężeń ściskających na naprężenia rozciągające.

3. SYMULACJE

W ramach prac przygotowawczych na wstępie za pomocą metody elementów skończonych w programie ANSYS zbudowano model (rys. 3), i na jego podstawie dobrano wymiary elementów jak również zbadano zakres występujących sił. Korzystając z wyników uzyskanych z modelu zbudowano stanowisko przedstawione na rys. 4. Stanowisko to, zgodnie z założeniami umożliwia wywołanie różnej struktury naprężeń w przekroju poprzecznym badanej płyty. Naprężenia mogą być zadawane przez kombinację obciążeń ściskających, zginających i skręcających płyty (rys. 4). Odczytywanie naprężenia odbywa się z czterech mostków tensometrycznych naklejonych w połowie długości belki, na górnej i dolnej powierzchni środka.



Rys. 3. Modelowanie stanu naprężeń środka za pomocą MES

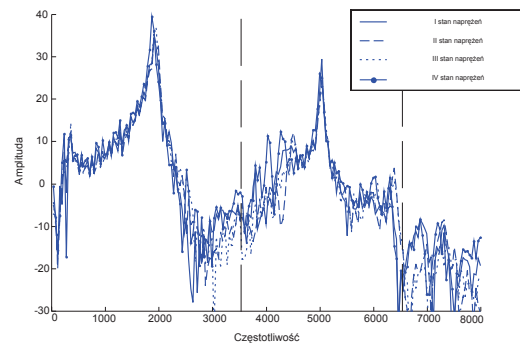


Rys. 4. Stanowisko do badań wpływu naprężeń na strukturę odpowiedzi drganiowej

Tak skonstruowane stanowisko umożliwia prowadzenie obserwacji zmian struktury częstotliwościowej sygnału wibroakustycznego wywołanych zmieniającymi się naprężeniami w przekroju poprzecznym. Zadając różne wartości momentów gnących wymuszono w płycie zmianę stanu naprężeń.

Dla każdego stanu pobudzano impulsowo płytę, i zarejestrowano odpowiedź drganiową. Wymuszenie impulsowe wywoływano za pomocą młotka z czujnikiem siły typu 8202 firmy B&K. Zarejestrowaną za pomocą odpowiedź analizowano w środowisku Matlab.

Otrzymane dla różnych struktur naprężeń widma przyspieszeń (rys. 5) porównano ze sobą. Za najlepiej charakteryzujący poszczególne struktury naprężeń uznano pasmo wokół częstotliwości 5 kHz.

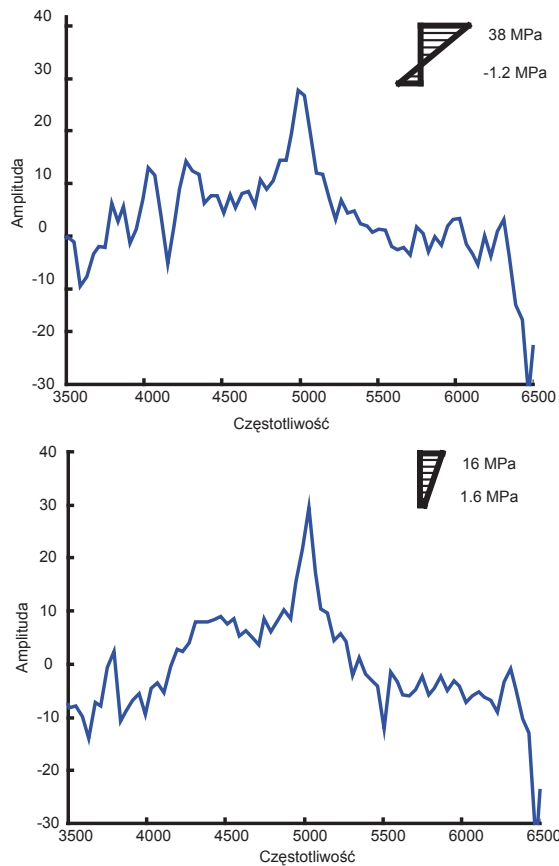


Rys. 5. Porównanie odpowiedzi drganiowej płyty dla różnych stanów naprężeń

W wybranym paśmie odpowiedzi wyraźnie różniły się, i były rozpoznawalne w zależności od rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym. Przykładowe widma z zaznaczonym pasmem wokół częstotliwości 5 kHz przedstawiony jest na rys. 6.

