

OCENA STANU NAPRĘŻENIA I SPÓJNOŚCI BELKI ŻELBETOWEJ NA PODSTAWIE ZMIAN KSZTAŁTU KRZYWEJ SZKIELETOWEJ

Roman BARCZEWSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, fax (061) 6652307, e-mail: Roman.Barczewski@put.poznan.pl

Streszczenie

W artykule zarysowano metodę oszacowania naprężeń i detekcji utraty spójności struktur betonowych. Proponowana metoda oparta jest na analizie sygnału wibroakustycznego (drgań swobodnych struktury) i detekcji zmian nieliniowości testowanej struktury. Dla oceny stanu elementu betonowego stosowana jest analiza zmian kształtu krzywej szkieletowej jak i wyniki jej parametryzacji. Krzywa szkieletowa uzyskiwana jest na drodze eksperymentalnej, w wyniku wtórnego przetwarzania mapy czasowo-widmowej (tworzonej techniką STFT–AFC). Przeprowadzone wstępne eksperymenty potwierdziły, że zmiana kształtu krzywej szkieletowej jest współzmiennicza ze zmianą naprężeń w strukturze, oraz że zmiany jakościowe nieliniowości mogą być stosowane do detekcji utraty spójności struktur betonowych.

Słowa kluczowe: badanie struktur betonowych, detekcja i parametryzacja nieliniowości.

STRESS ASSESSMENT AND INTEGRITY LOSS DETECTION OF A FERROCONCRETE BEAM ON THE BASIS OF BACKBONE CURVE CHANGES

Summary

The paper outlined a stress assessment method and the method of integrity loss detection of concrete structures. The proposed method is based on vibroacoustic signal analysis (structure free vibration) and detection of nonlinearity changes of tested structures. For evaluation of concrete element conditions the shape changes as well as parameterization of the backbone curve can be used. The backbone curve is obtained on the experimental way as a results of the postprocessing of a time-frequency map (STFT –AFC techniques). Carried out primary experiments confirm that back bone curve changes are covariable with structure stress state and that qualitative changes of the nonlinearity can be used for integrity loss detection of concrete structures.

Keywords: concrete structures testing, nonlinearity detection and parameterization.

1. WPROWADZENIE

W artykule przedstawiono studium przypadku badania metodą wibroakustyczną (*WA*) stanu naprężenia i spójności belki żelbetowej poddanej próbie zginania. Ocenę stanu naprężenia prowadzono na podstawie analizy nieliniowości badanego obiektu. Zmianę charakteru nieliniowości badanej struktury (wywołaną zmianą stanu naprężenia) określano na podstawie kształtu krzywej szkieletowej (*backbone curve*).

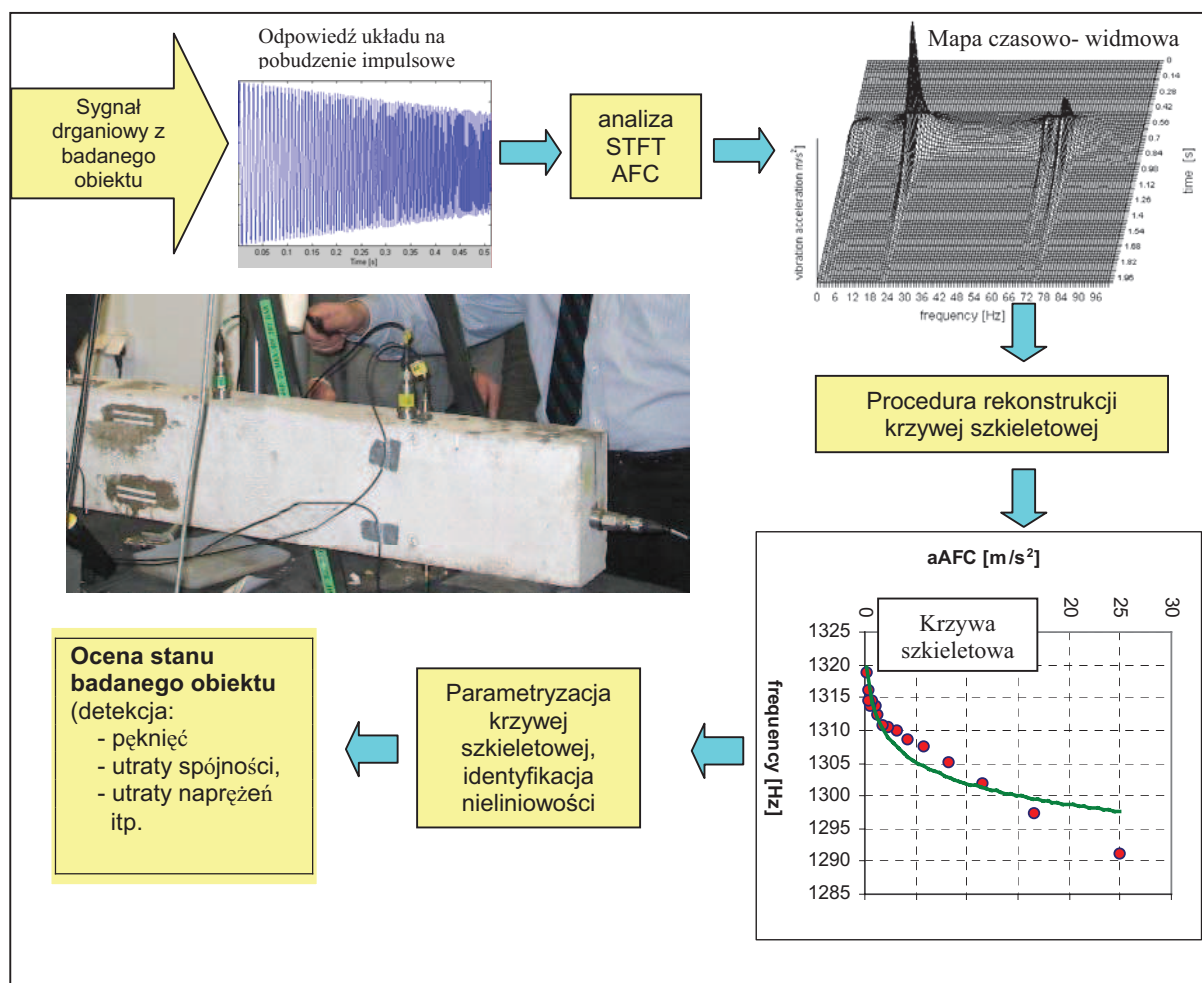
W dalszej części przedstawiono metodę eksperymentalnego odwzorowania krzywej szkieletowej, bazującą na analizie i cyfrowym przetwarzaniu (*postprocessing*) sygnału drganiowego belki pobudzonej wymuszeniem o charakterze impulsowym. Zamieszczono również przykładowe wyniki badań.

2. OCENA STANU STRUKTURY OPARTA NA ANALIZIE ZMIAN CHARAKTERU NIELINIOWOŚCI

Na podstawie przeprowadzonych do tej pory badań dla elementów stalowych wykazano, że *Krótkoczasowa Transformata Fouriera (STFT)* połączona z korekcją amplitudowo-częstotliwością (*Amplitude - Frequency Correction AFC*) [1,2], zastosowana do analizy drgań zanikających pobudzonej impulsowo struktury i dalsze cyfrowe przetwarzanie uzyskanych tą metoda sonogramów jest skuteczną metodą pozwalającą na rekonstrukcję krzywych szkieletowych. Odwzorowanie to można uzyskać dla każdego modu drgań w analizowanym paśmie częstotliwości. Na podstawie kształtu krzywej szkieletowej możliwe jest określenie nieliniowości (liniowości) badanej struktury. Prowadzone w ramach niniejszej pracy badania miały potwierdzić, w jakim stopniu obserwowane niewielkie zmiany charakteru nieliniowości (zmiany kształtu krzywej szkieletowej) mogą być

również zastosowane jako symptomy np.: zmian naprężeń, utraty spójności czy też rozwoju pęknięć struktury wykonanej z betonu, żelbetonu czy też betonu sprężonego.

