



REDUKCJA DRGAŃ PŁYTY KOŁOWEJ PRZY POMOCY ELEMENTÓW PZT I REGULATORA TYPU FEEDFORWARD

Vibration suppression of circular plate via piezoelectric actuators
and feedforward controller

Lucyna Leniowska, Stanisław Szela

Instytut Techniki, Uniwersytet Rzeszowski
lteniow@atena.univ.rzeszow.pl

STRESZCZENIE

In this paper, the *feedforward* vibration control of a clamped circular plate is presented. The plate is excited on one side by a uniform periodic force provided by a low frequency loudspeaker. The axially-symmetrical vibrations of the plate are measured by the application of several pairs of strain sensors located along the plate radius. The mathematical model of the plate was obtained on a base of registration of the system response on fixed excitation (chirp signal) in 200÷400 Hz bandwidth. Then, the obtained model is used to develop the *feedforward* control algorithm for vibration cancellation. Results from laboratory experiments show the high effectiveness of minimizing the plate vibrations for chosen bandwidth.

1. WSTĘP

Nowoczesne materiały piezoceramiczne PZT (*lead zirconate titanate*), są ostatnio często stosowane w układach aktywnej redukcji drgań i hałasu, zastępując coraz częściej tradycyjne sensory, a przede wszystkim elektromechaniczne urządzenia wykonawcze. Badania prowadzone w ciągu ostatnich lat w wielu ośrodkach na świecie wykazały, że materiały te, z uwagi na znaczną sprężystość, znikomą wagę oraz szeroki zakres częstotliwości, stwarzają nowe możliwości w dziedzinie konstruowania takich układów.

Drugą kwestią, którą należy rozstrzygnąć wybierając aktywną metodę redukcji drgań jest rodzaj regulatora. Często zdarza się, że zakłócenia, które pobudzają do drgań układy mechaniczne są znane, lub mogą być zmierzone. W takiej sytuacji można zastosować metodę aktywnego redukowania drgań z regulatorem typu *feedforward*. Jej główną zaletą jest stosunkowo prosty algorytm wyznaczania transmitancji regulatora, jak również duża efektywność kompensacji zmian wielkości wyjściowej, chociaż wynik ten uzyskuje się zwykle dla wąskiego zakresu zmienności zakłóceń.

W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalne redukcji drgań płyty kołowej utwierdzonej na brzegu, przy pomocy regulatora typu *feedforward*. Stosując metodę identyfikacji parametrycznej, na podstawie odpowiedzi układu na wymuszenie sygnałem

chirp, otrzymano dyskretne transmitancje obiektu i zakłócenia. Transmitancje te wykorzystano do zaprojektowania regulatora typu *feedforward*, kompensującego drgania płyty. Poprawność przeprowadzonych obliczeń zweryfikowano dokonując implementacji wyznaczonego sterowania na stanowisku badawczym.

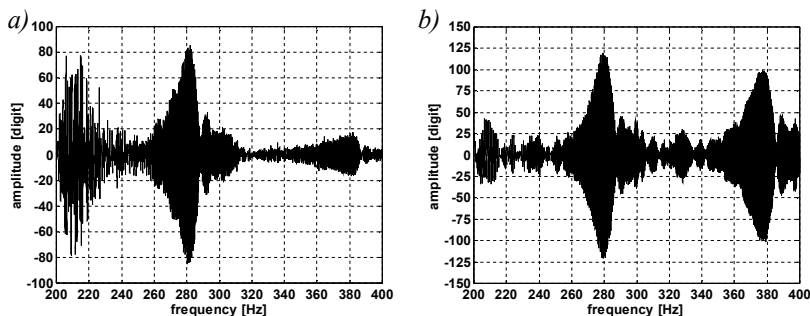
2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Obiektem badań jest cienka płyta kołowa, utwierdzona na obwodzie. Na płycie naklejono obustronnie promieniście cztery pary czujników tensometrycznych oraz obustronnie, centrycznie, jedną parę piezoelektrycznych ceramicznych elementów wykonawczych PZT. Płyta została pobudzona do drgań przy pomocy głośnika pracującego w zakresie niskich częstotliwości. Zarówno sensory jak i elementy wykonawcze sprzężono z komputerem PC, wyposażonym w kartę I/O, zawierającą cztery przetworniki DAC (12 bitowe) i szesnaście przetworników ADC (12 bitowe) [1].

