

DIAGNOZOWANIE UKŁADÓW NA PODSTAWIE ANALIZY ZMIAN KRZYWEJ SZKIELETOWEJ UZYSKIWANEJ METODĄ STFT-AFC

Roman BARCZEWSKI

Politechnika Poznańska - Instytut Mechaniki Stosowanej
60-965 Poznań ul. Piotrowo 3, tel: 6652390, e-mail: roman.barczewski@put.poznan.pl

1. Wprowadzenie

Można postawić twierdzenie, że zdecydowana większość układów rzeczywistych to układy nieliniowe, które cechy układu liniowego zachowują jedynie w przypadku drgań o małych amplitudach. Miarą, która pozwala scharakteryzować układ w tym aspekcie jest kształt krzywej szkieletowej. Identyfikacja, a następnie analiza zmian nieliniowości na podstawie kształtu krzywej szkieletowej, układu/podukładu badanego obiektu, w czasie jego życia, może stanowić nową metodę diagnozowania. Metoda ta byłaby szczególnie przydatna do diagnozowania obiektów zmieniających swe parametry na skutek np. korozji, erozji, zmęczenia materiału, zmiany struktury itp.

Dla powyższego obszaru zastosowań diagnostycznych niezbędne jest opracowanie prostej i skutecznej metody identyfikacji nieliniowości układów. Stosowane metody identyfikacji układów jak: test harmoniczny, impulsowy i szumowy, są w zasadzie odpowiednie do analizy układów liniowych.

Wprawdzie możliwe jest uzyskanie przybliżonego kształtu krzywej szkieletowej na podstawie testu harmonicznego wykonywanego dwukrotnie: sygnałem sinusoidalnym o rosnącej, a następnie malejącej częstotliwości, lecz uzyskany na tej drodze wynik nie pozwala na analizowanie niekiedy subtelnych zmian zachodzących w układzie.

2. Zastosowanie analizy czasowo-widmowej do identyfikacji nieliniowości.

Zdecydowanie lepszym sposobem jest pozyskiwanie krzywej szkieletowej na podstawie analizy drgań swobodnych układu. W przypadku analizy drgań zanikających układu nieliniowego mamy do czynienia z sygnałem niestacjonarnym zarówno w ujęciu amplitudowym jak i częstotliwościowym. Do analizy tego typu sygnałów konieczne jest zastosowanie w pierwszym etapie jednej z metod analizy czasowo-częstotliwościowej [10], w drugim etapie wtórnego przetwarzania, pozwalającego na eliminację parametru czasu i uzyskanie odwzorowania zmienności częstotliwości w funkcji amplitudy dla każdej obserwowanych postaci drgań.

Do stosowanych metod analizy czasowo-częstotliwościowej można zaliczyć: Krótkoczasową Transformację Fouriera (*Short Time Fourier Transform - STFT*), Transformację Wavelet (*Wavelet Transform - WT*) oraz Dystrybucję Wigner Ville (*Wigner Ville Distribution - WVD*). Analizę porównawczą powyższych metod można znaleźć w [9,12]. W literaturze można znaleźć kilka prac, w których podejmowane były próby uzyskania krzywych szkieletowych na drodze wtórnego przetwarzania wyników Transformaty Wavelet [14] i Dystrybucji Wigner Ville.

Krótkoczasowa Transformata Fouriera mimo, iż jest metodą najprostszą, dającą łatwe do interpretacji wyniki, w swej klasycznej formie nie znalazła tu zastosowania z uwagi na ograniczenia związane z niemożnością uzyskania wystarczającej rozdzielczości jednocześnie w dziedzinie częstotliwości i czasu. Dopiero zastosowanie metody korekcji amplitudo-częstotliwościowej AFC do wyników STFT [1,2] pozwoliło na podjęcie prób estymacji krzywej szkieletowej tą drogą [3,5].