Na rysunku 1 przedstawiono ideę przetwarzania sygnału wibroakustycznego pozwalającego na estymację krzywej szkieletowej na podstawie analizy sygnału drgań swobodnych i prowadzenie wielowariantowej oceny stanu badanych struktur.



Rys.1. Schemat przetwarzania sygnału WA oraz oceny stanu struktury na podstawie analizy nieliniowości z zastosowaniem STFT AFC oraz parametryzacji krzywych szkieletowych

3. KOREKCJA AFC SONOGRAMU I TWORZENIE KRZYWEJ SZKIELETOWEJ

Korekcja AFC sonogramu, uzyskiwanego metodą *STFT*, efektywnie zwiększa precyzję oszacowania częstotliwości i amplitud dla informatywnych składowych widma. Stosowanie AFC pozwala na: eliminację błędów estymacji amplitud dla istotnych składowych widm (wynikających z efektu palisadowego [5]) i około 50-krotne zwiększenie precyzji oszacowania częstotliwości w odniesieniu do rozdzielczości uzyskanej na drodze FFT.

Istotne składowe widma odpowiadające postaciom drgań własnych badanej belki, w przypadku, gdy układ jest nieliniowy, w trakcie wybrzmiewania (zmniejszania amplitudy po pobudzeniu impulsowym), zmieniają swoją częstotliwość. Zastosowanie STFT w klasycznej postaci, z uwagi na zazwyczaj niewystarczającą rozdzielczość

widma, nie pozwala na uchwycenie tak subtelnych zmian częstotliwości. Odrębnym problemem są błędy estymacji amplitud lokalnych maksimów wynikające z efektu palisadowego.

Korekcja AFC może być w zasadzie ograniczona do wąskich pasm częstotliwości sonogramu, w których występują lokalne maksima. Wzory (1) i (2) dotyczą korekcji AFC dla okna czasowego Hanna (Hanninga), w które wyposażona jest większość standardowych analizatorów widmowych. Okno Hanna zapewnia dobre parametry widma wejściowego dla dalszego przetwarzania (odległość od najbliższej wstęgi bocznej obwiedni widma $b=1,87 \Delta f$ oraz szczyt najbliższej wstęgi bocznej obwiedni widma na poziomie około -32 dB) [6]. W przypadku użycia tego typu okna do analizy STFT, uzasadnione jest stosowanie techniki *overlappingu* (zachodzenia okien czasowych) dla przetwarzanych sekwencji czasowych sygnału.

Po dokonaniu detekcji lokalnego maksimum h_m w składowym widmie sonogramu wyznaczany jest parametr μ , na podstawie którego dokonywana jest korekcja częstotliwości lokalnego maksimum zgodnie z zależnością:

$$f_k = (n + \mu) \cdot \Delta f \quad (1)$$

gdzie:

n - numer linii widmowej odpowiadającej lokalnemu maksimum,

Δf - rozdzielczość widma w Hz,

oraz

$$\mu = \begin{cases} 0.5 & \text{dla } (h_m = h_{m+1}) \wedge (h_m > h_{m-1}) \wedge (h_m > h_{m+2}) \\ \frac{2 - h_m / h_{m-1}}{1 + h_m / h_{m-1}} & \text{dla } (h_m > h_{m-1}) \wedge (h_m > h_{m+1}) \wedge (h_{m-1} > h_{m+1}) \\ \frac{2 - h_m / h_{m-1}}{1 + h_m / h_{m-1}} & \text{dla } (h_m > h_{m-1}) \wedge (h_m > h_{m+1}) \wedge (h_{m-1} < h_{m+1}) \\ 0 & \text{dla } (h_m > h_{m+1}) \wedge (h_m > h_{m-1}) \wedge (h_{m-1} = h_{m+1}) \end{cases}$$

