

MAREK STANISŁAW KOZIEŃ*, ŁUKASZ ŚCISŁO**

ANALIZA STANU PRZEJŚCIOWEGO DRGAŃ BELKI Z ELEMENTAMI PIEZOELEKTRYCZNYMI METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

TRANSIENT ANALYSIS OF THE VIBRATING BEAM WITH PZT ELEMENTS USING FINITE ELEMENT METHOD

Streszczenie

Zastosowanie sterowanych elementów piezoelektrycznych, rozmieszczonych w odpowiedniej konfiguracji na powierzchni drgającej belki jest jedną z współcześnie rozwijanych metod redukcji ich drgań. Jednym z istotnych zagadnień jest tłumienie wielomodalne. Elementy piezoelektryczne – aktuatory – powinny być rozmieszczone na powierzchniach zewnętrznych w taki sposób, aby leżały w obszarach o dużej krzywiznie wynikającej z postaci drgań. Możliwe są dwie podstawowe realizacje układu: pasywny bez sterowania, dobrany na określone częstotliwości, lub aktywny ze sterowaniem. Celem pracy było zbudowanie i przetestowanie kodu pozwalającego na analizę stanu przejściowego drgań wymuszonych belki. Uzyskane rezultaty analiz pokazują, że możliwy staje się zapis algorytmu sterowania w języku APDL pakietu metody elementów skończonych Ansys.

Słowa kluczowe: materiały inteligentne, tłumienie drgań, materiały piezoelektryczne

Abstract

Application of the controlled piezoelectric elements, suitable distributed over the external surfaces of the vibrating beam is one of the contemporary applied method of reduction of its vibrations. One of the important problems is the multimodal damping. The piezoelectric elements – actuators – should be distributed on the external surfaces in areas of high curvatures comminif from the vibrations shapes. Two basic attempts of damping can be applied: active one with control system or and passive one designed for chosen frequency. The aim of the paper was to built and to test tke numerical code for transient analysis of excited and active damped beam. The obtained results makes possible to do the next step: to write the APDL control procedure in the Ansys finite element method system.

Keywords: smart materials, dampers, vibration control, piezoelectric transducers

* Dr hab. inż. Marek S. Kozień, Instytut Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

** Mgr inż. Łukasz Ścisło, Katedra Automatyki i Technik Informatycznych, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

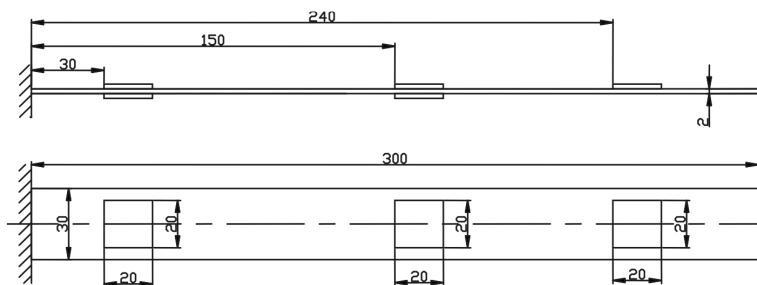
Konstrukcja lub struktura inteligentna to struktura, która posiada zdolność wykrywania i reagowania na zmianę w ich otoczeniu w sposób przewidywalny i pożądany, przez zintegrowanie różnego rodzaju elementów, takich jak: sensory, akulatory, źródła zasilania i in. Dzięki takiej strukturze konstrukcje inteligentne mogą służyć do m.in. redukcji drgań i dźwięków akustycznych, monitorowania stanu konstrukcji i otoczenia. W ciągu ostatnich kilku lat zaczęto poszukiwać najbardziej optymalnych metod tłumienia drgań. Najnowsze osiągnięcia w dziedzinie materiałoznawstwa spowodowały szczególne zainteresowanie pewną klasą materiałów, w literaturze określanymi jako materiały piezoelektryczne [8, 11]. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analiz, w których elementy wykonane z materiałów piezoelektrycznych zostały wykorzystane do redukcji drgań płyt.

Zastosowanie odpowiednio sterowanych elementów piezoelektrycznych, rozmieszczonych w odpowiedniej konfiguracji na powierzchni drgającej belki, jest jedną ze współcześnie rozwijanych metod redukcji ich drgań [5, 9]. Jednym z istotnych zagadnień jest tłumienie wielomodalne [1, 9]. Elementy piezoelektryczne – akulatory – powinny być rozmieszczone na powierzchniach zewnętrznych w taki sposób, aby leżały w obszarach o dużej krzywiznie wynikającej z postaci drgań [2–4]. Możliwe są dwie podstawowe realizacje układu: pasywny bez sterowania, dobrany na określone częstotliwości, lub aktywny ze sterowaniem [6, 7].

Celem pracy było zbudowanie i przetestowanie kodu pozwalającego na analizę stanu przejściowego drgań wymuszonych belki. Dobór siatki elementów oraz wybór rodzaju elementów dokonano w ramach prac [3, 4, 9, 10, 12]. Pokazanie możliwości dokonania analiz MES dla sformułowanego zagadnienia mają w dalszej kolejności umożliwić zapis algorytmu sterowania w języku APDL pakietu Ansys i dokonanie symulacji aktywnej redukcji drgań w zakresie kilku najniższych postaci drgań. Rezultaty symulacji mają być weryfikowane na stanowisku pomiarowym.

2. Geometria układu. Model MES

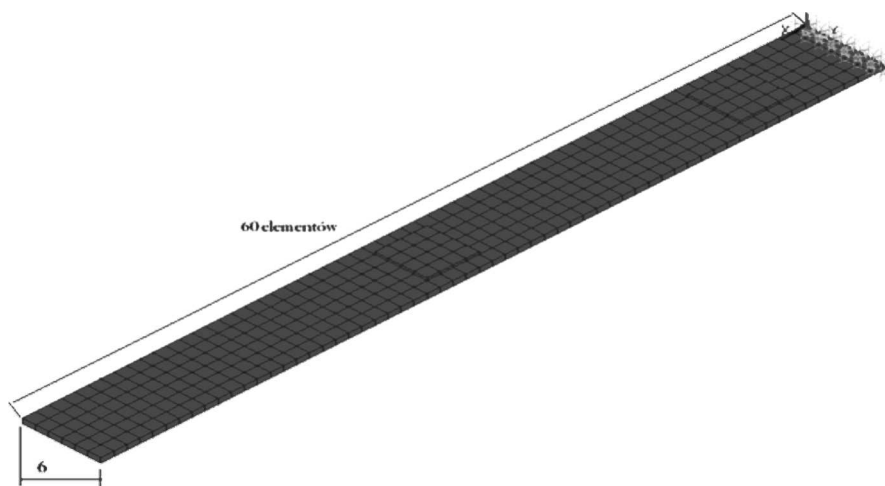
Symulacje komputerowe z wykorzystaniem metody elementów skończonych zostały wykonane dla belki, której geometrię pokazano na rys. 1. Jest to układ, na którym planowane jest wykonanie badań doświadczalnych wielomodalnej redukcji drgań. Belka wykonana jest ze stali, a elementy piezoelektryczne z materiału PZT 5.



Rys. 1. Schemat belki znajdującej się na stanowisku laboratoryjnym

Fig. 1. Schema of the laboratory beam

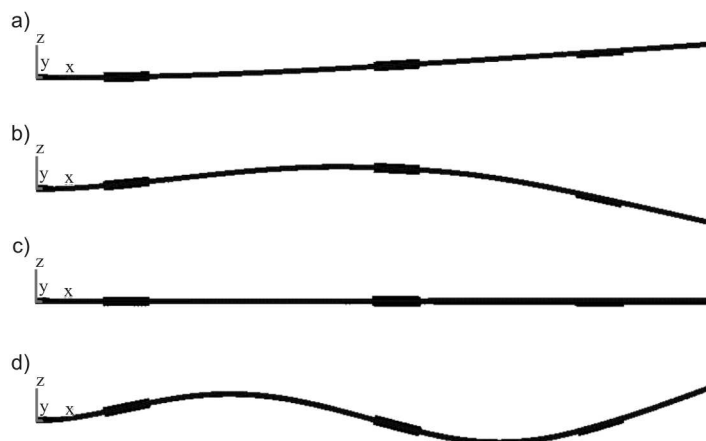
Belkę wraz z elementami piezoelektrycznymi zamodelowano w pakiecie Ansys z zastosowaniem elementów solid45, natomiast przetworniki piezoelektryczne z użyciem elementów typu pół sprzężonych solid5. Wygląd modelu pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Model trójwymiarowy analizowanej belki

Fig. 2. 3D model of the analyzed system

Zaproponowany sposób dyskretyzacji był oparty na wnioskach wynikających z wcześniej przeprowadzonych symulacji obejmujących przypadki dyskretyzacji przez elementy dwuwymiarowe, a następnie elementy trójwymiarowe przy różnej gęstości siatki. W celu oceny dynamiki układu dokonano analizy modalnej struktury, określając częstotliwości własne oraz postaci form własnych dla kilku podstawowych modów drgań. Ich wygląd pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Pierwsze cztery formy drgań własnych belki

Fig. 3. Form of the lowest modes of beam

Analiza dynamiczna stanów przejściowych (*transient dynamic analysis*) jest sposobem analizy, wykorzystywanym do określenia odpowiedzi dynamicznej struktury poddanej obciążeniu zmiennemu w czasie, która daje odpowiedź bezpośrednio po zadziałaniu wymuszenia. Ma ona zastosowanie w przypadkach wystąpienia obciążenia typu impulsowego lub skokowego. W sposób naturalny może służyć do symulacji zagadnień sterowania.

Dla badanego przypadku swobodny koniec belki został obciążony impulsem siły. Dokładność numerycznej analizy stanu przejściowego w dużym stopniu zależy od określenia kroku czasowego numerycznego całkowania (*ITS*). Przyjmuje się, że jego wartość związana jest z częstotliwością najwyższej formy (f_{\max}), którą chcemy uwzględnić w analizie za pomocą związku (1):

$$ITS = \frac{1}{20 \cdot f_{\max}} \quad (1)$$

W pakiecie Ansys analiza stanów przejściowych może być przeprowadzona na trzy sposoby:

1. Pełna analiza stanów przejściowych, dla której możliwe jest uwzględnienie wszelkiego rodzaju nieliniowości. Metoda jest najbardziej czasochłonna ze względu na wykorzystanie w analizie pełnych macierzy układu.
2. Zredukowana analiza stanów przejściowych, w której stosuje się redukcję macierzy, uwzględniając jedynie główne stopnie swobody ruchu. Dzięki temu rozmiary macierzy ulegają zmniejszeniu, co przyspiesza czas analizy. Metoda ta pozwala na analizę jedynie problemów liniowych.
3. Metoda superpozycji modalnej, która wymaga wykonania wcześniej analizy modalnej układu. Proponowana odpowiedź układu przedstawiana jest w postaci sumy udziałów poszczególnych form drgań. Jest to metoda najszybsza z prezentowanych.

3. Symulacje odpowiedzi układu w stanie przejściowym

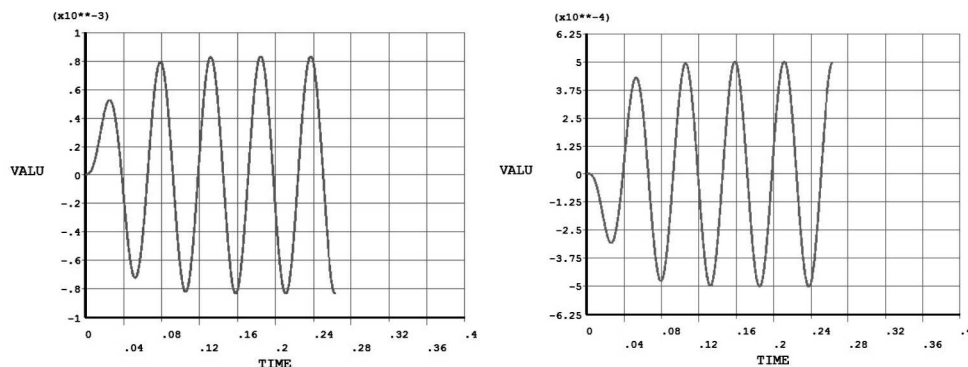
W analizie zastosowano zredukowaną oraz pełną metodę analizy stanów przejściowych. W pakiecie Ansys, w przypadku analizy zredukowanej nie jest możliwe zamodelowanie sygnału sterującego elementami piezoelektrycznymi, jako sygnału napięciowego. Dlatego też oddziaływanie elementów PZT zamodelowano podobnie jak w pracy [3] w postaci pary sił.

Belka była pobudzana do drgań przez siłę skupioną, harmoniczną zmienną w czasie, o częstotliwości równej pierwszej lub drugiej częstotliwości drgań własnych belki. Siła ta była przyłożona na swobodnym końcu omawianej belki. Dla każdego z rozważanych przypadków wymuszeń dokonywano dwóch symulacji: bez redukcji drgań, przez elementy piezoelektryczne, oraz z jej uwzględnieniem, przez przyłożenie pary sił o dobranej wartości amplitudy.

