

ŁUKASZ ŚCISŁO\*

STEROWALNE MATERIAŁY INTELIGENTNE  
W BUDOWNICTWIECONTROLABLE SMART MATERIALS  
IN CIVIL ENGINEERING

## Streszczenie

Dzięki rozwojowi techniki i materiałoznawstwa coraz więcej nowych materiałów znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach techniki, w tym także w budownictwie. Jedną z ciekawszych możliwości wartych bacznej uwagi może być pewna klasa materiałów, w bibliografii określana jako materiały inteligentne (*smart materials, intelligent materials*). Konstrukcje inteligentne znalazły szczególne zastosowanie tam, gdzie wymagane jest szybkie i skuteczne tłumienie dźwięków i wibracji. Jednym z głównych zagadnień artykułu jest pokazanie kilku możliwych rozwiązań aplikacyjnych wykorzystujących materiały inteligentne w budownictwie. Przedstawiony zostanie przegląd literatury i zastosowań oraz pokazane zostaną przykładowe aplikacje autora. Szczególna uwaga zostanie skupiona na cieczy magneto-reologicznej (MR) oraz przetwornikach piezoelektrycznych (PZT) jako klasie materiałów mogących mieć szerokie zastosowanie we współczesnym budownictwie, zwłaszcza w budowie konstrukcji mostowych. Zaprezentowane zostanie także wykorzystanie tłumika MR w celu tłumienia drgań długich lin mostów podwieszanych oraz zastosowanie przetworników piezoelektrycznych wykorzystywanych do tłumienia drgań i dźwięków wytworzonych przez wibrującą strukturę płytowo-belkową, taką, jaka występuje w przypadku mostów kratownicowych.

*Słowa kluczowe: materiały inteligentne, tłumienie drgań, materiały piezoelektryczne, cieczy MR, elementy tłumiące*

## Abstract

Due to development of modern technologies and material science more new materials can be implemented in many different fields, including civil engineering. One of the most interesting possibilities is the use of the special class of materials which in literature are being referred to as smart or intelligent materials. Intelligent structures can be especially used in cases where fast and efficient way of damping sounds and vibrations is required. The focus of the paper is to show a few possible implementations in civil engineering where smart materials may be used. The current research will be presented as well as two of the possible implementations developed by the author. Two types of the controllable materials will be presented, magneto-rheological fluid (MR) used in MR damper and piezoelectric transducers (PZT) used in vibrations suppression systems, as the classes of materials which can be used in many applications in modern civil engineering- especially in bridges structures. The application where MR damper is being used for vibration mitigation system for long lines of cable stayed-bridges will be shown as well as application where the system of piezoelectric transducers is used for damping sounds and vibrations of plate and beam structures. Such structures are used for plate girder or truss bridges.

*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

W ostatnich latach istotne zagadnienie stanowi opracowanie najbardziej efektywnych metod tłumienia drgań zachodzących w maszynach i urządzeniach przemysłowych. Drgania zachodzą w środowisku naturalnym oraz w środowisku człowieka. Praca wszelkich urządzeń i maszyn, zarówno bardzo prostych, jak również o skomplikowanej budowie, ściśle związana jest z procesami powstawania drgań w nich samych lub w ich otoczeniu. Człowiek styka się również z drganiami wynikającymi z działania sił przyrody, zwykle od niego niezależnymi, jak np. wstrząsy sejsmiczne, burze, sztormy, a nawet opady drobnego deszczu czy śniegu. Zjawiska te mają zazwyczaj charakter losowy.

Naukowcy coraz częściej interesują się materiałami wielofunkcyjnymi, które mogą być wykorzystywane między innymi do budowy tłumików lub układów tłumiących. Dzięki stosowaniu materiałów inteligentnych można łączyć wiedzę z zakresu takich dziedzin, jak: teoria drgań, dynamika maszyn i budowli, materiałoznawstwo, informatyka i teoria sterowania.

Niniejszy artykuł zwraca szczególną uwagę na ciecze magnetoreologiczne oraz materiały piezoelektryczne jako przykłady materiałów inteligentnych. W dzisiejszych czasach tłumiki MR często stosuje się do tłumienia drgań lin mostów podwieszanych. Drgania takie mogą mieć bardzo duże amplitudy, a ich oddziaływanie może w niektórych przypadkach skutkować zniszczeniem konstrukcji. Wibracje takie powstają nawet w wyniku działalności wiatru o niewielkim nasileniu lub zalegania śniegu na linach. Dlatego zachodzi konieczność rozpatrywania najlepszych sposobów minimalizacji skutków powstania drgań.

W pracy rozważono linę, na której zamontowano tłumik na ciecz magnetoreologiczną. Badany jest tu sposób postępowania przy wyznaczaniu optymalnego tłumienia drgań powstałych w linie pod wpływem przyłożonego impulsu siły. Na podstawie opracowania tematu sterowania optymalnego będzie można w przyszłości zbudować realny układ i sprawdzić, jak wyniki otrzymane w tejsze pracy odnoszą się do wyników rzeczywistych.

Badany jest także układ składający się z belki oraz zamocowanych na jej powierzchni elementów piezoelektrycznych. Rozważany jest sposób zamocowania elementów oraz różnego rodzaju sposoby tłumienia drgań za pomocą tych elementów.

Rozwój wiedzy na temat materiałów oraz nowoczesna technika komputerowa doprowadziła do zapoczątkowania badań nad połączeniem tych dwóch dziedzin. Odkrycia w materiałoznawstwie stwarzają możliwości do zastosowania konkretnych materiałów wielofunkcyjnych. Z drugiej strony, szybki rozwój technologii informatycznych doprowadził do powstania metodyki dla praktycznych aplikacji. Podejście takie pozwala na zbudowanie systemu, gdzie zintegrowany układ czujników umożliwia uzyskanie danych, przetwarzanych przez system kontrolny wytwarzający sygnał przekazywany do aktywatorów modyfikujących własności strukturalne w wymagany sposób.

Tak właśnie rodzi się nauka znana jako adaptronika, która zajmuje się badaniami nad tzw. materiałami inteligentnymi. W literaturze występują także nazwy, takie jak: materiały wielofunkcyjne, struktury inteligentne, systemy inteligentne, systemy adaptacyjne. