

**Prof. dr hab. inż. Stanisław Radkowski**

**Dr inż. Krzysztof Szczurowski**

Institut Pojazdów  
Politechnika Warszawska  
Ul. Narbutta nr 84, 02-524 Warszawa, Polska  
E-mail: kszczur@simr.pw.edu.pl

## **Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego w diagnostyce struktur sprężonych<sup>1</sup>**

**Słowa kluczowe:** diagnostyka techniczna, modulacja amplitudowa, prędkość grupowa, prędkość fazowa, konstrukcje sprężone

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zagadnienie oceny stanu technicznego struktury sprężonej ze szczególnym uwypukleniem możliwości wykorzystania efektów modulacji amplitudowej występujących w obserwowanym sygnale wibroakustycznym. Podstawą takiego podejścia jest teza że zmianie rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym struktury sprężonej towarzyszy mierzalna zmiana parametrów sygnału wibroakustycznego.

Wynika ona z założenia, że wraz z wywołaniem stanu sprężenia wstępnego w zginanej konstrukcji zachodzi zjawisko dyspersji, a tym samym zmiana parametrów propagacji fali, w szczególności występowanie mierzalnej różnicy wartości prędkości fazowej i grupowej.

Analiza relacji między stanem naprężeń a wartościami prędkości fazowej i grupowej stwarza możliwość budowania diagnostycznych modeli odwrotnych i wyznaczania ilościowych zmian takich parametrów stanu technicznego, jak siły sprężające, moduł Younga czy naprężenia panujące w konstrukcji.

Praca powstała na podstawie rozprawy doktorskiej autora.

### **1. Wprowadzenie**

Na przełomie XX i XXI wieku środowiska związane z użytkowaniem konstrukcji betonowych z napięciem wstępnym rozpoczęły szeroko zakrojone prace w zakresie pogłębienia wiedzy na temat warunków zapewnienia trwałości istniejących konstrukcji oraz przedłużenia ich okresu użytkowania nawet do 80 lat (projektowane były one na 50 lat), minimalizacji kosztów napraw i monitoringu oraz poprawą długoterminowego bezpieczeństwa [8]. Niestety w wielu wypadkach od budowy tego typu konstrukcji upłynęły już dziesięciolecia, a często minął nawet założony okres eksploatacji. Powstał więc problem, jak ocenić, stan budowli pod względem spełnienia wymogów bezpieczeństwa. Z tego powodu zaczęto przykładać znaczną wagę do sposobów wykrywania w tego typu konstrukcjach stopnia degradacji struktury, wad, pęknięć i innego rodzaju uszkodzeń, z których część może okazać się krytyczna i wywoła katastrofalne uszkodzenie całej konstrukcji.

Jednym z ważniejszych kierunków tych działań było znalezienie nowych metod oceny stanu konstrukcji sprężonych. W ramach przedstawionej pracy przybliżono prace dotyczące aplikacji metod drganiowych i akustycznych przyjęto założenie, że wczesnym fazom makrouszkodzeń struktury sprężonej będzie towarzyszyć zmiana rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym. W związku z tym podjęto próbę opracowania bezinwazyjnej metody wykrywania

---

<sup>1</sup> Artykuł powstał na podstawie rozprawy doktorskiej obronionej na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych

zmian rozkładu naprężeń na podstawie informacji zawartej w sygnale wibroakustycznym, generowanym przez dynamicznie pobudzoną strukturę sprężoną.

Metody ultradźwiękowe można podzielić na dwie grupy. Pierwsza polega na pomiarze prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w konstrukcji żelbetowej, a druga na analizie zmian parametrów fali propagującej w materiale.

Pomiar prędkości propagacji odbywa się z wykorzystaniem dwóch powierzchni badanego elementu i ma na celu pomiar drogi, jaką przebywa fala propagująca. Badania prędkości impulsu ultradźwiękowego w materiale polegają na wprowadzeniu do niego fali ultradźwiękowej i na pomiarze czasu przejścia jej czoła od przetwornika nadawczego do przetwornika odbiorczego. Znając czas przechodzenia impulsu i długość drogi, można wyznaczyć prędkość rozchodzenia się fali. [11].

Do drugiej grupy metod ultradźwiękowych należą między innymi metody Impact-echo [12], Pulse-echo [7] oraz metoda powierzchniowa [11].

W metodach tych wykorzystuje się efekty zaburzeń, jakim ulegają fale ultradźwiękowe, przechodząc przez materiał i odbijając się od granicy elementu lub innych nieciągłości w materiale. Po przeprowadzeniu odpowiednich analiz sygnału (np. FFT) wnioskuje się o drodze, jaką fala przebyła.

Metody te umożliwiają szybkie określenie grubości elementów dostępnych jednostronnie takich jak płyty pomostowe i nawierzchnie jezdni, a także lokalizację wszelkiego rodzaju wewnętrznych uszkodzeń konstrukcji żelbetowych, takich jak wtrącenia innych materiałów (np. drewna), raków (np. pustek powietrznych), pęknięć lub korozji.

Stosunkowo nową metodą nieniszczącą jest metoda impulsowych prądów wirowych (Pulsed Eddy Current - PEC). Stosuje się ją do inspekcji i identyfikacji ukrytych korozji w warstwie struktur z elementami ferromagnetycznymi. [9]. Główną jej zaletą jest możliwość pokrycia szerokiego zakresu częstotliwości pobudzanych silnym pulsowaniem pola elektromagnetycznego. Metoda ta jest też dość prosta, a potrzebne do stosowania jej wyposażenie jest relatywnie tanie.

Metoda emisji akustycznej (Acoustic Emission) jest pasywną metodą monitorowania, polegającą na detekcji zaburzeń wywołanych przez falę naprężeniową emitowaną w czasie powstawania pęknięcia, lub złamania włókna. Dla kontrastu, klasyczne metody ultradźwiękowe detekcji uszkodzeń są metodami aktywnymi, to znaczy polegają na wysyłaniu fali naprężeniowej w głąb badanego obiektu w celu identyfikacji istniejącego defektu.

Skuteczność metody emisji akustycznej sprawdzono w kilku pracach. Okazało się, że na skutek korozji i mikropełnięć powstawała fala naprężeniowa, którą można było wykryć przy użyciu czujników emisji akustycznej [4].