Rozważono następujące przypadki:

1. Wymuszenie o częstotliwości pierwszej formy drgań.

Wymuszenie siłą o amplitudzie $F_{w1} = 0,1$ N. Wyniki symulacji w postaci wykresów przemieszczenia środka belki w czasie pokazano na rys. 4.

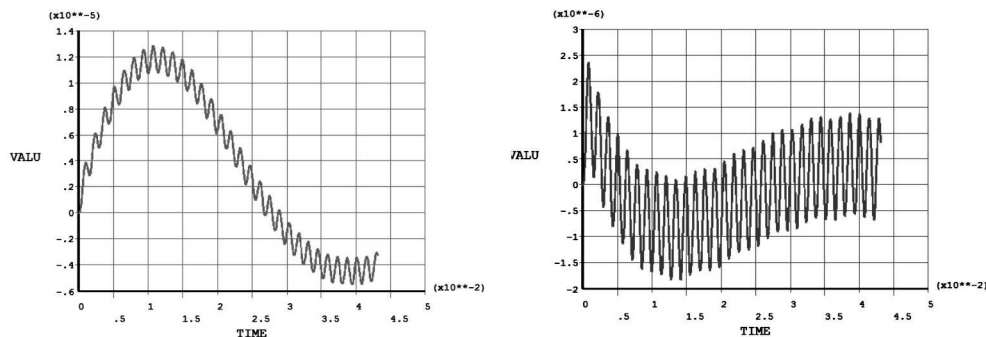


Rys. 4. Przeszczenia  rodka belki w funkcji czasu przy wymuszeniu o cz stotliwo ci pierwszej formy drga n wlasnych dla ukadu bez t mienia (z lewej) oraz ukadu z t mieniem (z prawej)

Fig. 4. Displacement of the middle of a beam in time for the excitation frequency equal to the first natural frequency for system without damping (left) and system with damping (right)

2. Wymuszenie o cz stotliwo ci drugiej formy drga n.

Wymuszenie si l  o amplitudzie $F_{w2} = 0,2$ N. Rezultaty symulacji w postaci wykresow przeszczenia  rodka belki w czasie pokazano na rys. 5.

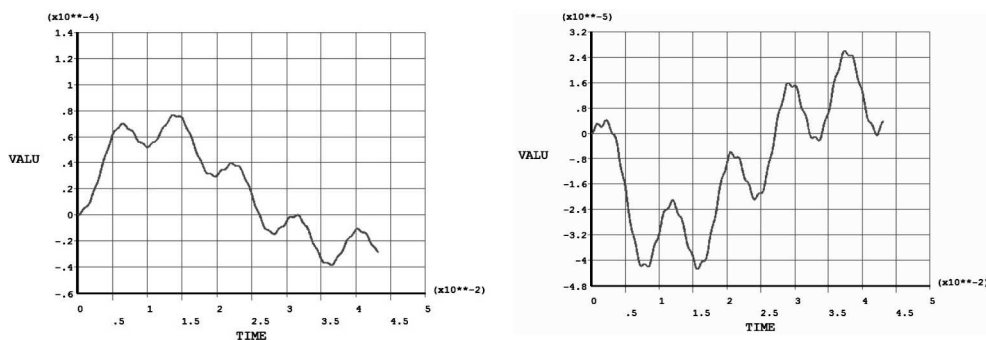


Rys. 5. Przeszczenia  rodka belki w funkcji czasu przy wymuszeniu o cz stotliwo ci drugiej formy drga n wlasnych dla ukadu bez t mienia (z lewej) oraz ukadu z t mieniem (z prawej)

Fig. 5. Displacement of the middle of a beam in time for the excitation frequency equal to the second natural frequency for system without damping (left) and system with damping (right)

3. Wymuszenie wielomodalne o cz stotliwo ci pierwszej i drugiej formy drga n.

Wymuszenie superpozycj  si l o amplitudzie $F_{w1} = 0,1$ N o cz stotliwo ci pierwszej formy drga n i amplitudzie $F_{w2} = 0,2$ N o cz stotliwo ci drugiej formy drga n, dzialaj cej współfazowo. Rezultaty symulacji w postaci wykresow przeszczenia  rodka belki w czasie pokazano na rys. 6.

