

ŁUKASZ ŚCISŁO\*

## MODELOWANIE MES KONSTRUKCJI INTELIGENTNYCH

---

## FINIETE ELEMENT MODELLING OF SMART STRUCTURES

### Streszczenie

W dzisiejszych czasach dużą rolę w systemach tłumienia drgań ma klasa materiałów o własnościach adaptacyjnych w literaturze określanych jako materiały inteligentne. Do jednych z najbardziej popularnych należą elementy piezoelektryczne (PZT), które mogą być stosowane m.in. w systemach redukcji drgań i hałasu. Celem artykułu jest przedstawienie niektórych z możliwych analiz numerycznych inteligentnej belki, przy zastosowaniu metody elementów skończonych (MES) w programie ANSYS. Przedstawione zostaną trzy przykładowe analizy: modalna, harmoniczna oraz analiza dynamiczna stanów przejściowych. Szczególna uwaga poświęcona będzie dynamicznej analizie transjentowej, która umożliwia implementację i dalszy rozwój systemu kontroli przy użyciu parametrycznego języka programowania programu ANSYS (ADPL). Udowodnione zostanie, iż możliwe jest stworzenie poprawnie działającego modelu, który w przyszłości posłuży do wyboru najodpowiedniejszej metody sterowania, która zostanie także przetestowana na stanowisku laboratoryjnym.

*Słowa kluczowe: materiały inteligentne, tłumienie drgań, materiały piezoelektryczne*

### Abstract

Development in materials engineering effected in discovery of new materials which have adaptive properties. One of the most popular ones are piezoelectric elements (PZT) which may be implemented in vibration control systems. The paper presents some of the possible analyses of a smart beam which exist in the laboratory carried out using finite element method (FEM) in ANSYS. Three of the particular analyses will be presented: modal analyses, harmonic analyses and transient analyses. Special attention will be given to transient dynamic analyses which allows implementation and development of a control system using ANSYS Parametric Design Language (APDL).

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

---

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

## 1. Wstęp

Struktura inteligentna, która posiada zdolność wykrywania i reagowania na zmianę w ich otoczeniu w sposób przewidywalny i pożądaną, przez zintegrowanie różnego rodzaju elementów, takich jak: sensory, akulatory, źródła zasilania i inne. 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 wielu naukowców zaczęło poszukiwać najbardziej optymalnych metod tłumienia drgań. Spowodowane było to tym, iż wibracje występujące w środowisku naturalnym, jak również w obszarze pracy człowieka mogą mieć negatywne skutki na jakość pracy, a w niektórych przypadkach mogą także skutkować problemami zdrowotnymi.

Najnowsze osiągnięcia w dziedzinie materiałoznawstwa spowodowały szczególne zainteresowanie pewną klasą materiałów w literaturze określanych jako materiały inteligentne. Implementacja tych kontrolowalnych materiałów wymaga wiedzy z wielu dziedzin, m.in.: teorii drgań, dynamiki, materiałoznawstwa oraz teorii sterowania.

Niniejszy artykuł przedstawia przykładowe modelowanie struktury z elementami piezoelektrycznymi, które mogą być wykorzystane jako elementy systemów tłumienia drgań w konstrukcjach inteligentnych.

## 2. Elementy piezoelektryczne jako przykład materiałów inteligentnych

W materiałach inteligentnych zachodzi zjawisko wewnętrznej odpowiedzi na zewnętrzne wymuszenie w użyteczny sposób. Zewnętrzne wymuszenie wywołane może być przez wiele czynników, m.in. zmianę w otoczeniu materiału, taką jak: temperatura, pole elektryczne i magnetyczne, wilgotność ciśnienie i oświetlenie powierzchni. Reakcją na taką zmianę będzie odpowiednia zmiana własności materiału: kształtu, przewodności, rozmiaru, struktury, koloru, polaryzacji bądź własności magnetycznych.