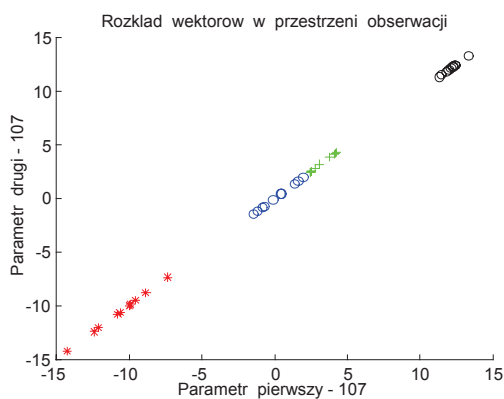
Klasyfikację różnych klas rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym dokonano za pomocą sieci neuronowych wykorzystując oryginalną metodę selekcji informacji bazującą na dwóch kryteriach: kryterium będącego pewną kombinacją miar rozproszeń wektorów cech w przestrzeni obserwacji sformułowanych przez Sebestyena oraz kryterium liczby istotnych (z punktu widzenia zadania) wektorów cech [11].

Metoda ta preferuje takie przestrzenie obserwacji, w których występują duże względne odległości między obszarami poszczególnych klas przy jednoczesnym dużym względnym skupieniu wewnętrznym każdego z tych obszarów i w których „powierzchnie styku” obszarów poszczególnych klas są mało skomplikowane. Do opisu brzegów obszaru potrzebna jest mała liczba wektorów reprezentujących cechy. Jako przykład przedstawiono dwuwymiarowe przestrzenie obserwacji. Badanie wykazało istnienie szeregu dwuwymiarowych przestrzeni obserwacji użytecznych do przeprowadzenia klasyfikacji zadanych rozkładów naprężeń, co potwierdza możliwość skutecznej klasyfikacji za pomocą dwuwymiarowych obrazów (wektor cech tworzących pojedynczy obraz zawiera 2 pozycje).

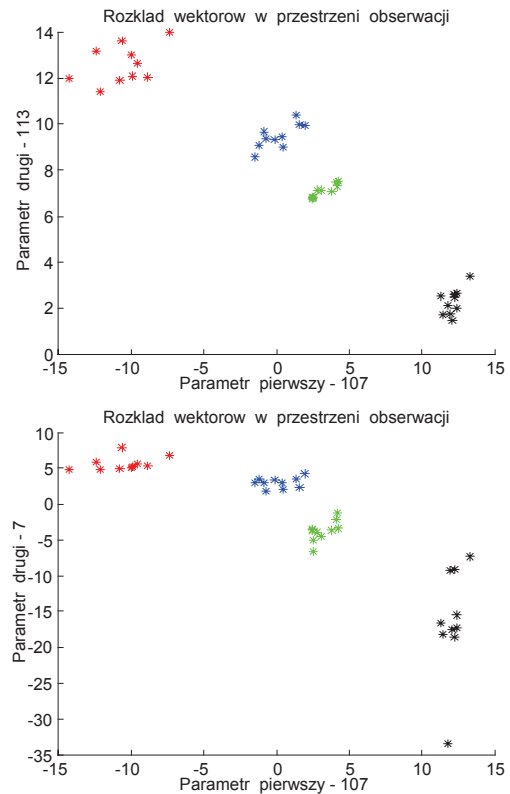


Rys.6. Porównanie widm odpowiedzi drganiowej dla dwóch przykładowych stanów naprężeń

W wyniku opisanej wyżej procedury otrzymano grupę kilku parametrów najlepiej opisujących stan elementu a w jednym przypadku praktycznie bezbłędnie. Wyniki przedstawiają rysunki 7 i 8.



