

WYKORZYSTANIE DEMODULACJI SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO W DIAGNOZOWANIU STANU STRUKTUR 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 wyniki analiz sygnałów wibroakustycznych dla struktur sprężonych obciążanych aż do zniszczenia. Pokazano zmiany prędkości rozchodzenia się fali naprężeniowej w strukturze sprężonej pod wpływem zmian naprężeń. W dalszej części pracy przedstawiono zjawisko modulacji niesymetrycznej występujące w badanych obiektach. Na końcu przedstawiono kierunki dalszych prac pozwalające na określenie stanu technicznego struktur sprężonych.

Słowa kluczowe: wymuszenie impulsowe, sygnał wibroakustyczny, demodulacja, struktury sprężone.

USING DEMODULATION OF VIBROACOUSTIC SIGNAL IN DIAGNOSTICS OF PRESTRESSED STRUCTURES

Summary

The article presents results of analysis of vibroacoustic signals for prestressed structures loaded until destruction. Changes in propagation velocity of stress waves in prestressed structure as an effect of changes of stress are showed. Second part of paper presents phenomenon of non-symmetric modulation existing in examined objects. At the end of paper future research directions allowing to determinate technical state of prestressed structure are presented.

Keywords: shock excitation, vibroacoustic signal, demodulation, prestressed structures.

1. WPROWADZENIE

W badaniach konstrukcji sprężonych został osiągnięty znaczny postęp. Techniki badań ultradźwiękowych czy metody odwołujące się do pomiarów twardości (metody sklerometryczne) pozwalają zlokalizować i zidentyfikować uszkodzenie. W zależności od stosowanej techniki występują określone ograniczenia i obszary najefektywniejszych zastosowań. Na przykład metody ultradźwiękowe, które możemy podzielić na dwa rodzaje: w pierwszym wykorzystywany jest pomiar prędkości fali ultradźwiękowej w elemencie konstrukcji żelbetowej (metoda skośna, Acoustic Spectroscopy), w drugim przypadku opieramy się na zarejestrowanych zmianach w fali odbitej. Obydwe metody pozwalają dotrzeć do informacji o napotkanych na drodze propagacji zmianach struktury materiału, przy czym do przeprowadzenia pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej wymagany jest dostęp do dwóch powierzchni i dokładnej znajomości odległości pomiędzy głowicami pomiarowymi jak również umiejscowienia elementów zbrojenia.

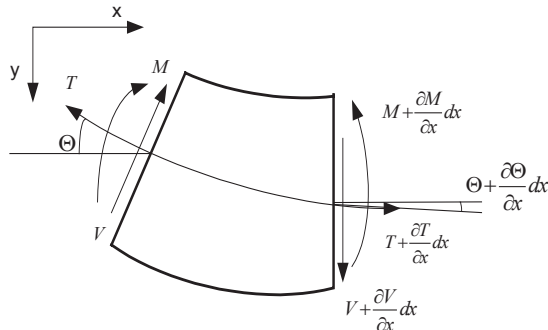
Zauważmy, że omówione metody pozwalają na detekcję, identyfikację i lokalizację uszkodzeń

i wad, natomiast w niewielkim stopniu umożliwiają określenia ich oddziaływań na zachowanie się konstrukcji (makroreakcji).

Wychodząc z założenia, że w elementach sprężonych powstawanie uszkodzenia może spowodować zmianę rozkładu naprężeń w całym przekroju poprzecznym, związane z tym przesunięcie warstwy obojętnej, a nawet jakościową zmianę naprężeń ściskających na naprężenia rozciągające, podjęto próbę opracowania metody oceny wczesnych faz uszkodzeń, odwołującą się do analizy procesu generowania sygnału wibroakustycznego. Zakładając, że zmiany naprężeń będą prowadzić do zaburzeń przebiegu fali dźwiękowej w impulsowo pobudzonej strukturze sprężonej, w algorytmie diagnozowania przeprowadza się analizę struktury częstotliwościowej sygnału wibroakustycznego w tym badanie obwiedni i modulacji częstotliwości w ustalonych pasmach częstotliwości, charakterystycznych dla badanego obiektu.

Zagadnienie wpływu sprężenia na strukturę częstotliwościową sygnału drganiowego konstrukcji sprężystych jest stale analizowane w literaturze poświęconej dynamice układów

ciągłych z wykorzystaniem różnych modeli. Na przykład Graff [1] analizując drgania belki poddanej dodatkowo rozciąganiu, przyjmuje za wyjściowy model Bernoulliego–Eulera, do którego dodatkowo przykładają siły rozciągające (rys. 1).