3. Krótkoczasowa Transformata Fouriera STFT

Krótkoczasowa Transformata Fouriera polega, w pierwszej fazie na dokonaniu podziału sygnału wejściowego na mniejsze segmenty, w których może być on traktowany jako quasi stacjonarny, a następnie przetwarzanie algorytmem FFT poszczególnych segmentów danych. Krótkoczasową Transformację Fouriera zdefiniowano jako:

$$STFT[x_w(t, \tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} w(t, \tau) x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

gdzie :

- $x(t)$ - przebieg czasowy reprezentujący sygnał wejściowy poddawany analizie,
- $w(t, \tau)$ - funkcja okna czasowego (funkcja wagowa),
- τ - pozycja okna czasowego w dziedzinie czasu,
- f - częstotliwość ; t - czas,
- $x_w(t, \tau) = w(t, \tau) x(t)$ - oknowany sygnał wejściowy.

Zestawienie obok siebie uzyskanych w ten sposób widm daje w rezultacie mapę czasowo-widmową analizowanego procesu. W praktyce stosowana jest

technika ruchomego okna [10,13]. Przesuwana w dziedzinie czasu funkcja wagowa $w(t, \tau)$ realizuje ekstrakcję z sygnału wejściowego kolejnych segmentów danych do analizy FFT.

4. Korekcja AFC i optymalizacja parametrów przetwarzania sygnału.

Ideę korekcji amplitudowo częstotliwościowej AFC opisano w [1,2]. Zastosowanie jej do wyników analizy STFT pozwala na: eliminację błędów estymacji amplitud istotnych składowych widma, wynikających z efektu palisadowego i około 50-krotne zwiększenie precyzji oszacowania częstotliwości dla istotnych składowych, w odniesieniu do rozdzielczości widma uzyskanego na drodze FFT. W pracach [4,7] rozwinięto standardową metodę korekcji - opartą na detekcji lokalnych maksimów widma o wersje rozszerzoną - opartą o detekcję lokalnych maksimów oraz uwzględniającą lokalne plateau. W pracy [8] analizowano możliwości zastosowania różnych funkcji okna czasowego oraz określono dla nich formuły korekcji widmowej.

Wynik *Krótkoczasowej Transformaty Fouriera STFT* otrzymujemy (w formie dyskretnej) jako macierz H (o rozmiarze $k \times l$), zawierającą k widm krótkoczasowych, gdzie l określa liczbę elementów widma (linii widmowych). Zidentyfikowany jako lokalne maksimum element o numerze porządkowym m w j -tym widmie krótkoczasowym jest brany jako punkt korekcji ($j = 1, 2, \dots, k, m = 1, 2, \dots, l$).

Liczba widm krótkoczasowych k jest równa liczbie iteracji STFT i zależy od: całkowitej liczby próbek M sygnału wejściowego poddanego analizie STFT, rozmiaru segmentu danych - N , odpowiadającego długości sekwencji czasowej stosowanej w analizie STFT oraz kroku przesunięcia czasowego segmentu (s).

$$k = \text{Ent}\left(\frac{M - N}{s}\right) + 1 \quad (2)$$

Z zależności (2) wynika, że nawet jeżeli będzie przyjęty minimalny krok przesunięcia segmentu danych ($s=1$), równy interwałowi czasu stosowanego w procesie akwizycji, to i tak liczba iteracji będzie mniejsza od liczby próbek sygnału wejściowego M . W przypadku stosowania okna czasowego Hanninga reprezentacja wyniku w postaci widma krótkoczasowego otrzymanego dla każdego segmentu danych, będzie najbardziej adekwatna dla danych zawartych w środkowej części segmentu. Oznacza to, że ten rodzaj analizy pozwoli na sekwencyjną prezentację składu widmowego sygnału wejściowego dla chwil odpowiadających pozycjom środka okna czyli prób-

kom od $M/2$ do $N-M/2$ sygnału wejściowego i przesunięcia czasowego s . Stosowanie dużej liczby elementów w segmencie danych N do analizy STFT zwiększy rozdzielczość wyniku w dziedzinie częstotliwości, lecz jednocześnie zmniejszy rozdzielczość analizy w dziedzinie czasu.

Z powyższych powodów wynika konieczność optymalizacji rozmiaru segmentu danych N stosowanego w analizie czasowo-widmowej. Minimalna długość okna czasowego (t_w), a tym samym liczba próbek N w segmencie, jest zdeterminowana przez: częstotliwość istotnej składowej widma f_i (posiadającej z punktu widzenia analizowanego procesu znaczącą amplitudę), w zasadzie zaś jej pozycję w zakresie niskich częstotliwości oraz przez typ zastosowanego okna czasowego.