Na szczególną uwagę zasługują wielofunkcyjne materiały magneto-reologiczne, elektro-reologiczne, termo-elektryczne i mechano-reologiczne. Materiały takie mogą znaleźć zastosowanie w tłumieniu drgań i hałasu, kontroli kształtów, inteligentnych maszynach, urządzeniach medycznych, mikromechanicznych systemach stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, medycznym, w inżynierii lądowej i mechanice oraz w technologii mikrosystemów. Jak widać w powyższych przykładach, niemalże każda dziedzina nauki może zyskać na realizacji koncepcji adaptroniki. Właśnie dzięki wielkiemu potencjałowi i możliwości stosowania w wielu aplikacjach inżynierskich materiałów inteligentnych naukowcy poświęcają tej dziedzinie coraz więcej uwagi.

W systemach z materiałami inteligentnymi element wykonawczy, sensory i akulatory są zintegrowane z materiałami na poziomie mikro- i makroskopowym. W zależności od rodzaju reakcji możemy wyróżnić materiały reagujące na temperaturę bądź pole elektryczne, magnetyczne lub pole naprężeń. Pierwsza grupa ma możliwość konwertowania energii termicznej na mechaniczną. Druga z kolei ma możliwość zamiany energii elektrycznej, magnetycznej i pola naprężeń na energię mechaniczną.

Materiały piezoelektryczne, należące do drugiej grupy, to materiały, w których występuje liniowe sprzężenie pomiędzy własnościami sprężystymi i dielektrycznymi. W materiałach tych zaobserwować można dwa efekty. Prosty efekt piezoelektryczny występuje, gdy pod wpływem obciążenia mechanicznego następuje wytworzenie ładunku elektrycznego na ściankach elementu, zależnego od amplitudy i kierunku przyłożonego obciążenia. Odwrotny efekt piezoelektryczny jest obserwowany, gdy pod wpływem pola elektrycznego nastąpi deformacja mechaniczna zależna od natężenia i kierunku pola [1, 2, 3, 6, 7].

Materiały piezoelektryczne, z powodu swojej prostoty i niezbyt dużych kosztów, znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Zjawisko zamiany energii elektrycznej na energię mechaniczną, obserwowane w elementach piezoelektrycznych, może być wykorzystywane przez aktulatory lub reakcja mechaniczna rejestrowana przez efekt elektryczny, co z kolei może być wykorzystane w sensorach.

Główne dziedziny, w których stosowane są materiały piezoelektryczne, to: automatyka, mikromanipulacja, technologie pomiarowe, przemysł medyczny. Jedną z dziedzin, w których obserwowany jest szybki rozwój badań nad materiałami piezoelektrycznymi, są systemy do monitorowania stanu materiałów i struktur. Wśród konkretnych zastosowań wymienić można np. zapalarki do gazu, zapalniczki, precyzyjne wagi analityczne, a także wagi domowe, sterowanie pomiarem w tzw. mikroskopach STM czy AFM (ogólnie SPM), wkładki gramofonowe w popularnych gramofonach z lat 1950–1990, w sondach USG, sygnalizatory, wszelkiego rodzaju syreny, wtryski paliwa w systemie common-rail, narty z włóknami z piezoelektryków, rakietę tenisową.

W ostatnich latach piezoelektryki stały się niezwykle popularne w systemach tłumienia drgań. W systemach tych materiały te są używane zarówno jako sensory, jak i elementy wykonawcze [3, 4, 5, 7].