Rys. 1 Element modelu belki Bernoulliego-Eulera

Odpowiednio równanie ruchu przyjmuje postać:

$$-V + \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} dx \right) - T\Theta + \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) \left(\Theta + \frac{\partial \Theta}{\partial x} dx \right) = \rho A dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (1)$$

Pomijając wyższe rzędy przyrostu dx , przyjmując:

$$V = \frac{\partial M}{\partial x}; \quad \Theta = \frac{\partial y}{\partial x}; \quad EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -M;$$

oraz dodatkowo założenie, że siła rozciągająca jest stała:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0;$$

równanie ruchu (1) przyjmuje postać:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

Zauważmy, że w przypadku wystąpienia sił ściskających w równaniu (2) należy zmienić znak siły T na przeciwny.

Rozwiązując równanie (2) otrzymamy wyrażenie na wartość częstotliwości n -tej postaci drgań w zależności od wielkości siły sprężającej:

$$f_n = \frac{n^2 \pi}{2l^2} \left(\frac{EI}{\rho A} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{Tl^2}{n^2 \pi^2 EI} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Ze wzoru (3) wynika, że przyłożeniu sił rozciągających towarzyszy wzrost częstotliwości drgań własnych natomiast z wystąpieniem sił

ściskających belkę zauważany jest spadek częstotliwości drgań własnych.

Wynika stąd że w przypadku zmiany rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym belki wystąpi efekt propagacji fali w środowisku dyspersyjnym, co może stać się dodatkowym, istotnym czynnikiem kształtującym proces generacji prędkości grupowej fali i związanym z tym zjawiska modulacji amplitudowej.

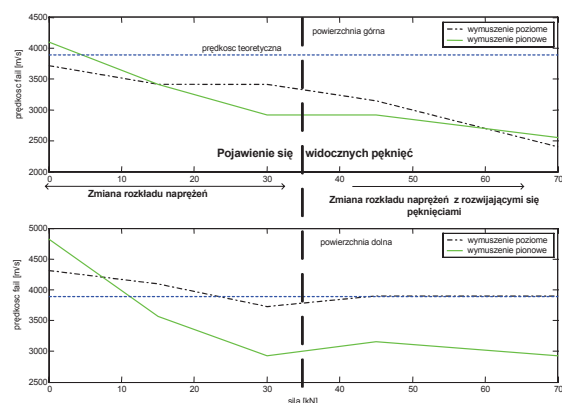
Natomiast niewyjaśnionym pozostaje wpływ powstawania uszkodzeń w strukturze sprężonej na efekt zmodulowania parametrów sygnału wibroakustycznego.

W celu potwierdzenia tych zjawisk w obiektach rzeczywistych przeprowadzono eksperymenty laboratoryjne z wykorzystaniem belek zbrojonych i sprężonych.

2. WPLYW OBCIĄŻENIA NA ROZCHODZENIE SIĘ FALI W BADANYM OBIEKCIE

W celu obserwacji zmian rozchodzenia się fali w badanej belce umocowano na belce czujniki przyspieszeń drgań w odległości 1 metra pomiędzy skrajnym czujnikami, a belkę pobudzano impulsowo w kierunkach prostopadłym i równoległym do osi belki.[2].

Zarejestrowane wyniki pomiarów drgań poddano analizie w celu określenia warunków propagacji fal wywołanych wymuszeniem impulsowym. Różnice w czasie odpowiedzi czujników związane są ze zmianą prędkości rozchodzenia się fali wraz ze zmianą obciążenia, zależność tę przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Zmiany prędkości rozchodzenia się fali w zależności od obciążenia (mierzony czas reakcji pomiędzy skrajnymi) [2]

W następnym kroku po przeanalizowaniu konstrukcji z betonu zbrojonego przystąpiono z kolei do rozszerzonego eksperymentu z podobną konstrukcją, wykonaną ze sprężeniem wstępnym, wynoszącym $17 \div 20$ MPa. Wykonanych zostało kilka konstrukcji

sprężonych a z spośród nich wytypowano dwie o najbardziej różniących się prędkościach propagacji fali. Procedura typowania polegała na pomiarze czasu odpowiedzi czujnika przyspieszeń drgań na pobudzenie impulsowe. Rejestracja wykonywana była za pomocą systemu PXI NI z częstotliwością próbkowania 100 kHz i dla zwiększenia dokładności oszacowania czasu odpowiedzi w trakcie analizy dokonywano resamplingu sygnałów, umożliwiającego „zwiększenie” częstotliwości próbkowania do 400 kHz. Wielkość współczynnika resamplingu dobrano w serii wcześniejszych pomiarów wychodząc z założenia, że zmiana czasu odpowiedzi nie powinna być większa niż $\pm 2\Delta t$. Przy dalszym zwiększaniu współczynnika wzrastał rozrzut wyników. W wyniku przedstawionej procedury wybrano belki o czasach odpowiedzi $118 \Delta t$ – belka I i $125 \Delta t$ – belka II.