Dla funkcji wagowej Hanninga i korekcji AFC, segment danych powinien zawierać minimum dwa okresy sygnału (istotnej składowej o najniższej częstotliwości). Uwzględniając wszystkie powyższe wymogi można określić optymalną liczbę próbek w segmencie danych dla analizy STFT:

$$N \geq \frac{2 \cdot f_s}{f_i} \quad (3)$$

gdzie: f_s - częstotliwość próbkowania sygnału wejściowego.

Przyjęcie możliwie najmniejszego segmentu danych analizy STFT, powodujące zmniejszenie rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości, będzie w tym przypadku kompensowane poprzez korekcję AFC. Rozmiar macierzy wynikowej H^c , zależy od współczynnika „ z ” (*pseudo zoom factor*) określającego krotność zwiększenia rozdzielczości widma na drodze korekcji AFC, i wynosi $(k \times l^c)$, gdzie k - jest liczbą widm krótkoczasowych, l^c określa liczbę przedziałów częstotliwości: $l^c = l \cdot z$. Amplitudę skorygowanego elementu widma można obliczyć na podstawie zależności:

$$h_{j,m}^c = h_{j,m} \cdot a \quad (4)$$

przy czym:

$$a = \left| \frac{(\pi \cdot \vartheta) \cdot (1 - (\vartheta)^2)}{\sin(\pi \cdot \vartheta)} \right|; \quad \vartheta = |\mu|$$

gdzie:

μ jest współczynnikiem który można wyznaczyć w zależności od przyjętego rodzaju korekcji (podstawowej lub rozszerzonej) wg zależności opisanych szczegółowo w [2,7].

Pozycję skorygowanych składowych w macierzy wynikowej wyznacza się na podstawie zależności:

$$m^c = Ent\left(\left(m + \mu\right) \cdot z + 0.5\right) \quad (5)$$

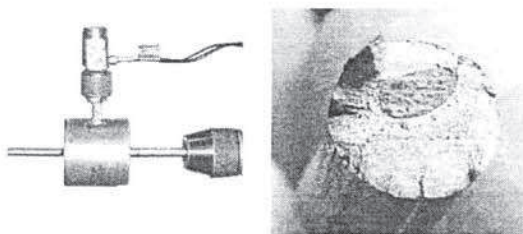
gdzie: m - numer elementu widma odpowiadający lokalnemu maksimum,
 $Ent()$ - operator: część całkowita $z()$,
 μ - współczynnik ułamkowy (korekcyjny) oszacowania częstotliwości.

5. Metoda uzyskiwania krzywej szkieletowej

Krzywa szkieletowa tworzona jest w wyniku postprocesingu korygowanego spektrogramu drgań swobodnych (zanikających) badanego obiektu. Pobudzenie do drgań obiektu powinno mieć charakter impulsowy. Od czasu trwania impulsu będzie zależał zakres częstotliwościowy odpowiedzi, a co za tym liczbą obserwowanych postaci drgań. Analizowana sekwencja powinna zawierać jedną pełną odpowiedź pobudzonego do drgań układu. Efektem pierwszego etapu przetwarzania - STFT AFC, jest macierz wynikowa H^c w formie skompresowanej, zawierająca jedynie składowe informatywne (skorygowane wartości amplitud i częstotliwości odpowiadające lokalnym maksimum mapy czasowo częstotliwościowej). Jest to optymalna postać danych do dalszego ich przetwarzania. Poprzez redukcję parametru czasu w zależności od zastosowanego algorytmu i potrzeb można uzyskać odwzorowanie a-f (amplituda-częstotliwość) lub f-a (częstotliwość-amplituda) dla każdej postaci drgań osobno, lub odwzorowanie globalne dla wszystkich postaci jednocześnie.

6. Przykład zastosowania diagnostycznego.

Zarysowaną powyżej metodę zweryfikowano eksperymentalnie. Obiektem badań był pręt stalowy z zamocowaną na nim masą skupioną, który poddano próbie zmęczeniowej.