Celem badań była redukcja drgań płyty w zakresie niskich częstotliwości przy pomocy algorytmu *feedforward*. W badaniach założono, że drgania płyty mają charakter osiowosymetryczny, a poszukiwany model systemu ma charakter liniowy.

2.1 Identyfikacja obiektu sterowania

W celu uzyskania matematycznego opisu obiektu sterowania przeprowadzono jego identyfikację. Jako wymuszenie zastosowano sygnał *chirp* o liniowo narastającej częstotliwości w zakresie 200÷400 Hz. Zarejestrowane odpowiedzi układu przedstawiono na rys. 2.1.



2.1 Odpowiedzi układu: a) przy pobudzeniu głośnikiem, b) przy pobudzeniu PZT.

Model matematyczny obiektu otrzymano stosując metodę błędu wyjścia (*Output Error Method*) z parametrami (1,3,0). Estymata odpowiedzi układu przyjmuje wówczas postać [2]

$$\hat{y}_k = z^{-d} \frac{\hat{B}(z^{-1})}{\hat{F}(z^{-1})} u_k, \quad (1)$$

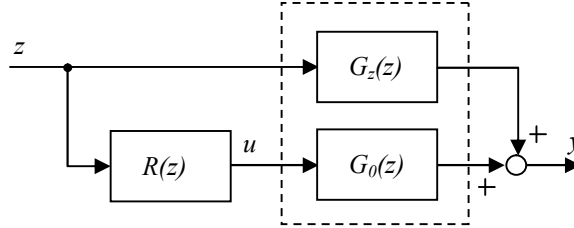
gdzie u_k – wymuszenie, $\hat{B}(z^{-1})$ i $\hat{F}(z^{-1})$ – estymaty wielomianów transmitancji obiektu, d – opóźnienie pomiędzy wejściem a wyjściem obiektu. Dla zakłócenia o częstotliwości $f = 270\text{Hz} \pm 10\%$ i częstotliwości próbkowania $f_p = 10\text{ kHz}$ otrzymano transmitancję obiektu (2) i transmitancję zakłócenia (3).

$$G_o(z) = \frac{0.000293521023394z^3}{z^3 - 0.9544339736z^2 - 0.933869873719z + 0.983591456609}, \quad (2)$$

$$G_z(z) = \frac{0.00108216073252z^3}{z^3 - 0.950124478492z^2 - 0.945510345831z + 0.991336481812}, \quad (3)$$

2.2 Transmitancja regulatora

Na rys. 2.2 przedstawiono schemat blokowy układu regulacji z regulatorem opisanym transmitancją $R(z)$. Celem układu regulacji była całkowita kompensacja drgań płyty, tak więc transmitancja regulatora (4) po rozwinięciu przyjmuje postać (5).



2.2 Schemat blokowy układu regulacji z regulatorem typu feedforward.

$$R(z) = -\frac{G_z(z)}{G_o(z)}, \quad (4)$$

$$R(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3}}{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}, \quad (5)$$

gdzie współczynniki transmitancji regulatora dostosowanego do pierwszego kanału przyjmują następujące wartości:

$b_0 = -3.68682529109269$	$a_0 = 1.0$
$b_1 = 3.51883131254612$	$a_1 = -0.95012447849179$
$b_2 = 3.44301506901577$	$a_2 = -0.94551034583107$
$b_3 = -3.62632985832893$	$a_3 = 0.99133648181249$