Korekcja amplitudy dla okna Hanna opisana jest zależnością:

$$A_k = \begin{cases} h_m & \text{dla } \vartheta = 0 \\ h_m \cdot \left| \frac{(\pi \cdot \vartheta) \cdot (1 - \vartheta^2)}{\sin(\pi \cdot \vartheta)} \right| & \text{dla } \vartheta \leq 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie

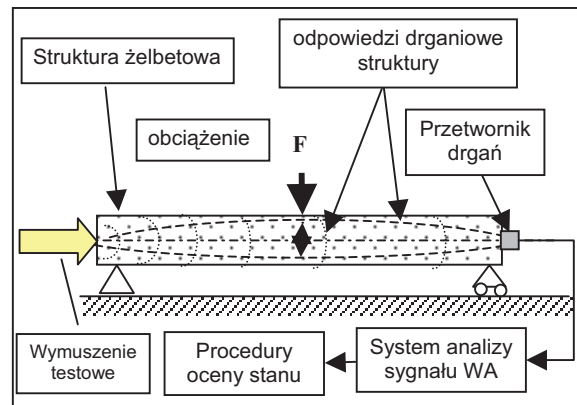
$$\vartheta = |\mu|$$

Wtórne przetwarzanie korygowanego sonogramu (mapy czasowo-widmowej) drgań swobodnych badanej struktury, pozwala uzyskać na drodze eksperymentalnej krzywe szkieletowe dla wszystkich obserwowanych postaci drgań. Krzywa szkieletowa tworzona jest w wyniku wtórnego przetwarzania korygowanego sonogramu drgań swobodnych badanego obiektu.

Pobudzenie do drgań obiektu powinno mieć charakter impulsowy. Od czasu trwania impulsu będzie zależny zakres częstotliwościowy odpowiedzi, a co za tym liczbą obserwowanych postaci drgań. Analizowana sekwencja powinna zawierać przynajmniej jedną pełną odpowiedź pobudzonego do drgań układu. Analizowanie większej liczby odpowiedzi badanej struktury daje dokładniejsze odwzorowanie krzywej szkieletowej. Efektem pierwszego etapu przetwarzania - STFT AFC, jest macierz, zawierająca jedynie składowe informatywne (skorygowane wartości amplitud i częstotliwości, odpowiadające lokalnym maksimum mapy czasowo-częstotliwościowej). Jest to optymalna postać danych dla dalszego ich przetwarzania. Poprzez redukcję parametru czasu można uzyskać krzywą szkieletową dla każdej postaci drgań osobno, lub odwzorowanie globalne dla wszystkich postaci w analizowanym paśmie częstotliwości.

4. OBIEKT BADAŃ ORAZ WARUNKI PROWADZENIA EKSPERYMENTU

Celem badań było określenie zmian ilościowych i jakościowych w sygnale WA oraz zmian kształtu krzywej szkieletowej powodowanych zmianą obciążenia (stanu naprężeń) belki żelbetowej i utratą jej spójności. Obiektem badań była belka żelbetowa o wymiarach 102 x 200 x 1510 mm, podparta symetrycznie i obciążana siłą poprzeczną. Analizę prowadzono dla obciążeń poprzecznych siłą $F = 15, 30, 45$ [kN], dla których nie doszło jeszcze do utraty spójności betonu (pęknięcia) oraz dla obciążenia $F = 60$ [kN], przy którym zaobserwowano pęknięcie belki.



