

Wojciech Jarzyna

Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Politechnika Lubelska

Michał Augustyniak

INDUSTER Sp. z o.o. Lublin

Marcin Bocheński

Jerzy Warmiński

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Lubelska

REDUKCJA DRGAŃ BELKI ZA POMOCĄ PIEZOELEKTRYCZNEGO KOMPOZYTOWEGO SIŁOWNIKA MFC

REDUCTION OF BEAM VIBRATIONS BY MEANS OF A PIEZOELECTRIC MFC ACTUATOR

Streszczenie: Zastosowanie kompozytowych siłowników piezoelektrycznych MFC tworzy nowe możliwości w zakresie poprawy jakości pracy podzespołów mechanicznych. Opisane badania dotyczą wykorzystania takich siłowników do redukcji drgań belki wysięgnikowej. Dla takiej belki, z przytwierdzonym siłownikiem MFC, przedstawiono i omówiono wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych. Są one ukierunkowane na ocenę redukcji drgań uzyskanych dla określonych algorytmów regulacji. W konkluzji wskazano pozytywne i negatywne rezultaty oraz sformułowano kierunki przyszłych badań.

Abstract: Application of MFC piezoelectric actuators offers new possibilities of quality improvement in the operation of mechanical systems. This study addresses the use of such actuators in the reduction of vibrations of a cantilever beam. It presents the simulation and laboratory results for such a beam, operating with an attached MFC actuator. The research is focused on the evaluation of vibration reduction by means of certain control algorithms. The conclusions show the successful and negative results and outline future investigations.

Słowa kluczowe: siłowniki piezoelektryczne, redukcja drgań, algorytmy redukcji drgań

Keywords: piezoelectric actuators, vibration reduction, algorithms reducing vibrations

1. Wprowadzenie

Drgania podzespołów mechanicznych stanowią poważny problem. Ich zbyt wysoki poziom niekorzystnie wpływa na zakres pracy i uzyskiwane parametry urządzeń. Drgania mechaniczne powodują między innymi zmniejszenie efektywności pracy, a w skrajnych przypadkach mogą doprowadzić do całkowitej destrukcji układu.

Aby ograniczyć poziom tych drgań stosuje się różne metody, a jedną z najnowocześniejszych jest zastosowanie materiałów o złożonej strukturze. Materiały takie zawierają elementy aktywne, czynnie wpływające na własności fizyczne materiałów i ich poziom drgań. Do takich materiałów należą struktury kompozytowe z wbudowanymi aktywnymi układami piezoelektrycznymi [8, 9, 10]. Przykłady zastosowań siłowników piezoelektrycznych znaleźć można w przemyśle lotniczym, w szczególności do redukcji drgań łopat helikoptera czy redukcji drgań jak lotek skrzydeł statków lotniczych [12, 13].

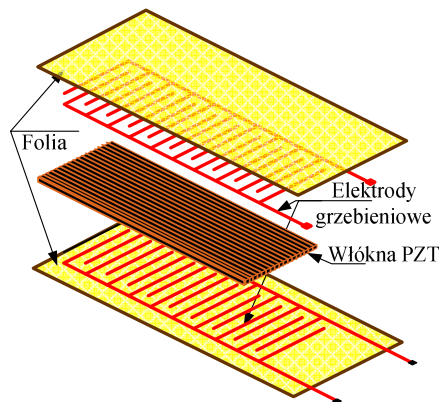
W niniejszym artykule opisano zastosowanie takiego piezoelektrycznego siłownika kompozytowego wykorzystanego do redukcji drgań. Celem naukowym artykułu jest sformułowanie oceny skuteczności tłumienia wybranych algorytmów regulacji.

W artykule zaproponowano układ regulacji i wskazano kilka algorytmów, dla których przedstawiono wyniki badań. Uzyskane rezultaty skomentowano, określono przyczyny niedostatecznych efektów działania regulatorów i sformułowano kierunki przyszłych badań.

2. Własności siłownika i opis stanowiska badawczego

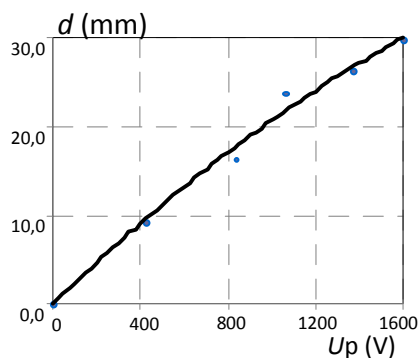
Zastosowane w podczas badań siłowniki piezoelektryczne to kompozyty MFC – Macro Fiber Composites. Mają one budowę warstwową, a elementami, dzięki którym uzyskują własności wykonawcze, są włókna piezoelektryczne PZT. Włókna te ułożone są pomiędzy elektrodami wytwarzającymi pole elektryczne. (rys.1). Przekrój włókien kompozytów MFC jest kwadratowy, dzięki czemu, pod wpływem pola

elektrycznego, generowanego przez elektrody grzebieniowe, odkształcają się one w ściśle określonych kierunkach.