Można ją stosować do stałego nadzoru bez żadnych ograniczeń. Niestety jest metodą pasywną i można z niej korzystać tylko do rejestracji sygnałów, które powstały w wyniku pęknięć lub innych zmian wewnątrz materiału, ale bez możliwości bezpośredniej oceny ciężkości powstających uszkodzeń.

Metody magnetyczne były często używane w badaniu struktur betonowych, do lokalizacji elementów zbrojenia. Były również wykorzystywane do rutynowych inspekcji włókien i lin w powietrzu. Burdekin i in. [1] przedstawili projekt realizowany w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku w Southwest Research Institute, poświęcony wykrywaniu korozji i złamań w stalowych elementach sprężających belek strunobetonowych i kablobetonowych.

Nieliniowe metody wibroakustyczne (Nonlinear Vibro-acoustic Method) zostały opracowane w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku w Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences do kontroli jakości osłon termoizolacyjnych stosowanych w rosyjskich promach kosmicznych. Rozwijający je Dimitri M. Donskoy i Alexander Sutin [13], przedstawili oni metodę, której podstawą jest analiza nieliniowego sygnału wibroakustycznego.

W tradycyjnych liniowych metodach akustycznych wykorzystuje się efekty odbić, rozprożeń i pochłaniania energii akustycznej. Metody te umożliwiają wykrywanie wad (defektów) na podstawie chwilowych zmian fazy i/lub amplitudy sygnału. Dzięki nieliniowym związkom można przeprowadzić detekcję tych zmian w innych pasmach częstotliwości niż częstotliwości sygnału emitowanego. Zależy to od rodzaju nieliniowej transformacji energii akustycznej przez defekt. We wspomnianej metodzie przyjmuje się, że materiały, w których występują pęknięcia, powodują w odpowiedzi zmianę i generują dużo większą jej nieliniowość.

Zaletą nieliniowych metod jest możliwość aplikacji do wysoko niehomogenicznych struktur takich jak kompozyty i betony. Kiedy sinusoidalna fala akustyczna napotyka defekt, ulega zmianie na powierzchni kontaktu (wzrost sprężenia, zmniejszenia naprężenia). Jest to zjawisko w pewnym stopniu analogiczne do zamykania się pęknięcia podczas sprężenia i otwierania się go podczas napinania (rozciągania) i prowadzi do powstawania kolejnych harmonicznych generowanego sygnału.

Odnosząc się do obecnego stanu wiedzy warto zaznaczyć, że w badaniach struktur sprężonych główną wagę przywiązuje się do wykrywania wad i uszkodzeń materiałów. Również pod tym kątem analizowane są dynamiczne odpowiedzi struktury.

## **2. Ocena istniejących metod**

Wszystkie wymienione tu metody mają na celu wykrycie pęknięć, wtrąceń, korozji czy innych uszkodzeń występujących w betonowych konstrukcjach sprężonych i są ukierunkowane na znalezienie miejsca ich występowania, tzn. korozji w strunach lub prętach zbrojeniowych, korozji betonu, pęknięć strun lub betonu, wtrąceń lub innych defektów materiału. Dopiero na podstawie otrzymanych informacji można ustalić czy badany defekt ma krytyczne znaczenie dla całej konstrukcji. Przykładem może być emisja akustyczna, która umożliwia wykrycie pojawiających się pęknięć bez określania ich wpływu na całą konstrukcję, czy metody magnetyczne służące do obserwacji zmian pola magnetycznego wokół uszkodzonych strun sprężających. Dodatkowo, określenie stanu całej konstrukcji przy użyciu wspomnianych metod wymaga znacznego czasu, gdyż jednorazowe badanie może obejmować jedynie fragment konstrukcji.

## **3. Propozycja nowego podejścia**

Proponowane nowe podejście do oceny stanu elementów sprężonych, takich jak betonowe elementy sprężone, polega na obserwacji zmian dynamicznych charakterystyk całych elementów (konstrukcji) pod wpływem zmian w strukturze naprężeń [2].

W dotychczasowej praktyce dynamiczna odpowiedź struktury jest wykorzystywana w badaniach nieniszczących do wykrywania, lokalizacji i określenia stopnia rozwoju uszkodzenia. Definiując strukturalne uszkodzenie jako swego rodzaju odchylenie geometrycznych i materiałowych właściwości od normy, można oczekiwać zmian w dynamicznej odpowiedzi układu na ustalone obciążenie.

W strukturach sprężonych ważnym zjawiskiem jest jakościowa zmiana w strukturze naprężeń w przekroju poprzecznym. Na etapie konstruowania zadaje się naprężenia ściskające w całym przekroju poprzecznym. W trakcie eksploatacji następstwem procesów degradacyjnych są zmiany w projektowanym rozkładzie naprężeń w przekroju poprzecznym. Możliwość wykrycia zmian rozkładu naprężeń stwarza szansę określenia stanu konstrukcji sprężonych i prognozowanie residualnego czasu ich użytkowania.

Aby pokonać wspomniane trudności, w proponowanym sposobie diagnozowania wykorzystuje się zjawisko zmodulowania parametrów sygnału wibroakustycznego, wywołane

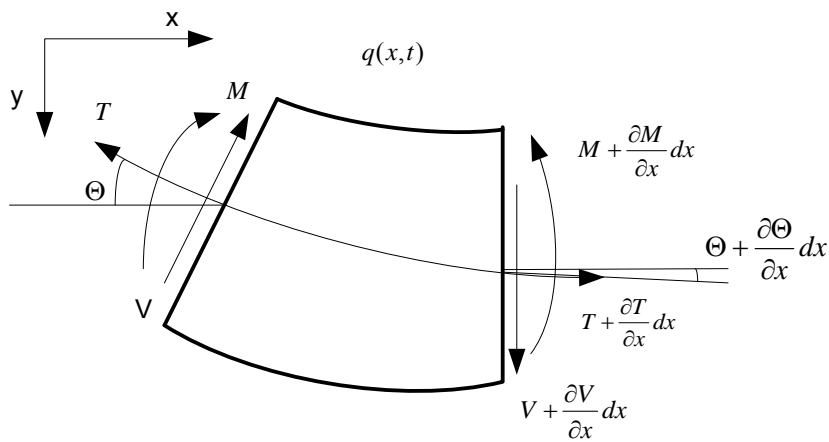
zmianami warunków propagacji fali dźwiękowej w materiale wskutek zmian rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym konstrukcji sprężonej.