W trakcie eksperymentu dokonywano również pomiarów ugięcia badanych belek. Badania były przeprowadzone dla cyklu obciążeń: 0 kN, 2kN, 5 kN 15 kN, oraz w przedziale $[30 \div 75 \text{ kN}]$ co 5 kN. Siłę przykładano w środku belki. Przy obciążeniu 55kN zaobserwowano na powierzchni powstawanie pęknięć, których liczba rozmiary powiększyły przy kolejnych obciążeniach. Dopiero obciążenie do 75 kN spowodowały złamanie belki.

Jak można zauważyć na przedstawionych przebiegach (rys. 3), przy obciążeniu około $35 \div 40 \text{ kN}$ następuje wyraźna jakościowa zmiana obserwowanych zjawisk.

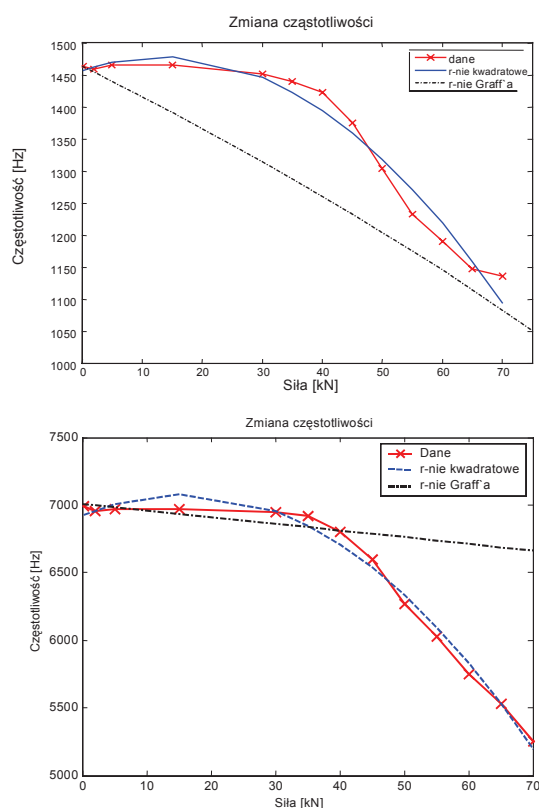
Z przeprowadzonych obliczeń analitycznych, w których uwzględniono określone wartości naprężeń wstępnych, wynika siła zginania, przy której możliwe jest wystąpienie naprężeń rozciągających w przekroju poprzecznym belki.

3. ZMIANY CZĘSTOTLIWOŚCI W ZALEŻNOŚCI OD OBCIĄŻENIA

Przede wszystkim odwołując się do teoretycznych obliczeń według modelu Graffa podjęto próby oszacowania zmian częstotliwości drgań własnych belki w funkcji panujących w belce naprężeń ściskających.

Odpowiednio na rysunku 3 przedstawiono wyniki dla dwóch belek sprężanych i belki zbrojonej. Zwraca uwagę jakościowo inny przebieg zmian częstotliwości drgań własnych w przypadku belek sprężanych i belki zbrojonej. Porównując otrzymane rezultaty badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń analitycznych z wykorzystaniem zależności (3) również zamieszczonymi na rysunku 3, można zauważyć, że o ile zmiana częstotliwości drgań własnych belki zbrojonej jest jakościowo podobna, to przedstawiony model analityczny w przypadku belki sprężonej nie może być akceptowany nawet

do jakościowej analizy porównawczej. Oznacza to, że analizując własności dynamiczne belki sprężonej znacznie więcej uwagi należy poświęcić zjawiskom nieliniowym.



Rys. 3. Porównanie zmian charakterystycznych częstotliwości drgań dla belek sprężanych i belki bez napęcia wstępnego

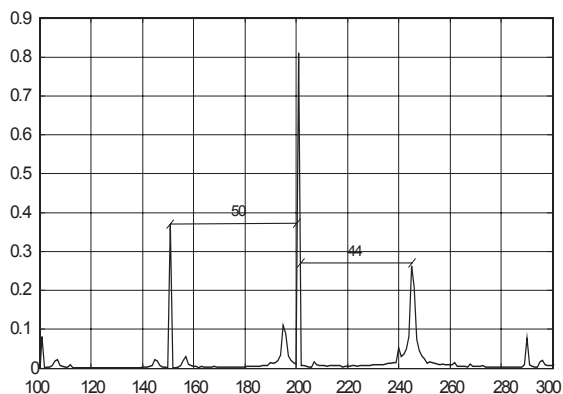
Od dawna wiadomo, że wytrzymałość zależy od stanu materiału, szczególnie występowania pęknięć, mikroporów, poślizgów i dyslokacji [3]. Dodatkowo wiadomo, że przy małej koncentracji mikrouszkodzeń, których wielkość jest mniejsza od długości fali, jest zachowana liniowość akustyczna właściwości materiału. Jeśli natomiast wspomniane założenia odnośnie wielkości i koncentracji uszkodzeń nie są spełnione, można oczekiwać efektów nieliniowych, często bliskich zachowaniu, które wymaga stosowania nieklasycznych modeli nieliniowych.