Rys. 7. Płaszczyzna klasyfikacji dla parametru nr 107

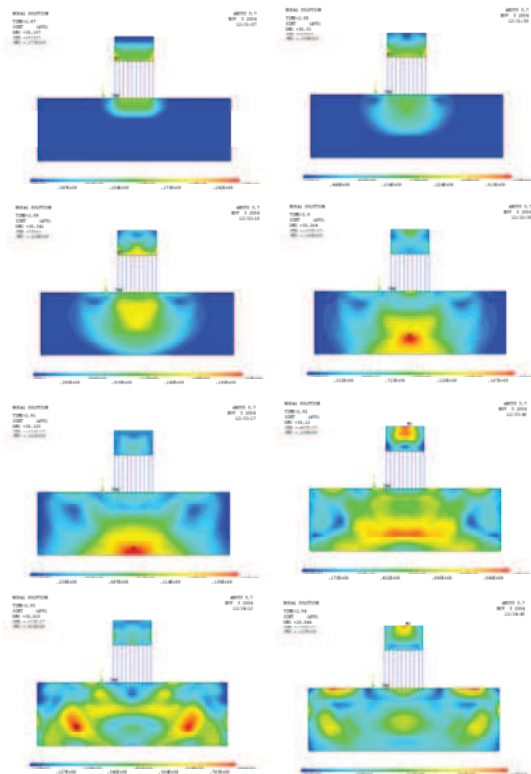


Rys. 8. Płaszczyzny klasyfikacji z wykorzystaniem dwóch parametrów

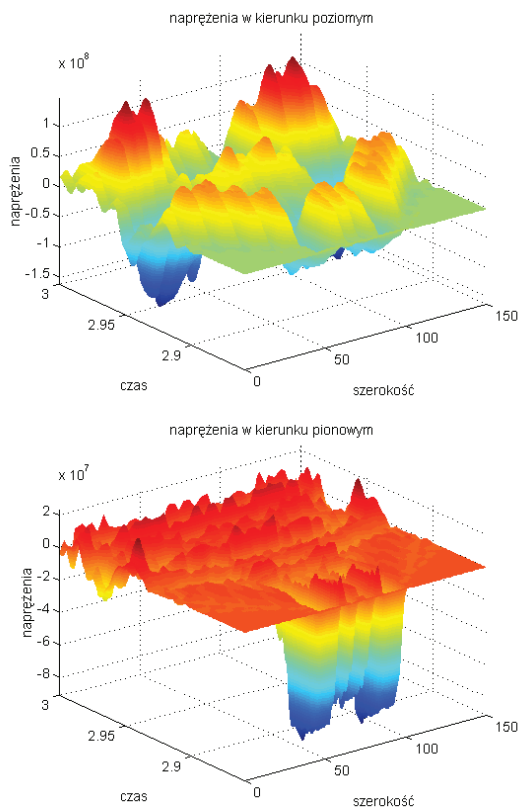
Przeprowadzone badania potwierdzają możliwość stosowania proponowanej metody we wnioskowaniu o stanie naprężeń w przekroju elementu na podstawie analizy parametrów sygnału wibroakustycznego.

Należy podkreślić, że badania przeprowadzone zostały dla materiału jednorodnego jakim jest stal. Istotnym zadaniem badawczym jest rozszerzenie aplikacji na badanie stanu technicznego konstrukcji wykonanych z materiałów o bardziej złożonych właściwościach.

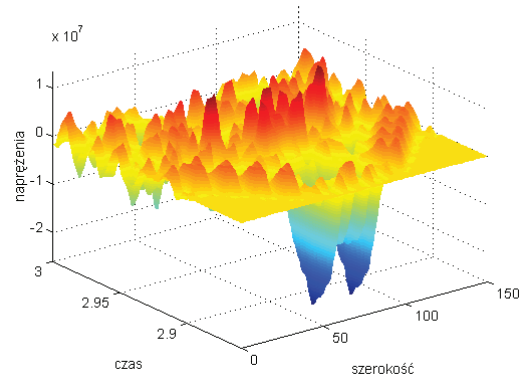
Jednym z elementów tego etapu jest budowa z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) modeli rozchodzenia się fali naprężeniowej w materiale. Chodzi tu zarówno o płaskie modele (rys. 9) i obserwowane zmiany w sposobie propagacji fali naprężeniowej w zależności od przyłożonych obciążeń, jak również zmiany wielkości naprężeń na powierzchni, co przedstawia rys. 10.