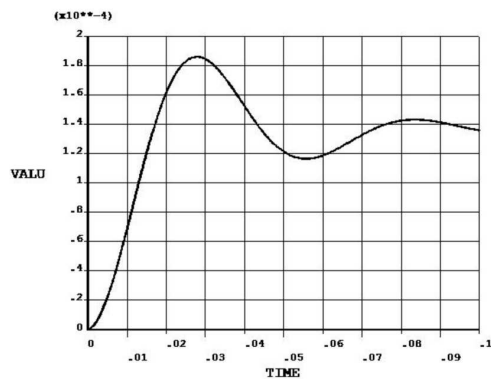


Rys. 6. Przeszczenia środka belki w funkcji czasu przy wymuszeniu będącym superpozycją sił dla układu bez tłumienia (z lewej) oraz układu z tłumieniem (z prawej)

Fig. 6. Displacement of the middle of a beam in time for the excitation of the force superposition type for system without damping (left) and system with damping (right)

4. Wymuszenie wielomodalne o częstotliwości pierwszej i drugiej formy drgań.

Wymuszenie zewnętrzne w postaci superpozycji sił, jak w poprzednim przypadku. Redukcja drgań przez przyłożenie harmonicznie zmiennego w czasie napięcia do powierzchni zewnętrznej elementów piezoelektrycznych. Analiza prowadzona była metodą pełną. Rezultaty symulacji w postaci wykresu przemieszczenia środka belki w czasie pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Przeszczenia środka belki w funkcji czasu przy wymuszeniu będącym superpozycją sił dla układu z tłumieniem napięciowym

Fig. 7. Displacement of the middle of a beam in time for the excitation of the force superposition type for system with voltage damping

4. Wnioski

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania analiz dynamicznych stanu przejściowego drgań belki w dziedzinie czasu z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Pokazano, że możliwe i poprawne są symulacje prowadzone zredukowaną

metodą modalną oraz metodą pełną. Metoda pełna wymaga jednak dużo większych mocy obliczeniowych komputera. Zaletą metody w sformułowaniu pełnym jest jednak możliwość wprowadzenia sygnału tłumiącego drgania jako sygnału napięciowego działającego na elementy piezoelektryczne. Daje to podstawy do dalszych prac nad symulacją sterowania drganiami w języku APDL implementowanym w pakiecie metody elementów skończonych Ansys.

Literatura

- [1] De Abreu G.L.C.M., Ribeiro J.F., Steffen V., *Finite element modeling of a plate with localized piezoelectric sensors and actuators*, J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. 26, 2, 2004, 117-127.
- [2] Brański A., Borkowski M., Szela S., *The Idea of the Selection of PZT-Beam Interaction Forces in Active Vibration Protection*, Acta Physica Polonica A, Vol. 118, No. 4, 2010, 17-22.
- [3] Brański A., Szela S., *Improvement of effectiveness in active triangular plate vibration reduction*, Archives of Acoustics, Vol. 33, No. 4, 2008, 521-530.
- [4] Brański A., Szela S., *Quasi-optimal PZT distribution in active vibration reduction of the triangular plate with P-F-F boundary conditions*, Archives of Control Sciences, Vol. 20(LVI), No. 2, 2010, 209-226.
- [5] Elliott S.P., Nelson P.A., *Control of Vibrations*, Academic Press, London 1997.
- [6] Kozień M.S., *Promieniowanie akustyczne płyt i powłok o małej wyniosłości*, Monografia nr 331, Mechanika, Politechnika Krakowska, Kraków 2007.
- [7] Kozupa M., Wiciak J., *Active Vibration Control of rectangular Plate with Distributed Piezoelements Excited Acoustically and Mechanically*, Acta Physica Polonica A, Vol. 118, No. 1, 2010, 95-98.
- [8] Kurnik W., Tylikowski A., *Mechanika elementów laminowanych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- [9] Moheimani S.O.R., Fleming A.J., *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*, Springer, London 2006.
- [10] Trojanowski R., Wiciak J., *Preliminary Results of Laboratory Tested System for Active Control of Plates via LabVIEW and Piezoelectric Elements*, Acta Physica Polonica A, Vol. 118, No. 1, 2010, 168-171.
- [11] Tylikowski A., Przybyłowicz P.M., *Nieklasyczne materiały piezoelektryczne w stabilizacji i tłumieniu drgań*, Instytut Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [12] Wiciak J., *Wybrane zagadnienia redukcji drgań i dźwięków strukturalnych*, Monografia nr 175, AGH Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2008.