W literaturze [4,5] wymienia się różne mechanizmy powstawania tego typu nieliniowości. W odróżnieniu od nieliniowości geometrycznej, która wpływa na postać nieliniowych członów w równaniach dynamiki ciała, w tym przypadku główną rolę przypisuje się nieliniowości strukturalnej, charakterystycznej dla materiałów z defektami.

Odpowiednio mikropekanie rzędu amplitudy fali akustycznej, występujące w polu akustycznym będzie „zamykane” w fazie ściskania, co będzie zwiększać moduł

sprężystości aż do wartości odpowiadającej strukturze ciągłej bez uszkodzeń, natomiast w fazie rozciągania następuje zwiększenie pęknięcia, a tym samym zmniejszenie modułu sprężystości. Przykładem opisu takiego zachowania się materiału jest biliniowa charakterystyka sprężystości materiału.

Tego typu zmiany własności materiału sprężonego mogą wywołać dodatkowo zaburzenie w procesie propagacji fal. Zjawiskiem zaobserwowanym w zarejestrowanym sygnale była między innymi niesymetryczna modulacja wokół ustalonej częstotliwości nośnej (rys. 4).



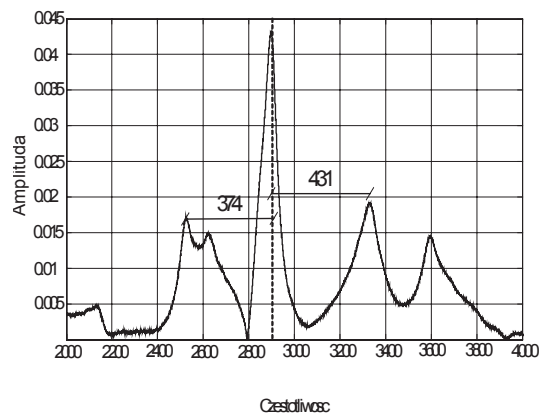
Rys. 4. Zjawiska modulacji wokół częstotliwości nośnej (różna odległość pasm bocznych)

Obserwując efekt zmodulowania można przyjąć, że tego typu zaburzenie dotyczy funkcji nośnej, której funkcja modulująca ma postaci dwóch funkcji harmoniczných, różniących się parametrami modulacji amplitudowej i częstotliwościowej.

Zatem odpowiedni model efektu zmodulowania o różnych odległościach pasm bocznych od częstotliwości nośnej podobnie jak to otrzymano w analizie sygnału rzeczywistego (rys 4), odpowiada zjawisku modulacji wieloparametrowej.

$$x(t) = A[(1 + M_1 \sin(\omega_1 t) + M_2 \cos(\omega_1 t)) \cdot \cos(\omega t + m_1 \cos(\omega_1 t) + m_2 \sin(\omega_2 t))]^3 \quad (4)$$

Otrzymany rezultat symulacji w dziedzinie częstotliwości przedstawiono został na rysunku 5.



Rys. 5. Widmo sygnału wygenerowanego na podstawie wzoru (4)

Warto zwrócić uwagę, że w momencie pojawienia się pęknięć, wspomniane pasma wokół częstotliwości nośnych zostają poważnie zaburzone, co widoczne jest na rysunku 6.

Na rysunku 7, wykorzystując do tego celu reprezentacje sygnału na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej, przedstawiono towarzyszącą temu dodatkową deformację pasm zmodulowanych.

Dla przybliżenia fizycznej strony tego zjawiska przeanalizujemy wpływ przesunięcia fazowego, modulacji częstotliwościowej wywołanego zmianą warunków propagacji w związku z powstaniem i rozwojem kolejnych pęknięć betonu.