Rys. 9. Kroki przedstawiające rozchodzenie się fali naprężeniowej w model płaskim



Rys. 10. Naprężenia na powierzchni płyty w modelu płaskim kierunkach poziomym i pionowym



Rys. 11. Przebieg naprężeń na powierzchni według płaskiego modelu

4. WNIOSKI

Proponowana metoda oceny zmian rozkładu naprężeń umożliwia: po pierwsze zlokalizowanie uszkodzenia i estymacja jego rozległości, stanowi podstawę do przeprowadzenia bardziej szczegółowej oceny znaczenia uszkodzenia. Po drugie dokonanie oceny uszkodzenia we właściwym czasie, pozwala zmniejszyć ciężkość strat a szczególnie uniknąć ofiar śmiertelnych, zmniejszyć cierpienia ludzi, którzy mogą być dotknięci hipotetyczną katastrofą, zminimalizować straty materialne, zwiększyć niezawodność systemu, zwiększyć efektywność wykonywania zadań funkcjonalnych oraz zredukować koszty obsługi i napraw. Kolejnymi cechami są: zastosowanie separacji częstotliwościowej, co umożliwia uzyskanie efektywnej odporności metody na nieciągłości badanej struktury, oraz wykonywanie badań również w czasie normalnej eksploatacji, co czyni metodę podatną na zastosowanie on-line, i stwarza możliwość opracowania inteligentnych systemów nadzoru.

Pilna potrzeba podjęcia proponowanych w ramach projektu zagadnień, wynika z konieczności zwiększenia efektywności eksploatacji coraz bardziej skomplikowanych konstrukcji sprężonych poprzez poszukiwanie sposobów zapewnienia ich bezpieczniejszej eksploatacji i zwiększenia ich niezawodności i trwałości.

LITERATURA

- [1]. Masri S. F., Miller R. K., Saud A. F., Caughey T. K.: (1987) Identification of nonlinear vibrating structures: Part I – formulation. *Journal of Applied Mechanics*, 54, 923-929.
- [2]. Natke H. G., Yao J. T. P.: (1990) System identification methods for fault detection and diagnosis. *International Conference on*

- Structural Safety and Reliability, American Society of Civil Engineers, New York, 1387-1393.
- [3]. Flesch R. G., Kernichler K.: (1988) Bridge inspection by dynamic tests and calculations dynamic investigations of Lavent bridge. Workshop on Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches (H. G. Natke and J. T. P. Yao, editors), 433-459, Lambrecht/ Pfalz, Germany, Vieweg & Sons.
- [4]. Yang J. C. S., Chen J., Dagalakis N. G.: (1984) Damage detection in offshore structures by the random decrement technique. Journal of Energy Resources Technology. American Society of Mechanical Engineers, 106, 38-42.
- [5]. Kurowski P.: (2001) Identyfikacja modeli modalnych konstrukcji mechanicznych na podstawie pomiarów eksploatacyjnych. Praca Doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza. Kraków.
- [6]. Gudmunson P.: (1983) The dynamic behavior of slender structures with cross-sectional cracks. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 31, 329-345.
- [7]. Cristides S., Barrs A. D. S.: (1984) One-dimensional theory of cracked Bernoulli-Euler beams. International Journal of Mechanical Science, 26, 639-648.
- [8]. Chen J., Garba J. A.: (1988) On-orbit damage assessment for large space structures. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 26, 1119-1126.
- [9]. Radkowski S., Szczurowski K., Zduniak A.: „Zależność struktury częstotliwościowej SWA od rodzaju obróbki technologicznej elementu.” VIII Polsko-Francuskie Seminarium Naukowe Mechaniki, Warszawa Grudzień 2001,
- [10]. Radkowski S.: „Wibroakustyczna Diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych.” Instytut Technologii Eksploatacji Warszawa-Radom 2002,
- [11]. Dybała J.: „Wykrywanie uszkodzeń w przekładni zębatej na podstawie analizy sygnału wibroakustycznego z wykorzystaniem modeli symulacyjnych”. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1999



Prof. **Stanisław Radkowski**
profesor Instytutu Podstaw Budowy Maszyn PW kierownik zespołu Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka. Prezes Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.



Mgr inż. **Krzysztof Szczurowski**
doktorant wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.