### 3.1. Badania zmian częstotliwości struktury sprężonej

Zagadnienie wpływu sprężenia na strukturę częstotliwościową sygnału drganiowego konstrukcji sprężonych jest analizowane w literaturze poświęconej dynamice układów ciągłych z wykorzystaniem różnych modeli. Graff [5] na przykład, analizując drgania belki poddanej dodatkowo rozciąganiu, przyjmuje za wyjściowy model Bernoulliego–Eulera, do którego dodatkowo przykładają się siły rozciągające (Rys. 1).

Równanie ruchu przyjmuje postać:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$



Rys. 1. Element modelu belki Bernoulliego-Eulera [5]

W przypadku wystąpienia sił ściskających trzeba w równaniu (1) zmienić znak siły  $T$  na przeciwny. Rozwiązując równanie (1), otrzymamy wyrażenie na wartość częstotliwości  $n$ -tej postaci drgań w zależności od wielkości siły sprężającej:

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

Ze wzoru (2) wynika, że przyłożenie sił rozciągających spowoduje wzrost częstotliwości drgań własnych belki, natomiast przyłożenie sił ściskających – jej spadek. W wypadku zmiany rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym belki wystąpi, więc efekt propagacji fali z różnymi prędkościami, co może stać się dodatkowym, istotnym czynnikiem mającym wpływ na proces generacji prędkości grupowej fali i związanym z tym zjawisk modulacji parametrów sygnału wibroakustycznego.

Na podstawie modelu belki Bernoulliego-Eulera, przedstawionego na rysunku 1 i opisanego zależnością (1)

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - \frac{T}{EI} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

gdzie  $c^2 = \frac{EI}{\rho A}$ ,

możemy określić liczbę falową.

Występowanie w równaniach składnika zależnego od siły naprężającej wskazuje na zjawisko dyspersji i konieczność ustalenia zależności prędkości fazowej od wartości bądź stosunku sił. Stąd zależność określająca prędkość fazową można przedstawić w postaci:

$$c_f = k \cdot c = c \sqrt{\frac{T}{2EI} + \left( \frac{T^2}{4E^2 I^2} + k^4 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

a zależność między prędkością grupową a prędkością fazową:

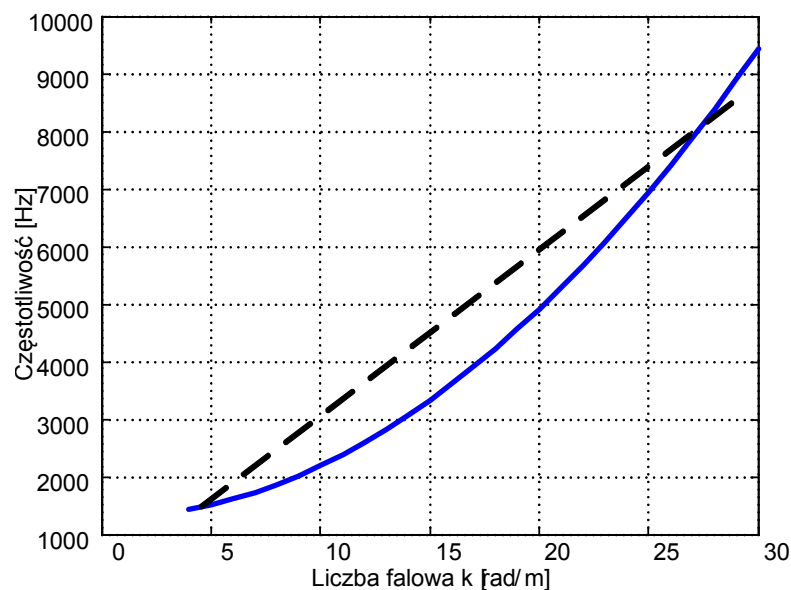
$$c_g = c_f - ck^4 \left( \frac{T}{2EI} + \left( \frac{T^2}{4E^2 I^2} + k^4 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{T^2}{4E^2 I^2} + k^4 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Zależność (5) wskazuje na zależność prędkości grupowej od wartości sił sprężających i liczby falowej  $k$ .

Wykorzystując zależność między prędkością propagacji fali a długością fali:

$$f = \frac{k \cdot c_f}{2\pi} \quad (6)$$

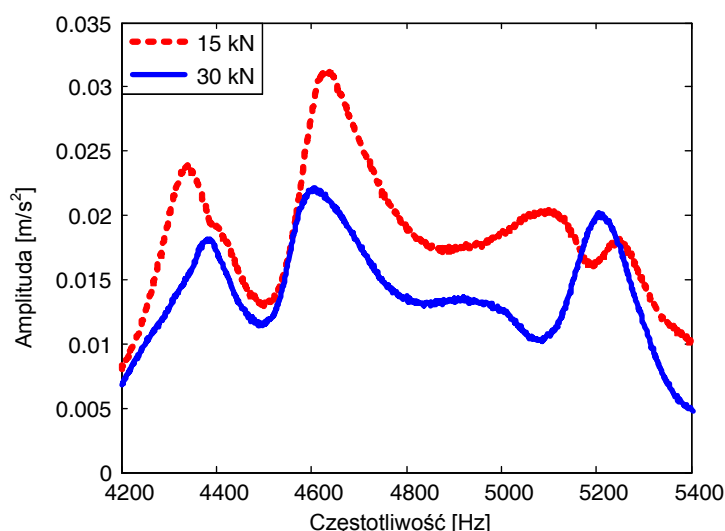
gdzie  $k = \left( \frac{\omega}{c} \right)^{\frac{1}{2}}$ , można wyznaczyć krzywą dyspersji, przedstawioną na rysunku 2, która opisuje częstotliwości drgań własnych badanej belki w funkcji prędkości falowej.



**Rys. 2.** Zmiana częstotliwości według zależności (5) [3]

Jak łatwo zauważyć, w materiałach o właściwościach dyspersyjnych nie należy oczekiwać typowej harmoniki, gdyż częstotliwości kolejnych postaci drgań nie są wielokrotnością częstotliwości podstawowej [3].

Zmiany, jakim podlega prędkość fazowa, dotyczą również prędkości grupowej. Zgodnie z przyjętym założeniem, zmiany prędkości grupowej wraz ze wzrostem siły poprzecznej, powinny być widoczne w postaci zmian częstotliwości modulującej wokół częstotliwości nośnej, zmieniającej się zgodnie ze zmianami prędkości fazowej.