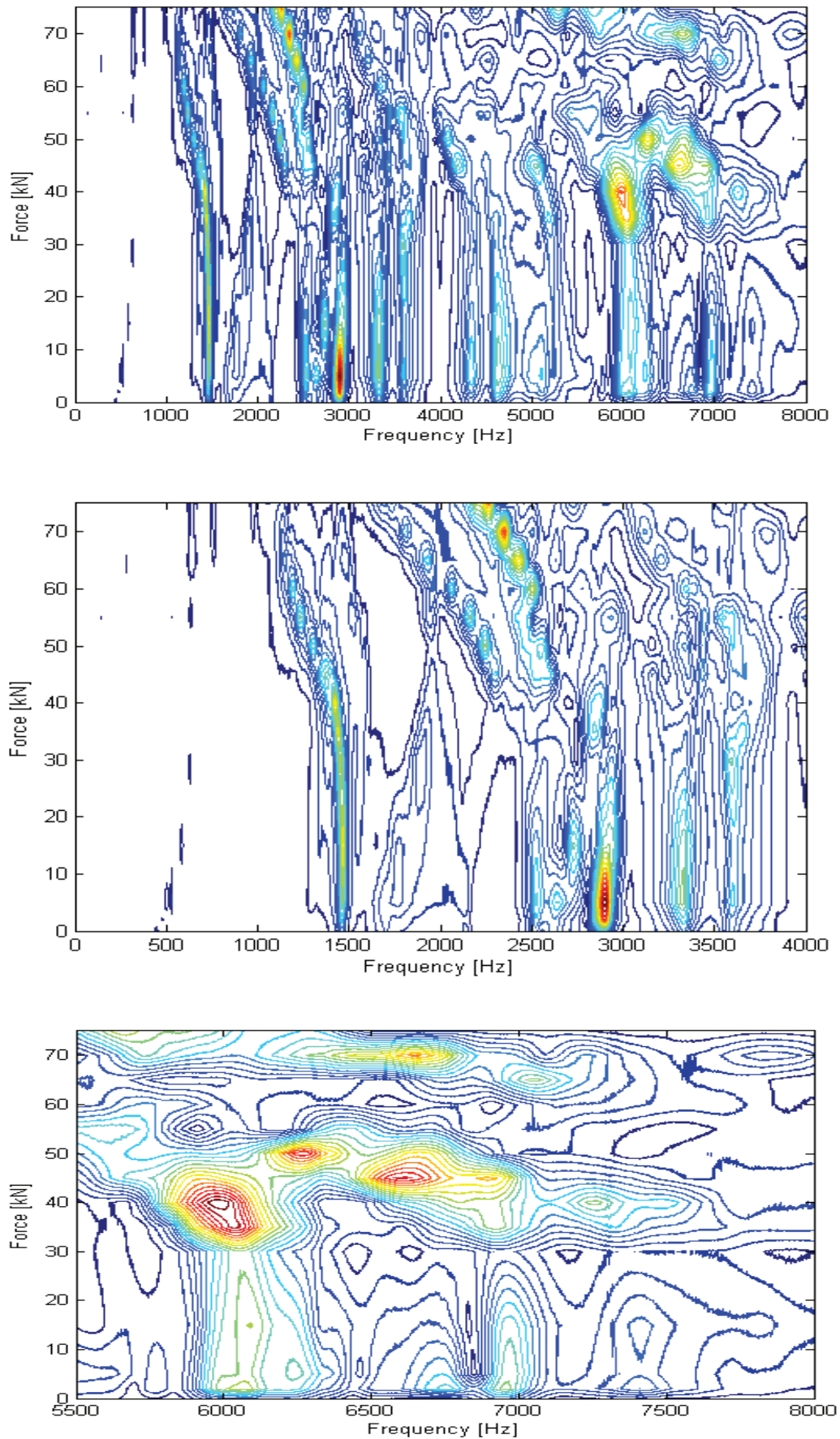
Zauważmy, że przyjęcie funkcji parzystej (cosinus) do opisu zmian przyrostu kąta fazowego, odpowiednio ze znakiem minus:

$$y = A(1 + M \cdot \cos(\Omega_2 \cdot t)) \cos(\omega \cdot t + m \cdot \cos(\Omega \cdot t + \varphi)) \quad (5)$$

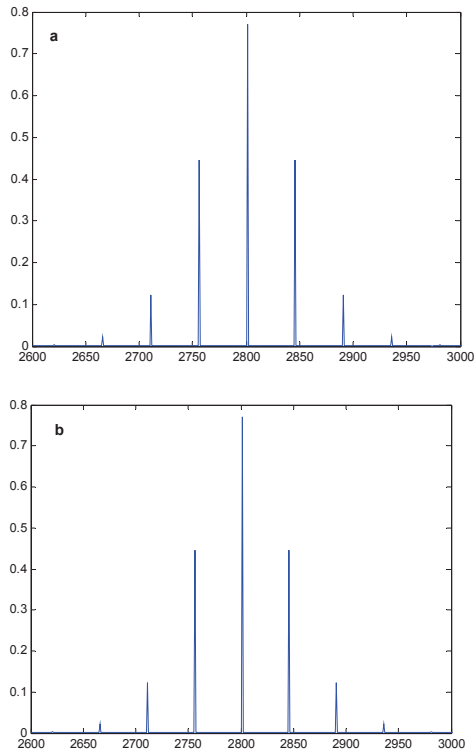
i ze znakiem plus:

$$y = A \cdot (1 + M \cdot \cos(\Omega_2 \cdot t)) \cdot \cos(\omega \cdot t - m \cdot \cos(\Omega \cdot t + \varphi)) \quad (6)$$