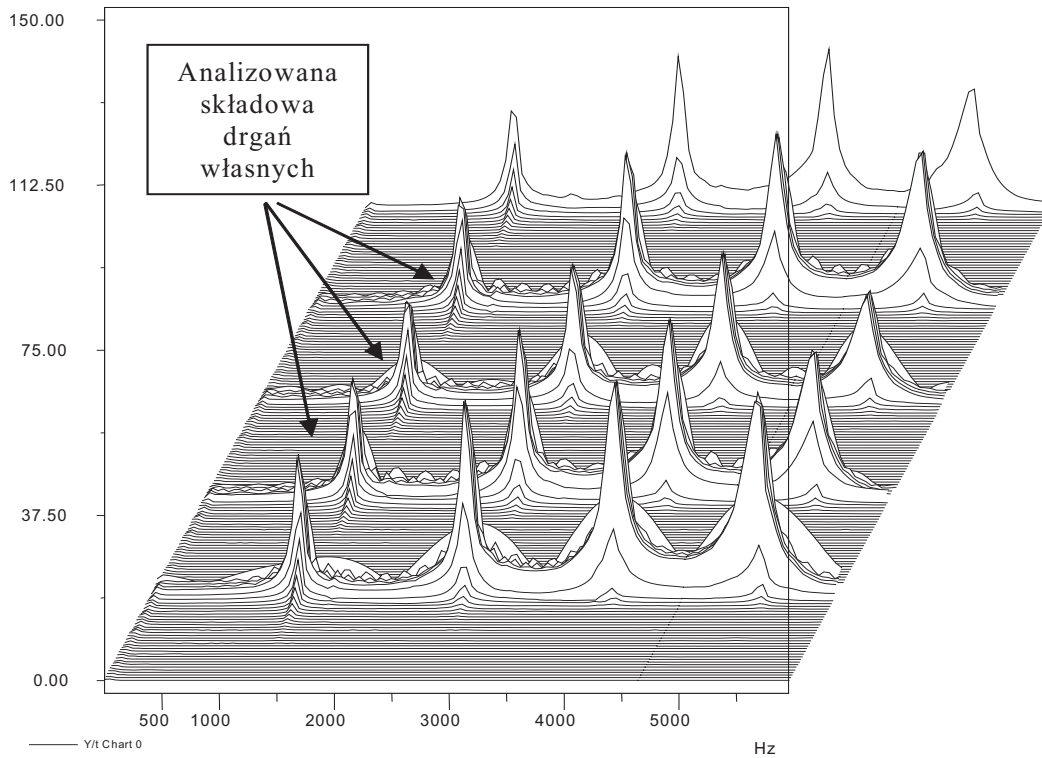
Rys.2. Obiekt badań oraz rozmieszczenie punktów wymuszenia i rejestracji drgań

Przy wyborze sygnału reprezentatywnego dla prowadzenia badań i analiz przyjęto następujące kryteria: łatwości pobudzenia struktury do drgań, małe tłumienie dla rozpatrywanej składowej drgań, powtarzalność odpowiedzi drganiowej i potencjalna możliwość detekcji nieliniowości.