**Rys. 3.** Zmiany w modulacji amplitudowej przy zmianie obciążenia w wybranym paśmie [3]

Wspomniany efekt można było zaobserwować na widmach odpowiedzi dynamicznej belek sprężonych badanych na stanowisku w Politechnice Świętokrzyskiej. Na rysunku 3. przedstawiono przykład tego zjawiska.

Dodatkowo występowanie w równaniach składnika zależnego od siły naprężającej wskazuje na występowanie zjawiska dyspersji i konieczność ustalenia zależności prędkości fazowej od wartości sił [3; 10].

Wykorzystując wspomniany model, częstość drgań otrzymujemy w funkcji wartości sił naprężających i liczby falowej:

$$\omega = kc \left( k^2 + \frac{T}{EI} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Podstawiając siłę ściskającą równą zero ( $T = 0$ ), otrzymujemy ogólnie znaną zależność między częstotliwościami, liczbą falową i prędkością propagacji fali. Warto zwrócić uwagę, że przy takim założeniu nadal możliwe jest przyjęcie takiej samej liczby falowej jak w wypadku braku dyspersji, ponieważ warunki brzegowe się nie zmieniają. Ostatecznie uwzględniając zależności  $c_f = k c$  oraz  $\omega = k c_f$  można otrzymać:

$$c_f^2 = \omega \cdot c = kc^2 \left( k^2 + \frac{T}{EI} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

gdzie widoczna jest zależność propagacji fali zarówno od liczby falowej, jak i od siły sprężającej (przy zwiększaniu siły rozciągającej prędkość propagacji fali będzie rosła, a w przypadku zwiększania siły ściskającej – malała).

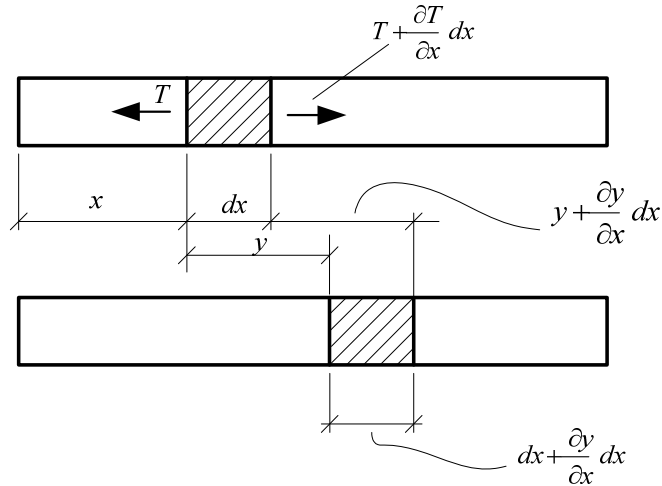
Otrzymana na podstawie równania (1) zależność określająca prędkość grupową w strukturze sprężonej została potwierdzona jakościowo w ramach eksperymentu, natomiast szacunki ilościowe byłyby obarczone zbyt dużym błędem. Jako następny przeanalizowano model drgań podłużnych belki.

### 3.2. Równanie podłużnych drgań belki

Rozważmy swobodne podłużne drgania belki, by następnie uwzględnić efekt sprężenia pod obciążeniem poprzecznym. Odpowiednie równanie, zgodnie z modelem przedstawionym na rysunku 4, przyjmie postać:

$$c_0^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (9)$$

gdzie  $c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  to prędkość propagacji przemieszczeń lub naprężeń w belce.



**Rys. 4.** Model propagacji drgań podłużnych

Po uwzględnieniu sił naprężających równanie (9) można napisać w postaci

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{p}{T} y = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (10)$$

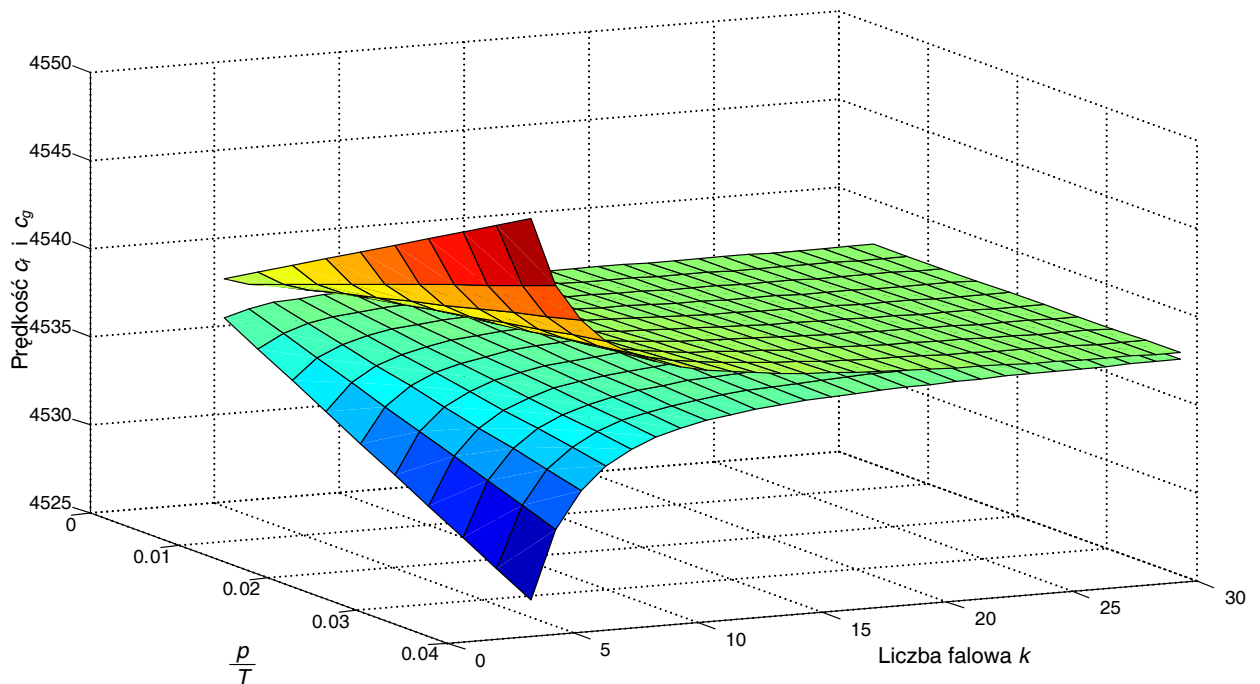
W efekcie otrzymamy zależności na prędkość fazową

$$c_f = c_0 \left( 1 + \frac{p}{Tk^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

i prędkość grupową

$$c_g = c_f - c_0 \frac{\frac{p}{T}}{k^2 \left( 1 + \frac{p}{Tk^2} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

Wykazaliśmy w ten sposób, że w tym wypadku mogą wystąpić dwie prędkości propagacji fali: fazowa i grupowa, co jest warunkiem koniecznym wystąpienia zjawiska modulacji amplitudowej. Rysunek 5 ilustruje otrzymaną zależność.