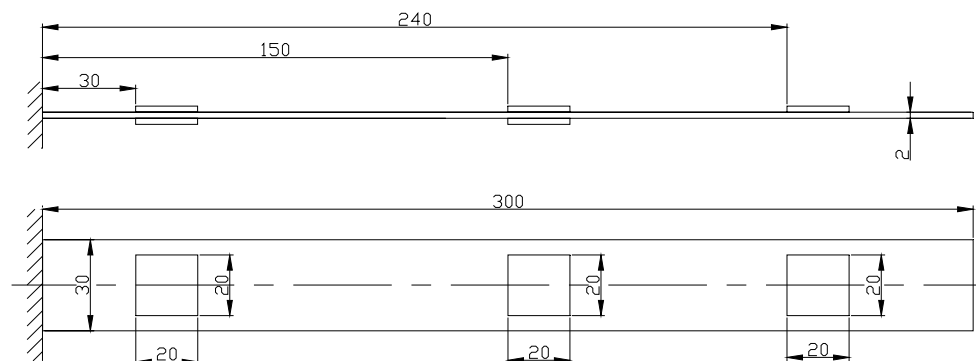
### 3. Model MES stanowiska laboratoryjnego

#### 3.1. Cel pracy

Wykorzystanie elementów piezoelektrycznych, rozmieszczonych w odpowiedniej konfiguracji na powierzchni drgającej elementu jest jedną ze współcześnie rozwijanych metod redukcji ich drgań. Istotnym zagadnieniem jest rozważenie tłumienia wielomodalnego. Sprowadza się ono do rozmieszczenia elementów piezoelektrycznych na powierzchniach zewnętrznych w taki sposób, aby leżały one w obszarach o dużej krzywiznie wynikającej z postaci drgań [1]. Zwłaszcza nie mogą to być węzły drgań dla danej formy. Możliwe są dwie podstawowe realizacje: układ pasywny lub aktywny.

Celem pracy było zbudowanie modelu belki wraz z elementami piezoelektrycznymi. Obiekt badań pokazano na rys. 1.

Symulacje mają w przyszłości prowadzić do wyboru algorytmu sterowania w metodzie aktywnej oraz zbudowania układu tłumików pasywnych RLC dla redukcji drgań kilku najniższych postaci drgań.



Rys. 1. Schemat belki znajdującej się na stanowisku laboratoryjnym

Fig. 1. Schema of the laboratory beam

### 3.2. Model MES

Prowadzone badania mają być w przyszłości wykorzystane do wyboru najbardziej optymalnych algorytmów sterowania w metodzie aktywnej oraz zbudowania układu tłumików pasywnych RLC dla redukcji kilku najniższych postaci drgań. Rezultaty symulacji mają być weryfikowane na stanowisku pomiarowym.

W celu zmniejszenia ilości badań laboratoryjnych zbudowano model MES w programie ANSYS, który posłuży do szerokiego spektrum analiz i ostatecznie wyboru najlepszych technik tłumienia drgań w układzie, które zostaną przebadane w laboratorium.

Pierwszy etap rozważań dotyczył doboru najodpowiedniejszego modelu układu. W programie ANSYS zbudowano dwa typy modeli: model płaski (2D) oraz model przestrzenny (3D), a następnie wybrano model umożliwiający najszerszy zakres dalszych badań.

#### 3.2.1. Model płaski belki z elementami piezoelektrycznymi

Obiekt badań składa się z dwóch typów elementów: elementu belkowego i elementu, przy pomocy którego zamodelowane zostaną przetworniki piezoelektryczne. Program ANSYS daje szerokie możliwości w zakresie wyboru różnego rodzaju elementów w zależności od właściwości modelowanego materiału, jak również ilości węzłów w wybranym elemencie. Poniższa tabela przedstawia przykładowe możliwości.

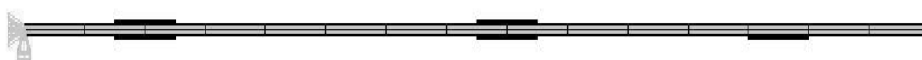
Tabela 1

#### Dobór elementów dla modelu płaskiego

Przykładowe typy elementów dla modelu 2D			
Modelowanie elementu belkowego	Ilość węzłów	Modelowanie piezoelektryka	Ilość węzłów
PLANE42	4	PLANE13	4
PLANE82	8	PLANE223	8
PLANE182	4		
PLANE183	6 lub 8		
ST – structural solid type		CF – coupled field solid type	

Element belkowy jest elementem regularnym, bez żadnych krzywizn i może być modelowany przez jakikolwiek element dwuwymiarowy, jednakże dobrym pomysłem może być użycie elementu wyższego rzędu (np. 8-węzłowego). Do dalszej analizy wybrano element PLANE82, który jest 8-węzłowym elementem strukturalnym.