Rys.1. Struktura aktywnego kompozytu MFC z włóknami piezoelektrycznymi PZT

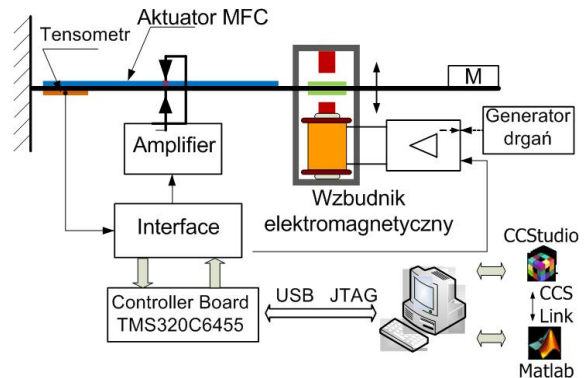
Zastosowanie długich włókien PZT pozwala uzyskać znaczące siły i przesunięcia. Dla siłownika typu MFC 8503-P1 charakterystykę odkształcenia w funkcji napięcia zasilania przedstawia rys.2.



Rys.2. Poziom odkształcenia siłownika MFC 8503-P1 w funkcji napięcia zasilania $d(U_p)$

Wymuszając odpowiednie wartości napięć na zaciskach elementu MFC, można generować pożądane co do amplitudy, częstotliwości i fazy odkształcenia, które mogą redukować ruch drgający elementów.

Badania przeprowadzono dla belki wisięnikowej podpartej z jednej strony. Do belki tej przymocowany został element MFC, tensometr oraz podzespoły wzbudnika elektromagnetycznego pozwalające wymuszać drgania belki.

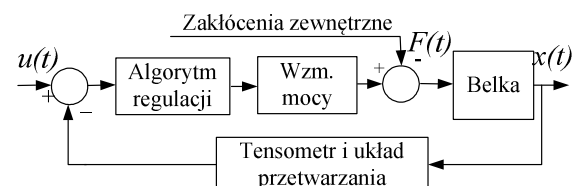


Rys.3. Schemat stanowiska badawczego belki wisięnikowej z aktywnym elementem MFC

Za realizację planowanych badań odpowiedzialny jest układ mikroprocesorowy DSP współpracujący z systemem komputerowym, z którym komunikuje się w celu pobrania odpowiednich algorytmów sterowania i regulacji oraz zapisu uzyskanych wyników. Taka organizacja badań umożliwia testowanie różnych algorytmów i sprawdzanie skuteczności redukcji drgań, ze względu na różne zakłócenia zewnętrzne.

3. Układ regulacji i algorytmy redukcji drgań

Podczas redukcji drgań, najczęściej stosowaną strukturą regulacji jest układ z ujemną pętlą sprzężenia zwrotnego od odkształcenia i z regulatorem uchybu tego odkształcenia (rys.4).



Rys.4. Układ regulacji z ujemnym sprzężeniem zwrotnym od wielkości odkształcenia

Formułując model matematyczny, belkę kompozytową przybliżono członem inercyjnym II rzędu, uwzględniającym wewnętrzne tarcie suche oraz wewnętrzne tarcie mokre I i II rzędu. Odpowiednie równanie zapisać można w postaci nieliniowego równania różniczkowego rzędu II (1) [5].

$$\ddot{x} + 2\mu\omega\dot{x} + \omega^2x + \beta x^3 - \delta(x\dot{x}^2 + x^2\ddot{x}) = f \cos(\Omega t) \quad (1)$$

gdzie:

x – odkształcenie końca belki,
 μ – współczynnik tarcia lepkiego,

β – współczynnik wewnętrznego nieliniowego tarcia suchego,
 δ - współczynnik wewnętrznego nieliniowego tarcia mieszanego
 ω – częstotliwość drgań własnych belki.

Ponieważ siłownik przytwierdzony jest do belki, jego parametry mechaniczne uwzględniono razem z modelem belki. Nie wyróżniano też w osobnym równaniu wpływu obwodów elektrycznych [1, 2, 3, 4, 11]. Duża dynamika tych obwodów i powoduje znikomo małe opóźnienia, które wobec parametrów belki i układu przetwarzania są znikomo małe.