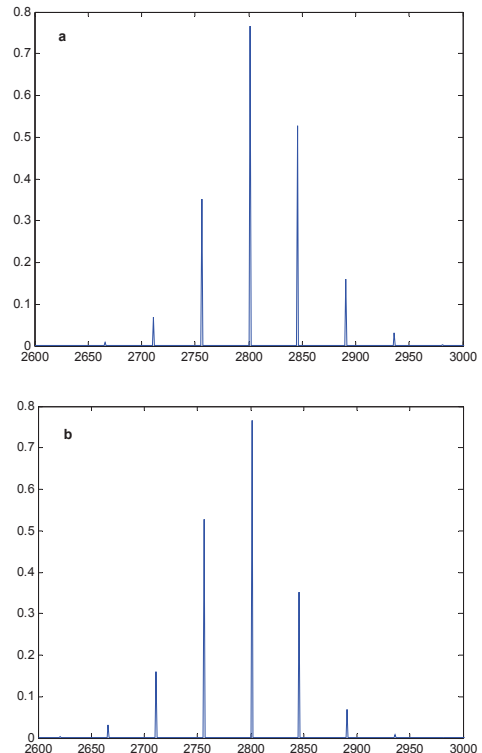
jest, zgodnie z oczekiwaniami, nierozpoznawalne na podstawie wyników analizy fourierowskiej (rys 7), natomiast analiza czasowo-częstotliwościowa wskazuje na występowanie jakościowej różnicy w obydwu obrazach (rys. 8).



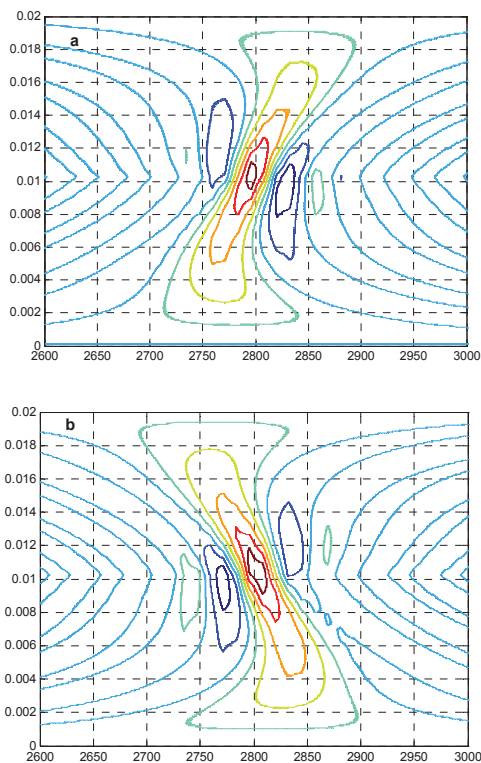
Rys. 6. Płaszczyzna częstotliwość obciążenie dla wybranych przedziałów częstotliwości [2].



Rys.7 Widmo sygnałów wygenerowanych na podstawie:
a) wzoru (5) i b) wzoru (6)



Rys. 9. Widmo sygnałów wygenerowanych na podstawie:
a) wzoru (5) i b) wzoru (6)



Rys. 8. Przedstawienie na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej sygnałów wygenerowanych na podstawie:
a) wzoru (5) i b) wzoru (6)

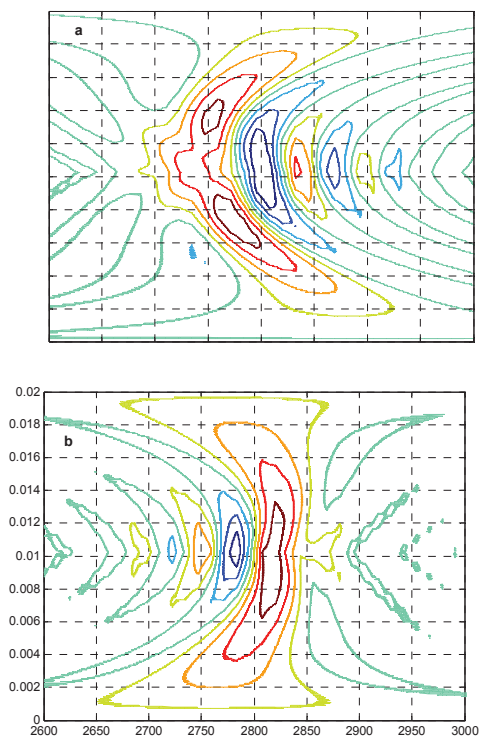
Okazuje się, że występowanie zaburzeń, powodujące „obrót” pasm bocznych na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej związane jest z wpływem przesunięcia fazowego w argumentie funkcji nośnej. Zauważmy, że zupełnie inny efekt otrzymamy przy zmianie fazy pomiędzy modulacjami amplitudową i częstotliwościową zgodnie ze wzorami

$$y = A \cdot (1 + M \cdot \cos(\Omega_2 \cdot t)) \cdot \cos(\omega \cdot t - m \cdot \sin(\Omega \cdot t + \varphi)) \quad (7)$$

i

$$y = A \cdot (1 + M \cdot \cos(\Omega_2 \cdot t)) \cdot \cos(\omega \cdot t + m \cdot \sin(\Omega \cdot t + \varphi)) \quad (8)$$