Przy modelowaniu przetwornika piezoelektrycznego należy pamiętać, aby wybrany element miał zadane właściwości piezoelektryczne, co oferowane jest przez większość elementów typu pól sprzężonych. W omawianej analizie wybrano 4-węzłowy element typu PLANE13.



Rys. 2. Model MES belki 2D otrzymany w programie ANSYS

Fig. 2. ANSYS 2D FEM model of the beam

### 3.2.2. Model przestrzenny belki z elementami piezoelektrycznymi

Model przestrzenny belki zamodelowano przy użyciu elementów SOLID45, natomiast przetworniki piezoelektryczne jako SOLID5 (element typu pól sprzężonych). Inne możliwości wyboru typu elementów przedstawiono w tabeli poniżej.

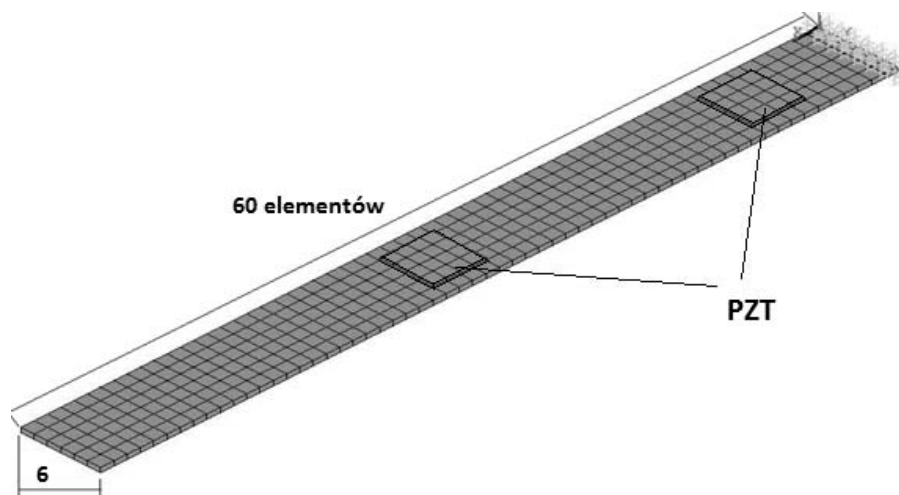
Tabela 2

**Dobór elementów dla modelu przestrzennego**

Przykładowe typy elementów dla modelu 3D			
Modelowanie elementu belkowego	Ilość węzłów	Modelowanie piezoelektryka	Ilość węzłów
SOLID45	8	SOLID5	8
SOLID95	20	SOLID98	10
SOLID186	20	SOLID226	20
		SOLID227	10
ST – structural solid type		CF – coupled field solid type	

Ostatecznie otrzymano model przedstawiony na poniższym rysunku.

Ponieważ model bryłowy uwzględnia częstości i postacie drgań bez względu na to, jaki charakter mają drgania (giętne, skrętne, wzdłużne, złożone), co jest szczególnie ważne w analizowanym przypadku (szerokość analizowanej belki jest dość duża), w dalszych analizach brano pod uwagę już tylko model bryłowy.



Rys. 3. Model MES belki 3D otrzymany w programie ANSYS

Fig. 3. ANSYS 3D FEM model of the beam

### 3.3. Analiza modalna

Dla obu utworzonych modeli (2D i 3D) przeprowadzono analizę modalną. Dodatkowo wykonano obliczenia analityczne częstości drgań własnych w celu potwierdzenia wyników otrzymanych symulacją numeryczną.