**Rys. 5.** Przebieg zmian prędkości grupowej w zależności od stosunku sił wzdłużnych do poprzecznych ( $p/T$ ), przy zmianie liczby falowej  $k$  i kierunku naprężeń

Aby przybliżyć zagadnienie wystąpienia zjawiska modulacji amplitudowej przytoczmy za Ignacym Maleckim model propagacji dwóch fal harmonicznych, których częstotliwości  $\omega_1$  i  $\omega_2$  nieznacznie się różnią:

$$y = A \cos(k_1 x - \omega_1 t) + A \cos(k_2 x - \omega_2 t) \quad (13)$$

Kontynuując analizę warunków występowania modulacji amplitudowej, zależność (13) możemy przedstawić w postaci iloczynowej:

$$y = 2A \cos\left(\frac{1}{2}(k_2 - k_1)x - \frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_1)t\right) \times \cos\left(\frac{1}{2}(k_2 + k_1)x - \frac{1}{2}(\omega_2 + \omega_1)t\right) \quad (14)$$

Uwzględniając dalsze przekształcenia:

$$y = 2A \cos(x - c_g t) dk \cos(x - c_f t) k \quad (15)$$

gdzie  $\frac{d\omega}{dk} = c_g$ ,  $\frac{\omega}{k} = c_f$

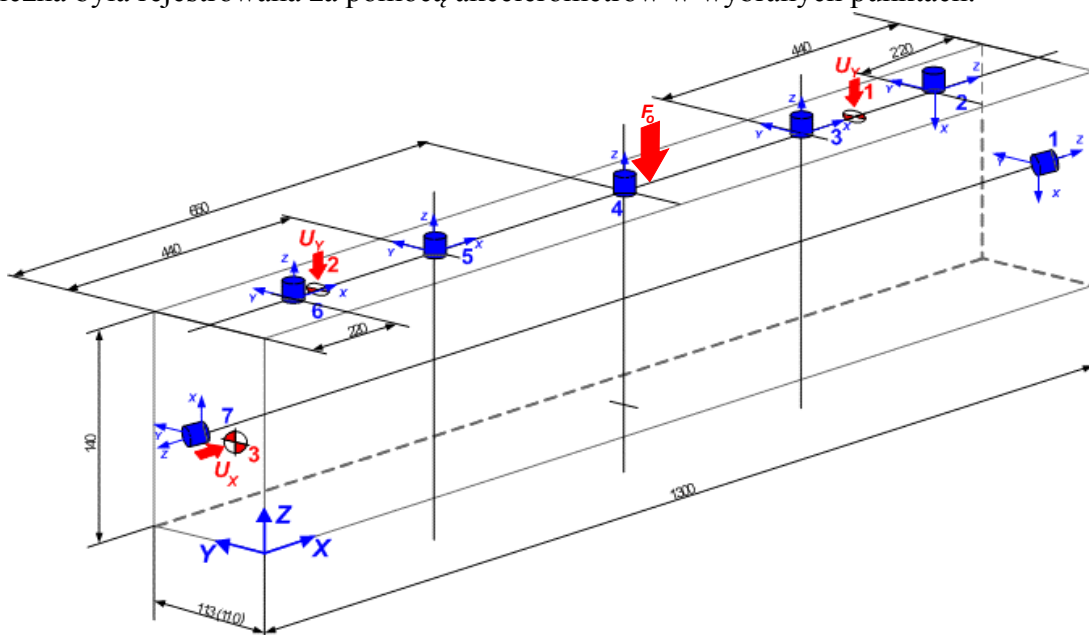
Otrzymana zależność wskazuje na związek między zjawiskiem modulacji amplitudowej a koniecznością występowania dwóch różnych prędkości falowych: prędkości fazowej ( $c_f$ ) i prędkości grupowej ( $c_g$ ).



#### 4. Opis obiektu badań

W ramach pracy wykonano kilka typów belek sprężonych, z których do badań wstępnych wytypowano pierwszy typ którym były belki wykonane z betonu klasy B20, o wymiarach  $1510 \times 102 \times 200$  mm, zbrojona czterema prętami o średnicy  $\varnothing 10$  ze stali zbrojeniowej wzdłuż osi belki. Zbrojenia poprowadzono w odległości około 25 mm od jej brzegów, ze sprężeniem wstępnym wynoszącym między 17 a 20 MPa, realizowanym przez dwie siedmiodrutowe struny napinające. Do drugiego typu należały sprężone belki betonowe o wymiarach  $110 \times 140 \times 1300$  mm i były wykonane z betonu C 40/50. Do sprężenia dochodziło pod wpływem 4 prętów sprężających (o  $\varnothing 6,8$  mm), rozmieszczonych symetrycznie. Siła sprężająca w belkach zmieniała się od 0 kN do 100 kN. Belki nie miały dodatkowego zbrojenia.

Wszystkie belki podano trzypunktowemu zginaniu obciążając od zera do całkowitego pęknięcia belki, schemat przedstawia rysunek 6. Przy ustalonych siłach obciążających wymuszano konstrukcję młotkiem modalnym umożliwiającym pomiar siły. Odpowiedź dynamiczna była rejestrowana za pomocą akcelerometrów w wybranych punktach.