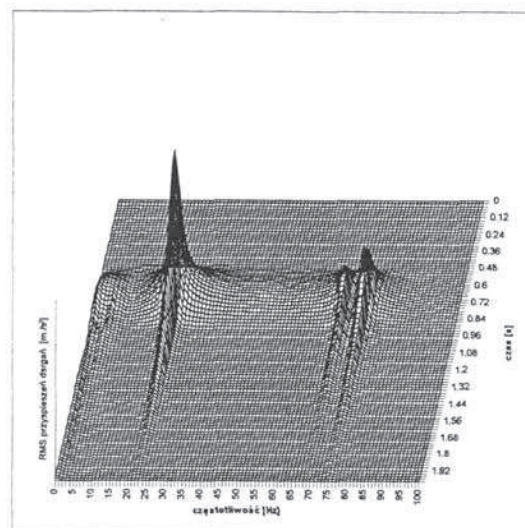


Rys.1. Obiekt badań - pręt stalowy oraz wynik próby zmęczeniowej

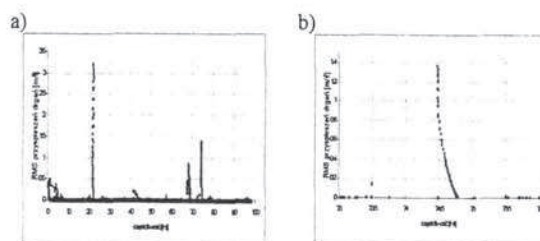
Co 1500 cykli wykonywano analizę drgań swobodnych układu i wyznaczano krzywe szkieletowe. Na rysunku 2 zamieszczono postać mapy czasowo - częstotliwościowej (STFT bez korekcji AFC) wykonaną przed rozpoczęciem próby zmęczeniowej.

Rozdzielczość mapy A-F w dziedzinie czasu 0.02s, w dziedzinie częstotliwości 1 Hz, liczba linii widmowych 100, liczba widm 100. Widoczne są wyraźnie trzy częstotliwości własne układu oraz faza pobudzenia i wybrzmiewania drgań.

Na rysunku 3a zamieszczono przykładowy wynik próby odwzorowania krzywej szkieletowej bez zastosowania korekcji AFC. Z uwagi na zbyt małą rozdzielczość nie jest możliwe zaobserwowanie nieliniowości, a tym bardziej subtelnych zmian kształtu krzywej szkieletowej. Rysunek 3b ukazuje zmianę jakościową wyniku analizy po zastosowaniu korekcji AFC, do tych samych danych wejściowych. Mimo, że rozdzielczość analizy STFT była wciąż taka sama (1 Hz), to zastosowanie korekcji AFC umożliwiło odwzorowanie krzywej szkieletowej z dokładnością ok. 0.02 Hz. (zoom w otoczeniu trzeciej częstotliwości własnej ok. 74.5 Hz.)



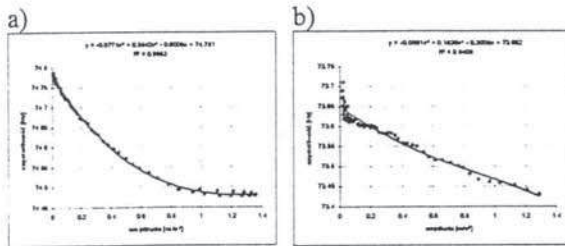
Rys. 2. Postać mapy czasowo -widmowej drgań swobodnych obiektu badań przed rozpoczęciem próby zmęczeniowej (STFT bez korekcji AFC).



Rys.3. Próba odwzorowania krzywej szkieletowej a) bez korekcji AFC b) z korekcją - zoom w otoczeniu trzeciej częstotliwości własnej.

Na rysunku 4 przedstawiono postać krzywej szkieletowej w trakcie próby zmęczeniowej próbki. Po wykonaniu 50% cykli do pęknięcia próbki wyraźnie widać zmianę kształtu krzywej szkieletowej, jak i

obniżenie się średnio o ok. 1 Hz częstotliwości drgań własnych. Odzworowanie krzywej szkieletowej ma postać dyskretną. W celu uzyskania zależności funkcyjnej i parametryzacji krzywej modelowej, po zamianie osi można dokonać interpolacji np. wielomianem, a jego dopasowanie oszacować na podstawie współczynnika determinacji R^2 .