Zebrane wyniki przedstawiono w poniższej tabeli.

Tabela 3

#### Wyniki analizy modalnej

Nr formy	Częstotliwość [HZ]		
	Model 3D	Model 2D	Obliczenia analityczne
1	18,711	18,522	19,128
2	115,25	116,993	116,15
3	256,91	–	–
4	324,16	325,147	325,23
5	388,25	–	–
6	628,34	636,965	628,654

Jak można zauważyć, wyniki dla obu analiz różnią się, co jest wynikiem tego, iż analiza modalna w przypadku modelu 2D uwzględnia jedynie efekty czystego zginania, a pomija efekty ścinania. Analiza z wykorzystaniem modelu trójwymiarowego MES pozwala na wyznaczenie częstości bez względu na charakter drgań. Wartości obliczone dla modelu 2D odpowiadają pierwszej, drugiej, czwartej i szóstej postaci drgań otrzymanych

w trakcie trójwymiarowej analizy MES. Różnice wynikają z faktu, że model teoretyczny, na podstawie którego otrzymana wyniki analityczne, jest nieco przeszywniony. Uwzględnia on jedynie efekty czystego zginania i pomija efekty ścinania.

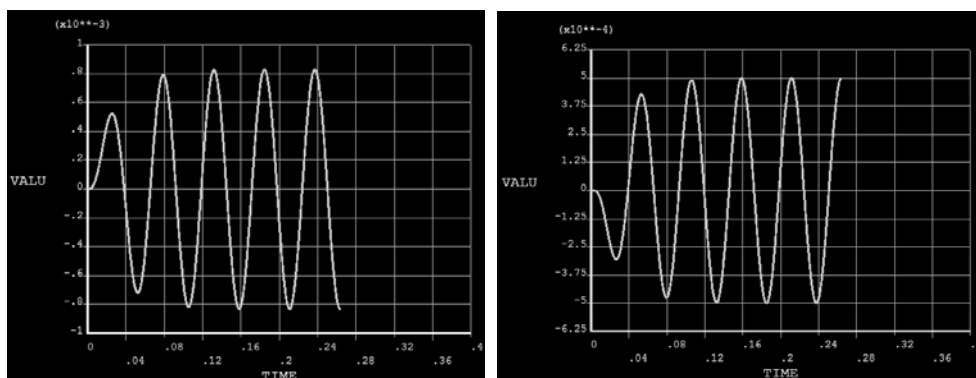
### 3.4. Analiza stanów przejściowych

Analiza dynamiczna stanów przejściowych (*transient dynamic analysis*) jest metodą używaną do określenia odpowiedzi dynamicznej struktury poddanej obciążeniu zmiennemu w czasie. Analizę taką opłaca się przeprowadzać zwłaszcza w przypadkach obciążenia typu impulsowego lub skokowego, czyli w przypadkach nagłej zmiany obciążenia w krótkiej chwili czasowej.

Dla badanego przypadku, swobodny koniec belki został obciążony impulsem siły.

Ponieważ idealny impuls siły wzbudza wszystkie mody układu, odpowiedź badanej belki powinna zawierać wszystkie częstotliwości modalne. Numerycznie nie ma możliwości osiągnięcia idealnego impulsu siły, jednakże można przyłożyć obciążenie w dyskretnych odstępach czasu  $dt$ . Po przyłożeniu impulsu odpowiedź układu jest śledzona w dyskretnych odstępach czasu do zadanego czasu końcowego (określanego zależnie od tego, jakiej informacji poszukujemy w badanej odpowiedzi).

Dokładność analizy stanów przejściowych w dużym stopniu zależy od określenia kroku czasowego numerycznego całkowania. Im mniejszy krok, tym wyższa dokładność. Zbyt duży krok czasowy powoduje powstanie błędu wpływającego na odpowiedź wyższych form drgań (a co za tym idzie na odpowiedź całego układu).