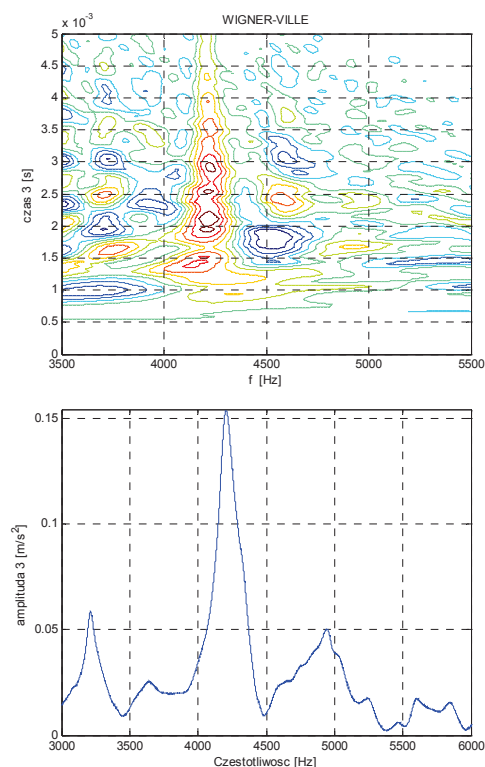
W tym przypadku zarówno w widmie (rys. 9) jak i na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej (rys 10) obserwujemy efekt deformacji pasm bocznych, przy czym w zależności od przyjętych funkcji modulujących wzmacniane jest pasmo dolne (7) lub pasmo górne (8).



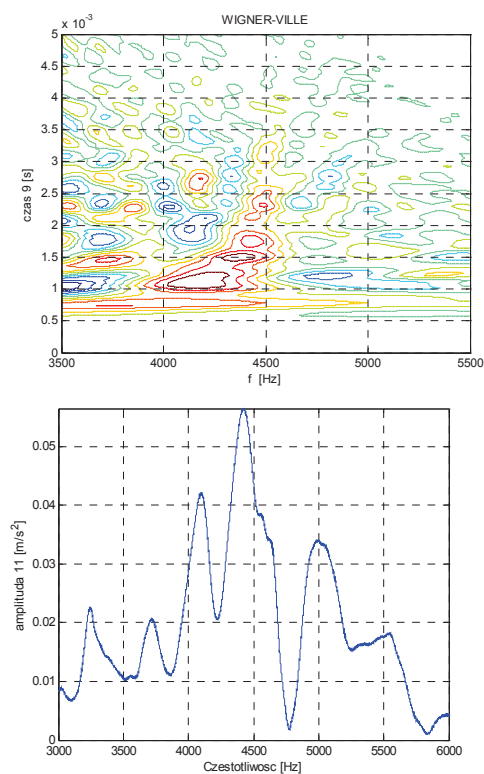
Rys.10. Przedstawienie na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej sygnałów wygenerowanych na podstawie: a) wzoru (5) i b) wzoru (6)

Z punktu widzenia możliwości wykorzystania tych modeli w diagnozowaniu rozwoju pęknięć, otrzymane rezultaty są wielce interesujące, tym bardziej, że rezultaty przeprowadzonych badań wskazują na możliwość występowania efektów modulacyjnych, które mogą być opisywane zależnościami (5) i (6). Odpowiednie rezultaty analiz sygnałów uzyskanych podczas badań laboratoryjnych, potwierdzające powyższy wniosek przedstawiono na rysunkach 11 ÷ 13.