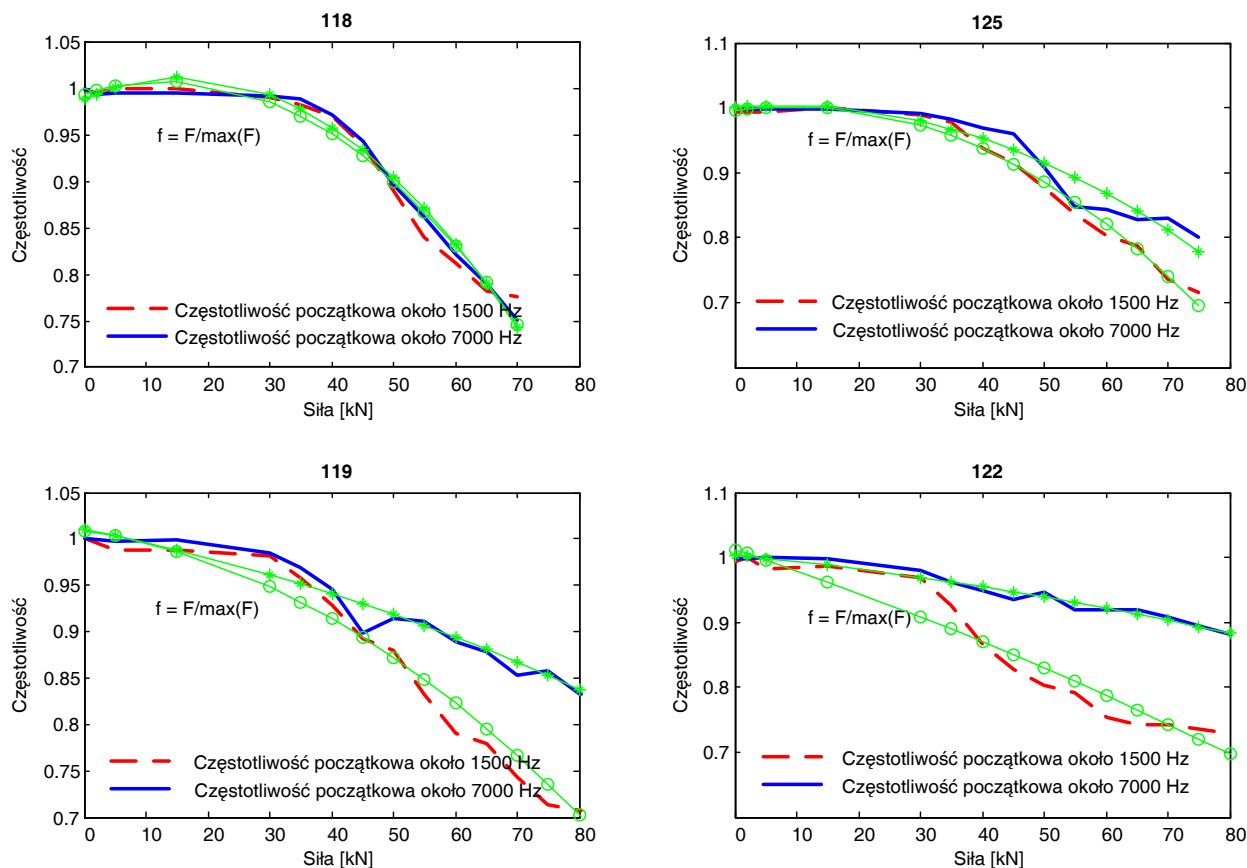
**Rys. 6.** Schemat badanego obiektu z naniesionymi punktami przyłożenia sił, pomiarowymi i miejscami wymuszeń

#### 5. Badania eksperymentalne i weryfikacja doświadczalna modeli

W wypadku pierwszego typu belek analizując odpowiedzi dynamiczne można zauważyć, że przy obciążeniu około 35 kN nastąpiła wyraźna zmiana jakościowa obserwowanych parametrów diagnostycznych. Należy zaznaczyć, że z obliczeń analitycznych, w których uwzględniono założone wartości naprężeń wstępnych, wynika możliwość wystąpienia naprężeń rozciągających przy zadanej wartości siły poprzecznej. Aby potwierdzić występowanie zaobserwowanej granicy w zachodzących zjawiskach, przeprowadzono analizy zjawisk dynamicznych, w szczególności analizę częstotliwościową zarejestrowanych sygnałów.

##### 5.1. Badanie częstotliwości drgań własnych belki

W badaniach użyto belek typu pierwszego, przy czym belki oznaczone 118 i 125 były to belki dobre a w pozostałych wprowadzono symulację uszkodzeń w postaci miejscowego zawilgocenia (119) i uszkodzenie części przekroju struny (122).