Rys. 4. Przykładowy wynik analizy stanów przejściowych bez tłumienia (z lewej) i założonym tłumieniem piezoelektrycznym (z prawej), dla pierwszej formy drgań

Fig. 4. Example results of transient analysis: without damping (left) and with piezoelectric damping (right), for first vibration form

Wielkość kroku czasowego jest regulowana przez częstotliwość najwyższej formy, którą chcemy obserwować. Im mniejszy krok czasowy, tym formę o wyższej częstotliwości jesteśmy w stanie uchwycić.

Przyjmuje się, iż użycie 20 punktów na okres najwyższej mody jest wystarczające, aby otrzymać dokładne wyniki.

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

gdzie  $f_{\max}$  jest częstotliwością najwyższej mody, którą chcemy uchwycić.

Należy tu zwrócić uwagę, iż analiza stanów przejściowych jest bardziej zaawansowana niż analiza statyczna czy harmoniczna i wymaga dobrego zrozumienia dynamiki badanej struktury. Należy także pamiętać, iż krokiem wstępnym przeprowadzenia analizy transiენტowej jest przeprowadzenie analizy modalnej, dającej odpowiedź na temat dynamiki struktury.

Stworzenie modelu oraz poprawnie działającej analizy stanów przejściowych jest wstępnym krokiem stworzenia systemu kontroli. Dzięki temu, iż funkcje zadane w czasie analizy transiენტowej mają zapis parametryczny, możliwa jest implementacja sterowania dzięki użyciu języka APDL (Ansys Parametric Design Language) pakietu ANSYS.

#### 4. Wnioski

Artykuł przedstawia, jak ważnym zagadnieniem jest poprawne modelowanie struktur do opisu stanów przejściowych. Specjalną uwagę przeznaczono materiałom piezoelektrycznym, jako przykładowi materiałów inteligentnych mogących znaleźć zastosowanie w aktywnych bądź pasywnych metodach tłumienia elementów płytowych i belkowych. Przedstawiono model trójwymiarowy, który będzie służył do dalszych analiz. Przeprowadzono przykładowe analizy, modalną oraz stanów przejściowych. Dzięki wynikom z analizy modalnej wykonanej w programie ANSYS oraz wynikom rozwiązania analitycznego potwierdzono poprawność modelu 3D. Kolejne badania będą miały na celu budowę systemu sterowania tłumieniem kilku pierwszych form własnych. Ostatecznie wybrano analizę stanów przejściowych do testowania możliwości sterowania. W przyszłości dalsze badania doprowadzą do wyboru najbardziej optymalnego algorytmu sterowania.

#### Literatura

- [1] Brański A., Szela S., *Improvement of Effectiveness in Active Triangular Plate Vibration Reduction*, Archives of Acoustics, Vol. 33, No. 4, 2008, 521-530.
- [2] Elliott S.P., Nelson P.A., *Control of Vibrations*, Academic Press, London 1997.
- [3] Kozień M.S., *Promieniowanie akustyczne płyt i powłok o małej wyniosłości*, Monografia, Mechanika nr 331, Politechnika Krakowska, Kraków 2007.
- [4] Moheimani S.O.R., Fleming A.J., *Piezoeleric Transducers for Vibration Control and Damping*, Springer, London 2006.
- [5] Wiciak J., *Wybrane zagadnienia redukcji drgań i dźwięków strukturalnych*, Monografia, nr 175, AGH Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2008.
- [6] Kurnik W., Tylikowski A., *Mechanika elementów laminowanych*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1997.



- [7] Tylikowski A., Przybyłowicz P.M., *Nieklasyczne materiały piezoelektryczne w stabilizacji i tłumieniu drgań*, Instytut Podstaw Budowy Maszyn PW, 2004.
- [8] De Abreu G.L.C.M., Ribeiro J.F., V.Steffen., *Finite Element Modeling of a Plate with Localized Piezoelectric Sensors and Actuators*, J. Braz. Soc. Mech. Sci.&Eng. 2, 2004, 117-127.