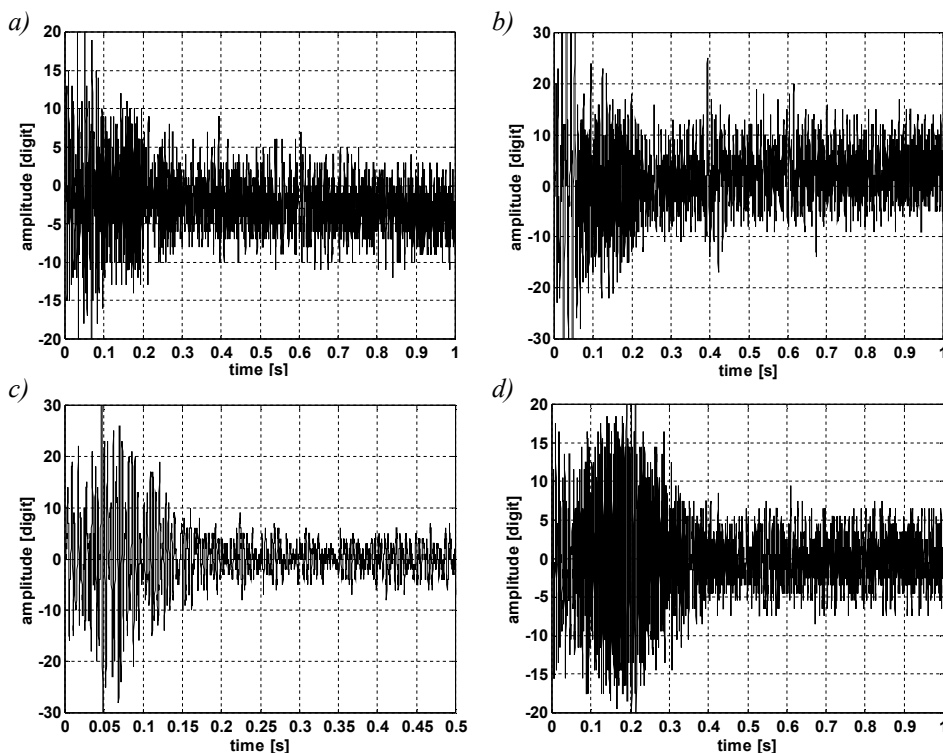
W torze głównym układ posiada sześć zer i sześć biegunów znajdujących się w kole jednostkowym na płaszczyźnie zespolonej operatora z . Z przeprowadzonych obliczeń oraz eksperymentów wynika, że implementacja powyższego algorytmu *feedforward* w rzeczywistym układzie wykazuje stabilność regulacji.

3. WYNIKI EKSPERYMENTU I WNIOSKI

W celu weryfikacji powyższych rozważań przeprowadzono szereg eksperymentów, których wybrane wyniki przedstawiono na rys. 3.1. Odpowiedzi czasowe zarejestrowano przy pobudzaniu płyty zakłóceniami sinusoidalnymi o różnych wartościach amplitudy, częstotliwości i okresie próbkowania. Dla zilustrowania skuteczności sterowania, regulator został włączony po 200 ms pracy układu (rys. 3.1a,b,d) oraz po 100 ms pracy układu (rys. 3.1c). Dla pierwszego kanału pomiarowego, $f_{sin} = 270$ Hz i $f_p = 10$ kHz uzyskano

ok. 50 % redukcji amplitudy drgań. Dla $f_{sin} = 260$ Hz i $f_p = 10$ kHz redukcja wzrosła do ok. 70 %, natomiast dla $f_{sin} = 270$ Hz i $f_p = 20$ kHz – osiągnęła wartość ok. 80 %.

Analizując wyniki przeprowadzonych testów zaobserwowano dużą wrażliwość układu na zmiany parametrów obiektu i zakłócenia. Dostrojenie regulatora do określonego punktu pomiarowego zmniejsza skuteczność redukcji drgań w innych punktach płyty, zwłaszcza od niego odległych, w których regulator może być nawet źródłem dodatkowych zakłóceń. Zwiększenie częstotliwości próbkowania oraz zmniejszenie częstotliwości zakłócenia w zakresie słuszności modelu poprawia jakość regulacji.



3.1 Odpowiedzi układu: a) kanał 1, $f_{sin} = 270$ Hz, $f_p = 10$ kHz, b) kanał 2, $f_{sin} = 270$ Hz, $f_p = 10$ kHz, c) kanał 1, $f_{sin} = 270$ Hz, $f_p = 20$ kHz, d) kanał 1, $f_{sin} = 260$ Hz, $f_p = 10$ kHz.

Przedstawiony w artykule algorytm regulacji można zastosować tylko w przypadku możliwości pomiaru sygnału zakłócającego. Skuteczność redukcji drgań w dużym stopniu zależy od niezmienności parametrów obiektu i zakłócenia. W wyniku płynności parametrów obiektu na skutek występowania m.in. procesów starzenia, wymagane jest systematyczne dostrajanie współczynników regulatora.

LITERATURA

1. L. LENIOWSKA, R. LENIOWSKI, Active control of circular plate vibration by using piezoceramic actuators, Archives of Control Science, Vol.13, No.4, pp. 391-403 (2003)
2. T. SÖDERSTRÖM, P. STOICA, Identyfikacja systemów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.