Rys.4. Interpolacja wielomianem (3 stopnia) krzywej szkieletowej trzeciej częstotliwości własnej badanej próbki; a) przed rozpoczęciem próby zmęczeniowej b) po wykonaniu przez próbkę 4500 cykli.

7. Podsumowanie

W pracy przedstawiono zarys metody uzyskiwania krzywych szkieletowych układów na podstawie analizy drgań swobodnych z wykorzystaniem STFT-AFC. Przeprowadzony eksperyment potwierdził możliwość wykorzystania analizy nieliniowości układu do celów diagnostycznych. Dalsze prace w tym obszarze będą związane z optymalizacją przetwarzania sygnału, automatyzacją procesu parametryzacji krzywych szkieletowych oraz opracowaniem metody identyfikacji typów nieliniowości [11]. Będą prowadzone badania weryfikacyjne mające na celu określenie klasy obiektów, co do których powyższa metoda diagnozowania znajdzie zastosowanie.

8. Literatura

1. Barczewski R.: Amplitude and Frequency Corrected Spectrum (AFCS) a new presentation form of spectral analysis results. *Vibration in Physical Systems - XVII Symposium Poznań - Błażejewko 1996*, pp 70-71.
2. Barczewski R.: AFC - Metoda korekcji widma amplitudowego. *Kongres Diagnostyki Technicznej KDT '96. Materiały Tom 2 Gdańsk 17-20.09.1996 1996 str.*, 49-54
3. Barczewski R.: Application of the Short Time Fourier Transform (STFT) with Amplitude and Frequency Correction (AFC) to non-linear system free vibration signal analysis. Report: CRI Universität Hannover - November 1997.
4. Barczewski R.: Implementation of the Short Time Fourier Transform (STFT) with Amplitude and Frequency Correction (AFC) to the *MATLAB* environment Report: CRI Universität Hannover - DFG - December 1998.
5. Barczewski R.: Application of the Short Time Fourier Transform (STFT) with AFC Correction to Non-linear Lystem Free Vibration Signal Analysis, *Vibration in Physical Systems XIX th Symposium, Poznań - Błażejewko May 22-25.2000*.
6. Barczewski R.: Metody analizy czasowo - widmowej. Analiza porównawcza. Raport z badań IMS PP TB-21-881/99 DS, Poznań 1999.
7. Barczewski R.: Implementacja numeryczna Krótkoczasowej Transformaty Fouriera (STFT) z korekcją AFC. Raport z badań IMS PP PB-21-884/99 BW, Poznań 1999.
8. Barczewski R.: Zagadnienia korekcji amplitudowo-częstotliwościowej (AFC) wyników analizy widmowej uzyskiwanych na drodze Szybkiej Transformacji Fouriera (FFT). Raport z badań IMS PP TB-21-881/99 DS tem. pref., Poznań 1999.
9. Barczewski R., Analiza nieliniowości z zastosowaniem STFT-AFC jako metoda diagnozowania. *Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej 2000, Warszawa 2000*.
10. Shie Qian, Dapang Chen: *Joint Time - Frequency analizys, Methods and Applications*, Prentice Hall PTR 1996 Asimon &Schuster Company.
11. Feldmann M.: Non- linear system vibration analysis using Hilbert Transform I Free vibration analysis method „FREEVIB”, *Mechanical System and Signal Processing 1994*, pp. 119-127.
12. Newland D.E.: *Practical Signal Analysis : Do Wavelets make any difference?*. Proceedings of DTC'97 1997 ASME Design Engineering Technical Conference , September 14-17,1997 Sacramento, California.
13. Staszewski W.J., Tomlinson G.R.: Local tooth fault detection in gearboxes using a moving window procedure., *Mechanical Systems and Signal Processing* , May 1997, pp.331-350.
14. Staszewski W.J.: Identification of non-linear systems using multi-scale ridges and skeletons of Wavelet Transform, *Journal of Sound an Vibration*, 1998, 214 pp. 639-658.

Pracę realizowano częściowo w ramach współpracy pomiędzy Instytutem Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej a Curt Risch Institute - Universität Hannover (Niemcy), oraz w ramach tematów TB-21-881/99 DS i PB-21-884/99 BW.