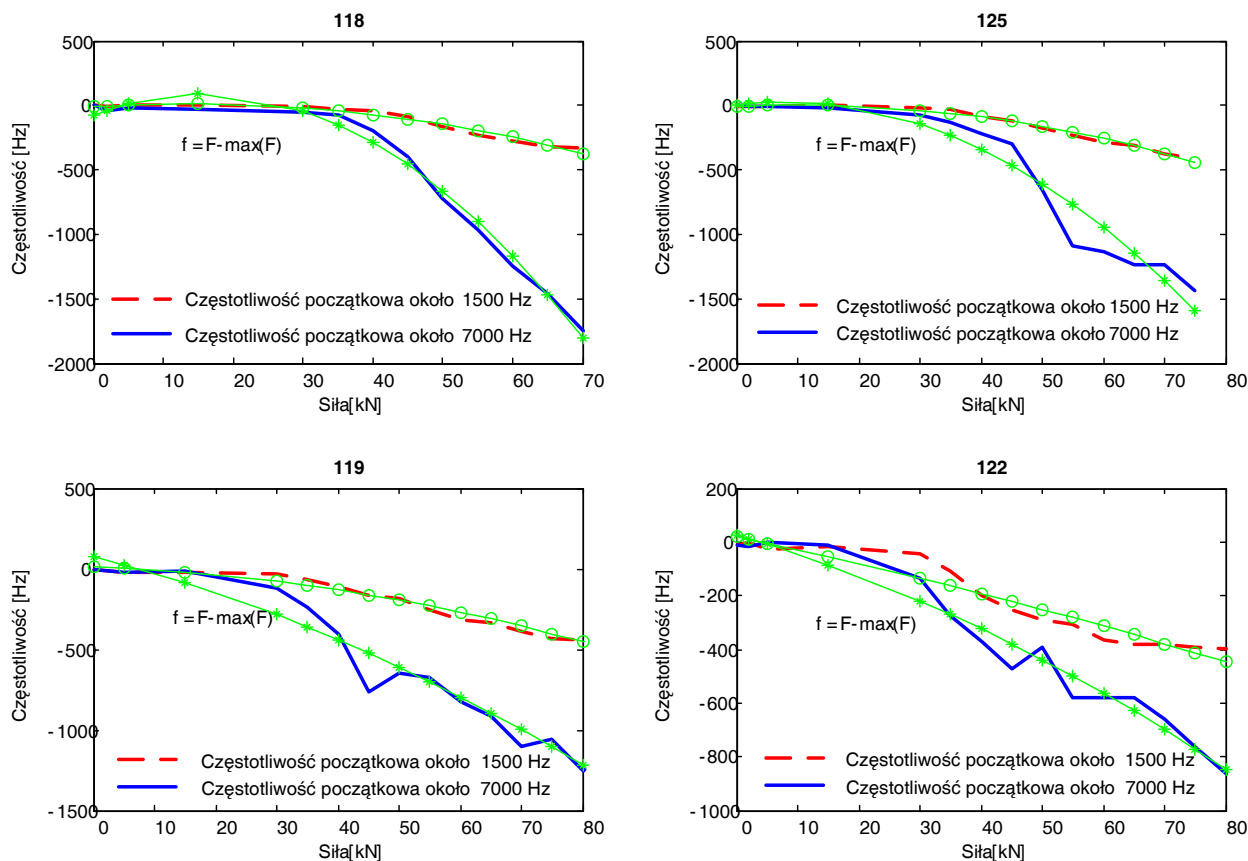


**Rys. 7.** Zmiany wybranych częstotliwości w zależności od obciążenia, przeskalowane w formie  $f = f_i/f_{\max}$

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono zmiany, jakim ulegają wybrane częstotliwości wraz ze wzrostem obciążenia belek. Szczególną uwagę należy zwrócić na dwie charakterystyczne częstotliwości 1500 Hz i 7000 Hz. Są to częstotliwości wyróżniające się spośród częstotliwości drgań wszystkich belek, mimo że w wypadku belki zawilgoconej (119) pierwsza z nich ma znacznie większą wartość.

W celu łatwiejszego porównania zmian przeskalowano je na dwa sposoby. Pierwszy polegał na podzieleniu wszystkich częstotliwości przez częstotliwość maksymalną (rys. 7), a drugi na odjęciu od nich częstotliwości maksymalnej (rys. 8).

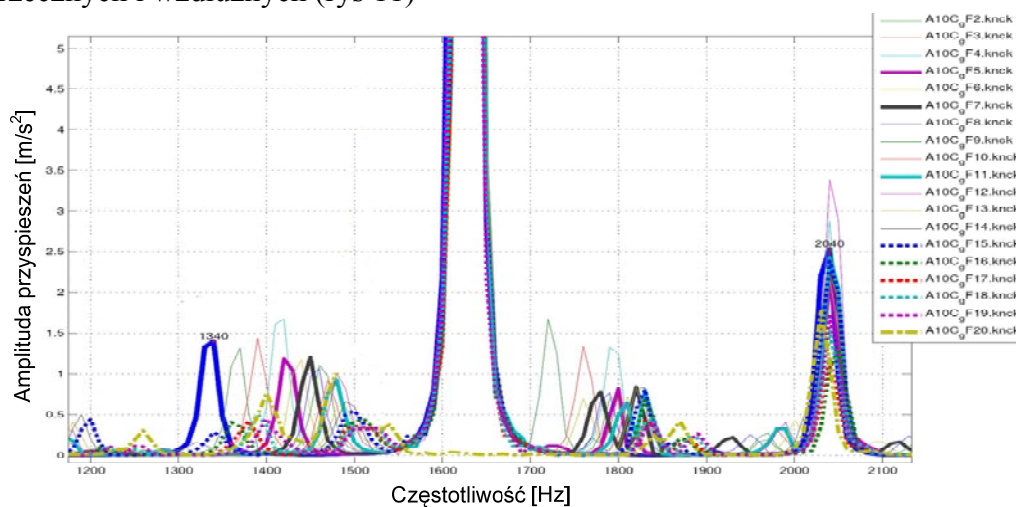
Dodatkowo przedstawiono przybliżenie przebiegów zmian za pomocą krzywych drugiego rzędu. W wypadku belek nieuszkodzonych opis krzywą drugiego rzędu wydaje się wystarczający, ale w wypadku belek z wprowadzonymi uszkodzeniami jest on mało dokładny i konieczne jest zastosowanie krzywych wyższego rzędu. Niestety, badanie zmian częstotliwości drgań wymaga znacznego obciążenia belek, co może doprowadzić do ich zniszczenia, czyniąc procedurę nieprzydatną z punktu widzenia technik nieniszczących.



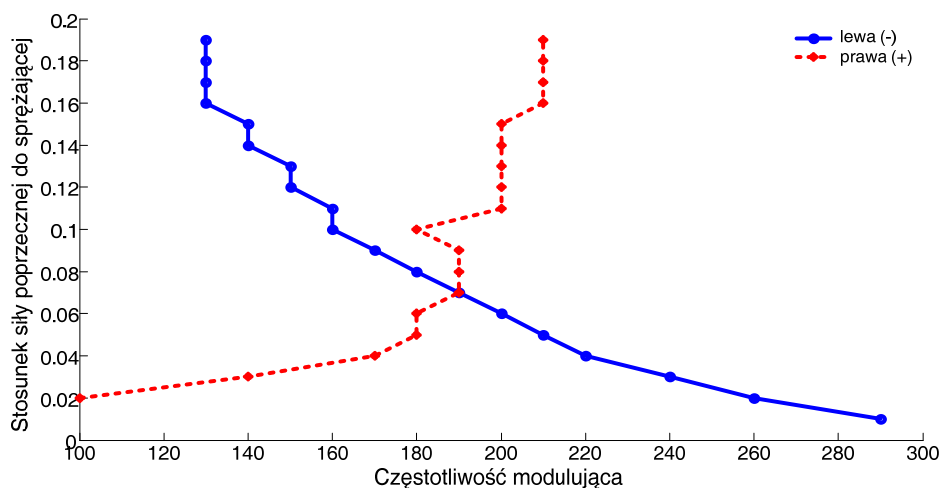
**Rys. 8.** Zmiany wybranych częstotliwości w zależności od obciążenia przeskalowane w formie  $f = F_i - F_{\max}$