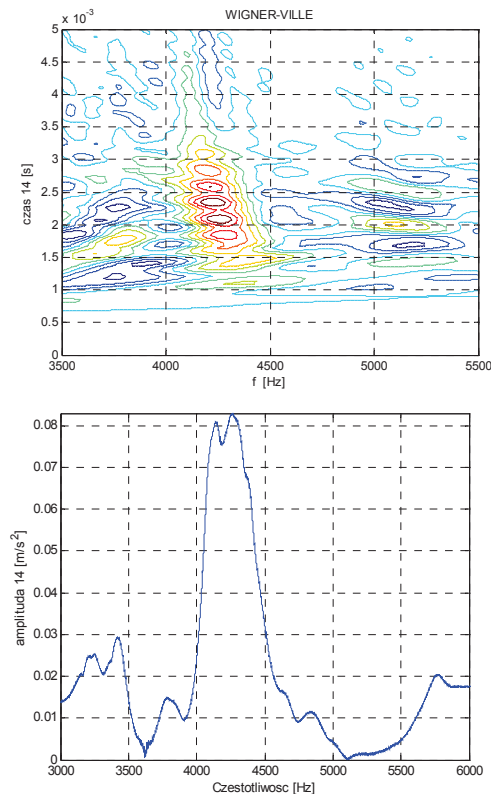
Na rysunku 11 przedstawiono wyniki analizy odpowiedzi dynamicznej belki w postaci reprezentacji czasowo-częstotliwościowej i widma wąskopasmowego na wymuszenie impulsowe przy obciążeniu 5kN, na kolejnym rysunku przedstawiono wyniki analizy odpowiedzi dynamicznej belki znajdującej się pod obciążeniem 50 kN, które poprzedza pojawienie się widocznych pęknięć na zewnątrz belki. Rysunek 13 przedstawia analogicznie opracowane wyniki odpowiedzi dla ostatniego mierzalnego obciążenia - 75 kN (przy zwiększeniu siły belka przez cały czas powoli zwiększała ugięcie mimo utrzymywania stałego ciśnienia w siłowniku, aż do całkowitego złamania belki).



Rys. 11. Sygnał na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej oraz widmo sygnału w paśmie zmodulowanym wokół częstotliwości nośnej 4250 Hz (belka 125 5kN)



Rys. 12. Sygnał na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej oraz widmo sygnału w paśmie zmodulowanym wokół częstotliwości nośnej 4250 Hz (belka 125 50kN)



Rys. 13. Sygnał na płaszczyźnie czasowo częstotliwościowej oraz widmo sygnału w paśmie zmodulowanym wokół częstotliwości nośnej 4250 Hz (belka 125 75kN)

Przedstawione wyniki analizy czasowo-częstotliwościowej wyraźnie potwierdzają powyższe wnioski.

4. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań i analiz analitycznych wynika, że proces powstawania pęknięć w strukturze sprężonego betonu może być diagnozowany nie tylko na podstawie analizy zmian częstotliwości drgań własnych, ale również na podstawie analizy położenia pasm bocznych na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej.

Ten ostatni efekt związany jest z zaburzeniem modulacji częstotliwościowej wywołanym zmianami warunków propagacji fali.

W związku z tym wydaje się, że duże możliwości ilościowego opisu tego procesu uszkodzeń związane są z zastosowaniem modeli propagacji fali w środowisku, które można przybliżyć i modelować jako strukturą granulatową.

Innego podejścia wymaga zagadnienie opisu zmian warunków propagacji przed wystąpieniem pęknięcia, gdy decydujący wpływ na zmianę warunków propagacji ma zmiana rozkładu naprężeń przekroju poprzecznym belki.

To zagadnienie będzie tematem następnego etapu prac nad diagnozowaniem rozwoju uszkodzeń w strukturach sprężonych.

LITERATURA

- [1] Graff K.F. (1991) Wave motion in elastic solids, Dover Publications. Inc. New York.
- [2] Radkowski S.; Szczurowski K. (2005) The Influence Of Stress In A Reinforced And Pre-Stressed Beam On The Natural Frequency; 2nd Workshop of COST Action 534, pp160-170.
- [3]. Radkowski S. (2004) Wykorzystanie nieliniowych efektów wibroakustycznych w diagnozowaniu uszkodzeń 3rd International Congress of Technical Diagnostics "DIAGNOSTICS'2004", Poznań 06-09.09.2004. PTDI, „Diagnostyka” vol. 30; tom 2, str. 73-78.
- [4]. Scalerandi M. i inni: (2003) Local interaction simulation approach to modeling nonclassical, nonlinear elastic behavior in solids, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 116, nr 6, str. 1÷11.
- [5]. Rudenko O.V.: (1993) Nieliniowe metody diagnostyki akustycznej, Defectoskopia, nr 6, str. 24÷32 (w jęz. rosyjskim).



Prof. Stanisław RADKOWSKI
profesor w Instytucie Podstaw
Budowy Maszyn Politechniki
Warszawskiej kierownik
Zespołu Naukowego
Diagnostyki Technicznej
i Analizy Ryzyka. Prezes
Polskiego Towarzystwa
Diagnostyki Technicznej.



Mgr inż. Krzysztof
SZCZUROWSKI doktorant
wydziału Samochodów
i Maszyn Roboczych
Politechniki Warszawskiej.
W pracy naukowej zajmuje się
diagnostyką wibroakustyczną.
Członek Polskiego
Towarzystwa Diagnostyki
Technicznej.