W opisie matematycznym układu pomiarowego, poza wzmocnieniem, uwzględniono wielkość opóźnienia zależnego od parametrów przetwarzania. Dla ustalonych warunków przetwarzania danych blok ten opisuje transmitancja operatorowa $H_{pom}(s)$,

$$H_{pom}(s) = K_{pom} \cdot e^{-s\tau} \quad (2)$$

gdzie, opóźnienie τ może się zmieniać w zależności od czasu przetwarzania wielkości pomiarowych.

Projektując standardowe regulatory PID, wygodnie jest posługiwać się narzędziami takimi jak charakterystyki: amplitudy i fazy (Bode), czy określając miejsca położenia biegunów układu zamkniętego (Root locus).

Poza wymienionymi regulatorami PID w niniejszym artykule omówiono wyniki dla regulatorów rezonansowych PPF (Positive Position Feedback) (3a) oraz SRF (Strain Rate Feedback) (3b).

$$G_{PPF}(s) = \frac{g_1 \omega_m^2}{s^2 + 2g_2 \mu \omega_m s + \omega_m^2} \quad (3a)$$

$$G_{SRF}(s) = \frac{g_1 \omega_m s}{s^2 + 2g_2 \mu \omega_m s + \omega_m^2} \quad (3b)$$

Inne regulatory, dające pozytywne efekty to nieliniowe warianty regulatora PID w szczególności regulator Fuzzy PI z określoną bazą reguł [3], regulatory nasyceniowe NSC (4) [4] czy regulatory z szerokiej grupy wielowymiarowych algorytmów liniowo kwadratowych LQR ze sprzężeniem od wektora stanu (5) [2].

$$\ddot{x} + 2\mu\omega\dot{x} + \omega^2 x + \beta x^3 - \delta(x\dot{x}^2 + x^2\ddot{x}) = f \cos(\Omega t) - \kappa^3 \quad (4)$$

Ostatni człon równania (4) określa nieliniową funkcję regulatora nasyceniowego NSC, która symuluje działanie wewnętrznego tarcia suchego [1, 11].

Zdecydowanie szersze możliwości posiada wielowymiarowy układ z liniowo kwadratowym regulatorem LQR, określającym wielowymiarową macierz sprzężeń zwrotnych obliczona na podstawie funkcjonału kosztów (5).

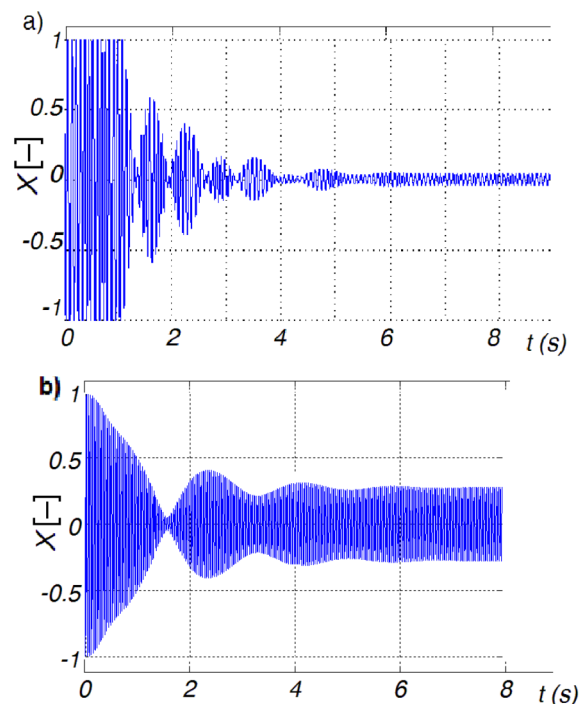
$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)) dt \quad (5)$$

Dobór macierzy wagowych sterowania \mathbf{R} i zmiennej stanu \mathbf{Q} ma decydujący wpływ na położenie biegunów macierzy stanu układu. Wcześniejsze badanie w tym zakresie przedstawione są w publikacji [2].

4. Wyniki wybranych badań i ich ocena

Przyjęta metodyka badań eksperymentalnych to testy symulacyjne i ich weryfikacja na stanowisku laboratoryjnym. Taka organizacja badań umożliwia dość szybkie sprawdzenie znacznej liczby algorytmów oraz poprawność doboru nastaw regulatora.

W prowadzonych eksperymentach, testy laboratoryjne następujące po badaniach numerycznych wykazały, że dosłownie w każdym przypadku istnieją między tymi wynikami istotne rozbieżności. Wybrane wyniki przedstawiają rysunki 5a i 5b oraz 6.