## 5.2. Badanie zjawiska dyspersji

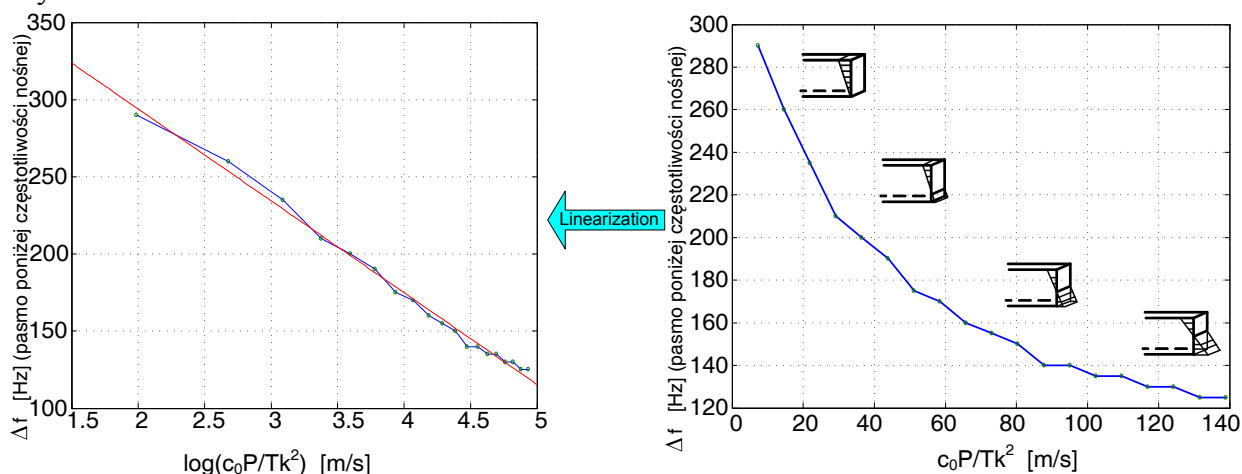
Odpowiednia kombinacja obciążeń (stosunek sił poprzecznych do wzdłużnych) przyczynia się do wystąpienia efektu dyspersji, zróżnicowania prędkości grupowej i wywołania towarzyszącego temu efektu zmodulowania amplitudowego został przedstawiony na rysunku 9. Zmiana częstotliwości modulujących, przedstawiona na rysunku 10 jest wywołana zmianami rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym belek i może być wykorzystana do oceny stosunku sił poprzecznych i wzdłużnych (rys 11)



**Rys. 9.** Fragment widma sygnału dla próbki obciążonej zmienną siłą poprzeczną dla wokół częstotliwości 1630 Hz z efektem dyspersji



**Rys. 10.** Zmiany częstotliwości modulujących w zależności od zmian stosunku sił poprzecznych i wzdłużnych



**Rys 11.** Linearyzacja zależności częstotliwości funkcji modulujących od zmian stosunku sił poprzecznych i wzdłużnych

W ten sposób obserwowano zjawisko dyspersji oraz dodatkowo analizowano zmiany wpływu obciążenia na odpowiedź dynamiczną struktury.

## 6. Wnioski

Odpowiednia kombinacja obciążeń (przyłożenie obciążenia poprzecznego) przyczynia się do wystąpienia efektu dyspersji, zróżnicowania prędkości grupowej i wywołania towarzyszącego temu efektu zmodulowania amplitudowego. Jednocześnie zmiana częstotliwości modulujących jest wywołana zmianami rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym belek i może być wykorzystana do oceny stosunku sił poprzecznych i wzdłużnych jak przedstawiono na rysunku 10. To spostrzeżenie umożliwia budowę modeli na podstawie których przy można określić siły sprężające w konstrukcjach, na podstawie których będzie można określić czy nadal jest spełnione założenie o nie występowaniu naprężeń rozciągających. Informację w ten sposób otrzymane umożliwią określenie czy badana konstrukcja może być dalej eksploatowana i w jakich warunkach (np. zmniejszenie dopuszczalnego obciążenia dla mostu). Zaproponowana metoda może być również wykorzystywana dla nowych konstrukcji w których należy określić prawidłowość wykonania sprężenia, o czym szerzej pisali autorzy w pracy [6].

Artykuł powstał na podstawie obronionej rozprawy doktorskiej, która realizowana była w ramach realizacji Programu europejskiego COST Akcja 534, prowadzonego w zespole Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka.

### **Literatura**

1. Burdekin F M, John D G, Payne P A , Locke C, Smith T A, Simm K and Dawson J L. Non-destructive methods for field inspection of embedded or encased high strength steel rods and cables - Phase I NCHRP Project 10 - 30(1), University of Manchester. 1986.
2. Gałęzia A, Mączak J, Radkowski S, Szczurowski K. A method of stress distribution assessment in prestressed structures, 7th International Seminar on Technical System Degradation Problems, Liptovský Mikuláš 200; 39-40
3. Gałęzia A, Mączak J, Radkowski S, Szczurowski K. współautorzy rozdziału 3.5.5: Amplitude modulation for diagnosis of the stste of prestressed structures w Rob POLDER i inni: COST ACTION 534. New materials, Systems, Methods and Concepts for Prestressed Concrete Structures. Final report COST Office, Brussels, 2009; 194÷202,
4. Gołaski L, Świt G. Acoustic non-destructive techniques as a new method for evaluation of damages in prestressed concrete structures: failure of concrete structures. Second Workshop of COST on NTD assessment and new systems in prestressed concrete structures, COST Action 534 New materials and systems for prestressed concrete structures. Kielce, 2005; 151 - 159..
5. Graff K F Wave motion in elastic solids. New York: Dover Publications. Inc. 1991
6. Jurkiewicz A, Micek P, Apostoł M, Grzybek D. O potrzebie monitorowania procesu sprężenia konstrukcji mostowych. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 2008; 1: 17-22
7. Krause M, Wiggenshauser H. Ultrasonic pulse echo technique for concrete elements using synthetic aperture. UOnline Application Workshop, NDTnet - May 1997, Vol.2 No.05.
8. MEMORANDUM OF UNDERSTANDING for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action 534: „New materials and systems for prestressed concrete structures” COST Office, Brussels, 2002;
9. Moulder J C, Kubovich M W, Uzal E, and James H R. Pulsed Eddy-Current Measurements of Corrosion-Induced Metal Loss: Theory and Experiment. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1995; 14: 2065 - 2072.
10. Radkowski S., Szczurowski K. Hilbert transform of vibroacoustic signal of prestressed structure as the basis of damage detection technique Dubrovnik: Proceedings of the Conference on Bridges. 2006; 1075 - 1082.

11. Runkiewicz L. Badania Konstrukcji Żelbetowych. Warszawa, Biuro Gamma. 2002
12. Sansalone M.J., Streett W.B. The Impact-Echo Method. The Online Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics, NDTnet 1998 February, Vol.3 No.2.
13. Suzin, A.M., and Donskoy, D.M. Nonlinear Vibro-Acoustic Nondestructive Testing Technique. NDT & E International Volume 34, Issue 4, 1 June 2001, 231-238