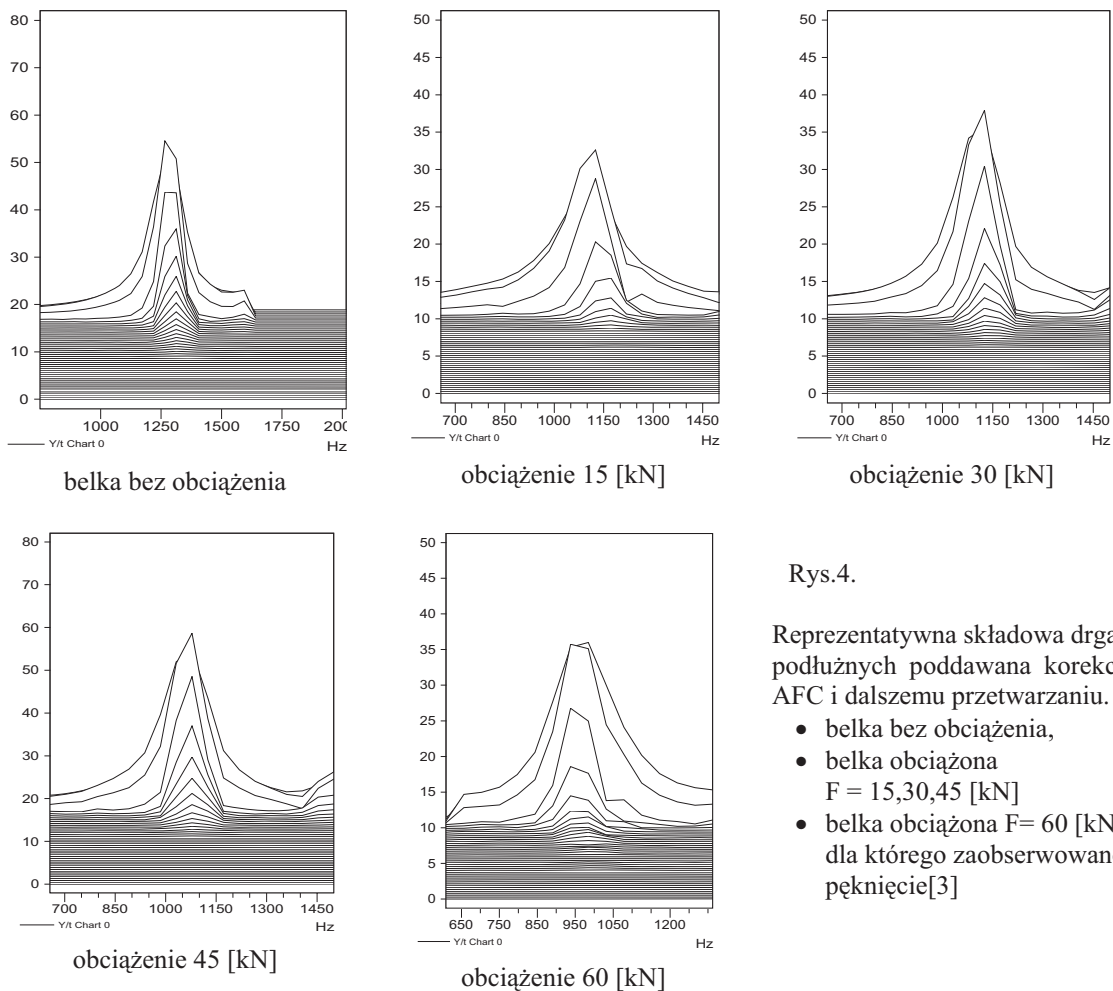
5. WYNIKI BADAŃ

Jako sygnał reprezentatywny wybrano odpowiedź struktury - drgania podłużne, rejestrowane w punkcie zlokalizowanym na powierzchni czołowej belki (rys. 2). Kierując się przyjętymi założeniami do dalszej szczegółowej analizy wybrano składową drgań występującą w zakresie częstotliwości 950 – 1350 Hz.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładową postać mapy czasowo-widmowej (STFT) dla rozpatrywanego sygnału. Na przedstawionych fragmentach map T-F (rys. 4) widoczna jest zmiana częstotliwości drgań własnych wraz ze zmianą amplitudy. Jak widać klasyczna analiza STFT z uwagi na ograniczoną rozdzielczość oraz błędy estymacji amplitudy wynikające z efektu palisadowego nie pozwala na precyzyjną analizę tych zmian. Zastosowanie korekcji AFC (STFT-AFC) oraz dalszego przetwarzania pozwoliło wyznaczyć krzywe szkieletowe dla rozpatrywanych przypadków.



Rys.3. Sonogram STFT przyspieszeń drgań podłużnych [w m/s^2]- odpowiedzi badanej struktury na pobudzenie o charakterze impulsowym [3]



Rys.4.

Reprezentatywna składowa drgań podłużnych poddawana korekcji AFC i dalszemu przetworzeniu.