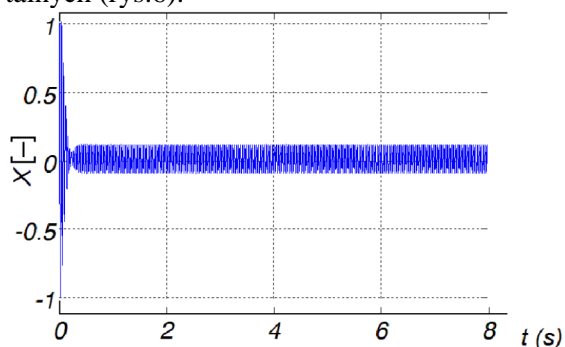


Rys.5. Redukcja drgań z regulatorem SRF. a) symulacje, b) testy laboratoryjne. Wielkości amplitudy drgań określono w jednostkach względnych.

Przykładowo, zastosowanie podczas symulacji rezonansowego regulatora SRF (rys.5a) pozwala precyzyjnie zestroić się z drgającym obiektem. Amplituda drgań jest wówczas redukowana do wartości 4,4%.

Niestety, podczas weryfikacji laboratoryjnej nie udało się osiągnąć takiego wyniku. Amplituda drgań po uruchomieniu regulatora SRF redukowała się zaledwie do wartości około 28%. Dalsze szczegółowe rozważania nad przyczynami tego zjawiska wskazały, że za tę rozbieżność odpowiedzialna jest nieprecyzyjna identyfikacja parametrów belki, a zwłaszcza częstotliwości jej drgań własnych.

W dużo mniejszym stopniu te niekorzystne własności dotyczą prostego regulatora proporcjonalnego P. Dla współczynnika wzmocnienia dobranego metodą eksperymentalną, uzyskano zbliżony poziom redukcji drgań (11%) zarówno dla symulacji jak i badań eksperymentalnych (rys.6).



Rys.6. Redukcja drgań z regulatorem proporcjonalnym P. Wielkości amplitudy drgań określono w jednostkach względnych.

Regulator realizujący algorytm proporcjonalno całkujący o stałych parametrach PI nie sprawdził się w testach laboratoryjnych. Jego zastosowanie powodowało niebezpieczny wzrost drgań. Autorzy przypuszczają, że powodem tego są zbliżone wartości opóźnienia toru pomiarowego i stałej całkowania, co prowadzi do wzbudzenia się drgań, których źródłem jest sam siłownik. Wyjątkiem są regulatory rozmyte PI. Ich wyniki zbliżone są do regulatora typu P, co świadczyć może o dominującej roli reguł realizujących działanie proporcjonalne. Niespodziewanie słabą redukcję drgań uzyskano natomiast dla regulatora LQR. Amplituda sygnału po redukcji drgań wyniosła około

23%, przy czym przebieg przejściowy był zbliżony do tłumienia wibracji jak z regulatorem proporcjonalnym. Przewiduje się przy tym, że możliwości tego regulatora są znacznie szersze, a zwłaszcza w zakresie redukcji drgań wyższych rzędów. Zastosowane tutaj sprzężenie od wektora stanu niesie szerszą informację i powinno skuteczniej kontrolować drgania układu.

5. Wnioski i wynikające z tego dalsze badania

Przeprowadzona w artykule analiza zjawisk dotycząca badania zjawisk redukcji drgań belki wysięgnikowej za pomocą kompozytowego siłownika piezoelektrycznego MFC daje w rezultacie interesujące, pozytywne z punktu widzenia wdrożeń wyniki w zakresie tłumienia wibracji. Siłowniki te dzięki niewielkim wymiarom i znacznym siłom odkształcającym, mogą aktywnie wpływać na pracę i redukować drgania mechanicznych podzespołów [8, 9, 10, 11]. Do swojej pracy siłowniki te wymagają zasilania o napięciach sięgających nawet 1500V.

Uzyskane wyniki wskazują, że istotną rolę w procesie redukcji drgań odgrywają drugorzędne własności belki i układu wykonawczego, które rzadko są identyfikowane i uwzględniane w modelu matematycznym. Z tego względu proste regulatory proporcjonalne, wykazują wysoką odporność, natomiast zastosowanie już nieco bardziej złożonego regulatora PI może być przyczyną powstania niespodziewanych drgań generowanych przez siłownik.

Chętnie stosowane przez inżynierów mechaników algorytmy rezonansowe zapowiadają obiecujące wyniki. Do ich spełnienia wymagana jest jednak dokładna identyfikacja parametrów, a w szczególności zastosowania adaptacyjnego układu regulacji [10,14]. Takie badania są aktualnie prowadzone przez autorów artykułu a ich wyniki dają znaczącą poprawę wyników.

Przedstawione wyniki badań realizowane są w ramach Projektu Kluczowego "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym". Belki wysięgnikowe zastosowane na stanowisku badawczym stanowią uproszczony model elementów łopat śmigłowca. Uzyskane doświadczenia stanowią podstawę dla realizowanych obecnie (2015r.) badań na stanowisku z wirującym modelem rotora śmigłowca.

6. Literatura

- [1] W. Jarzyna, M. Augustyniak, J. Warmiński and M. Bocheński, „Active Piezoelectric Structures in Control Systems”, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol.: 86, Issue: 4, Pages: 252-255, Published: 2010
- [2] W. Jarzyna, M. Augustyniak, J. Warmiński and M. Bocheński, „PD and LQR controllers applied to vibration damping of an active composite beam”, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol.: 88, Issue: 10B, Pages: 128-131, Published: 2012
- [3] W. Jarzyna, M. Augustyniak, A. Wójcik, „Application of a fuzzy PI controller in regulation of active piezoelectric composite structure”, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol.: 88, Issue: 10a, Pages: 298-301, Published: 2012
- [4] W. Jarzyna, M. Augustyniak, J. Warmiński and M. Bocheński, „Evaluation of Suppression Methods Used for Reduction of Vibrations of the Active Composite Beam”, *FRONTIERS IN COMPUTER EDUCATION Book Series: Advances in Intelligent and Soft Computing Volume: 133*, Pages: 709-716, Published: 2012
- [5] J. Latański, „Modelling of Macro Fiber Composite Piezoelectric Active Elements In Abaqus System”, *Eksploracja i Niezawodność-Maintenance and Reliability*. Issue: 4, Pages: 72-78, Published: 2011
- [6] Ł. Sienkiewicz, M. Ronkowski, G. Kostro, R. Ryndzionek, J. F. Rouchon “Identification of the mechanical properties of the skin by electromechanical impedance analysis of resonant piezoelectric actuator”, *39th Annual Conf. of The IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, IEEE Ind. Electronics Society, Pages: 3940-3945.
- [7] Ł. Sienkiewicz, R. Ryndzionek, M. Ronkowski „Przegląd wybranych topologii siłowników piezoelektrycznych”, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*. Nr 92, str.115-120
- [8] SOR Moheimani, “A survey of recent innovations in vibration damping and control using shunted piezoelectric transducers”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.: 11 Issue: 4 Pages: 482-494 Published: JUL 2003
- [9] MA Trindade, A. Benjeddou, R. Ohayon, “Piezoelectric active vibration control of damped sandwich beams”, *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*, Volume: 246 Issue: 4 Pages: 653-677 Published: SEP 27 2001
- [10] C. M. A. Vasques, J. Dias Rodrigues, “Active vibration control of smart piezoelectric beams: Comparison of classical and optimal feedback control strategies”, *Conference: 7th International Conference on Computational Structures Technology/4th International Conference on Engineering Computational Technology Location: Lisbon, PORTUGAL Date: SEP 07-09, 2004 COMPUTERS & STRUCTURES Volume: 84 Issue: 22-23 Pages: 1402-1414 Published: SEP 2006*
- [11] J. Warminski, M. Bochenski, W. Jarzyna, P. Filipek and M. Augustyniak, “Active Suppression of Nonlinear Composite Beam Vibrations by Selected Control Algorithms”. *Communications Nonlinear Science and Numerical Simulation* **16** 5 486-508, 2011
- [12] T. Jordan, Z. Ounaie, J. Tripp, P. Tchong. “Electrical Properties and Power Considerations of a Piezoelectric Actuator”. *ICASE Report No. 2000-8. NASA Langley Research Center*, 2010
- [13] F.K. Straub, D.K. Kennedy, D.B. Domzals. “Smart material-actuated rotor technology – SMART”. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*, Volume: 15, Issue: 4, Pages: 249-260, DOI: 10.1177/1045389X04042795, APR 2004
- [14] W. Jarzyna, M. Augustyniak, J. Warmiński and M. Bocheński, „Application of model reference adaptive system in natural frequency identification of an active beam composite structure”, W: *UKSim-AMSS 8th European Modelling Symposium, EMS 2014*, Pisa, Italy, 21-23 October 2014 - 2014, s. 495-500

Podziękowania

Badania realizowano w ramach Projektu Klucowego "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.0101.02-00-015/08 Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.