- belka bez obciążenia,
- belka obciążona $F = 15,30,45$ [kN]
- belka obciążona $F = 60$ [kN], dla którego zaobserwowano pęknięcie[3]

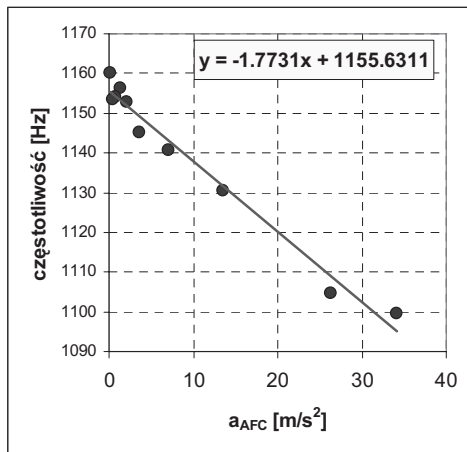
Na rysunku 5 zamieszczono przykładowe postacie krzywych szkieletowych - charakterystyki częstotliwościowo-amplitudowe $F-A$ (w układzie odwróconych osi). Dla belki bez pęknięcia zamieszczono równanie opisujące z pewnym przybliżeniem charakter krzywej szkieletowej (w pierwszym podejściu zastosowano interpolację liniową). Dla oceny zmian ilościowych zachodzących w krzywych szkieletowych przeprowadzono ich wstępną parametryzację. Zdefiniowano w tym celu wskaźnik UWN - unormowany wskaźnik nieliniowości:

$$UWN = \frac{|f_{(0)} - f_{(A_0)}|}{f_{(0)}} \cdot 100\% \quad (3)$$

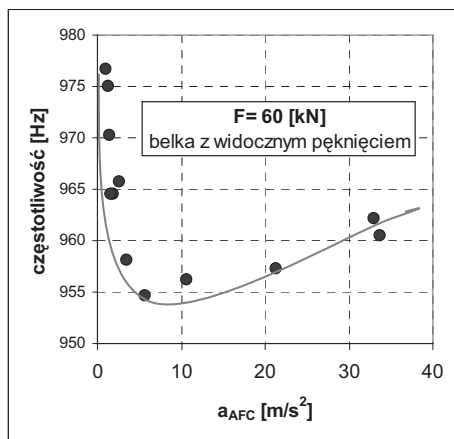
gdzie: $f_{(0)}$ - częstotliwość drgań własnych dla amplitudy $A \rightarrow 0$,

$f_{(A_0)}$ - częstotliwość drgań własnych dla amplitudy odniesienia A_0 .

a)

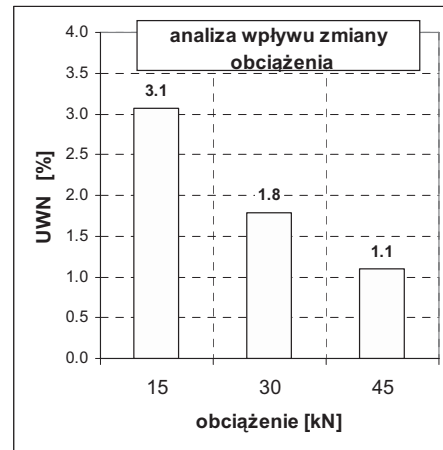


b)

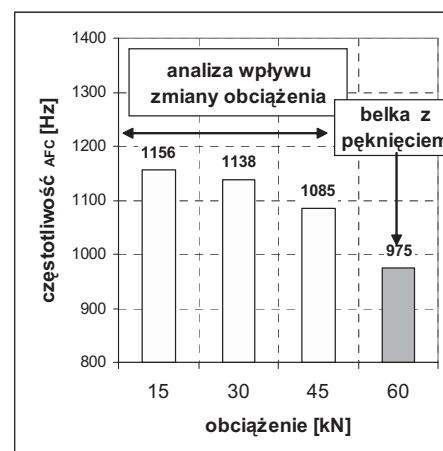


Rys.5. Przykładowe kształty krzywych szkieletowych (w odwróconym układzie osi)
a) belka bez pęknięć, b) belka z pęknięciem [3]

Dla analizy porównawczej (rys.6), przyjęto wartość amplitudy odniesienia $A_0 = 20 \text{ m/s}^2$. Parametrem pozwalającym na różnicowanie stanu jest także zmiana częstotliwości A_0 . Zestawienie uzyskanych wyników zilustrowano na rysunku 7.



Rys. 6. Wyniki parametryzacji krzywych szkieletowych - wartości wskaźnika UWN [3]



Rys. 7. Wyniki parametryzacji krzywych szkieletowych - wartości częstotliwości f_{AFC} drgań własnych dla amplitudy drgań $A \rightarrow 0$ [3]

5. WNIOSKI Z BADAŃ

Wyniki przeprowadzonych badań wstępnych wykazały możliwość oceny stanu belki żelbetowej na podstawie analizy i parametryzacji krzywej szkieletowej.

Kształt krzywej szkieletowej dla poszczególnych stanów belki wykazywał wyraźne zmiany jakościowe: Dla belki bez obciążenia krzywa szkieletowa miała charakter paraboidalny, dla belki obciążanej przyjmowała formę zbliżoną do prostej (charakter liniowy), a dla belki z pęknięciem kształt krzywej szkieletowej przyjął postać hiperboidalną. W zakresie badanych obciążeń 15-45 kN, kiedy nie obserwowano pęknięcia belki, wzrost obciążenia i zmiana stanu naprężeń belki powodowała spadek zdefiniowanego wskaźnika UWN . Można przyjąć, że w badanym zakresie obciążeń zależność ta była liniowa

Dalsze badania będą ukierunkowane na doskonalenie metod parametryzacji krzywej szkieletowej oraz określenie parametrów stanu struktur wpływających na zmianę charakteru nieliniowości.

Literatura

- [1] Barczewski R., AFC - Metoda korekcji widma amplitudowego, Kongres Diagnostyki Technicznej KDT '96. Materiały Tom 2 Gdańsk 17-20.09.1996 1996 str., 49-54.
- [2] Barczewski R., Application of the Short Time Fourier Transform (STFT) with AFC Correction to Non-linear System Free Vibration Signal Analysis, Vibration in Physical Systems XIX th Symposium, Poznań-Błażejewko May 22-25.2000.
- [3] Barczewski R., Analiza wpływu obciążenia (stanu naprężenia) belki żelbetowej na kształt krzywych szkieletowych uzyskanych na drodze postprocessingu wyników STFT-AFC sygnału drganiowego, Politechnika Poznańska, Raport LDS 07/2004.
- [4] Barczewski R., Stress assessment and integrity loss detection of a concrete beam on the basis of backbone curve changes analysis, Proceedings Workshop of COST on NTD Assessment and New Systems in prestressed concrete Structures ,NRI Radom -2005,
- [5] Gade S., Herlufsen H., Use of weighting functions in DFT/FFT analysis (part II), Technical review No 4, 1987; Bruel&Kjær Narum Denmark.
- [6] Geckinli, Nezh C., Yavuz D., Discrete Fourier Transformation and its application to power spectra estimation, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York 1983.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy 136/E-362/SPB/COST/TO7/DWM11 w ramach COST Action 534 „New materials and systems for prestressed concrete structures”.- Use of the vibroacoustic signals for diagnosis of defect development in prestressed concrete structures



Dr inż.

Roman BARCZEWSKI jest adiunktem oraz kierownikiem Laboratorium Diagnostyki Systemów w Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej. Specjalizacja: diagnostyka, wibroakustyka maszyn i środowiska badania drgań i hałasu,

techniki i diagnostycznie zorientowane metody cyfrowego przetwarzania sygnałów WA; samouczące i samoorganizujące systemy diagnostyczne. Członek Zespołu Ergonomii - PAN/O Poznań, Członek Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. Członek KT PKN nr 158 ds. Bezpieczeństwa maszyn i ergonomii.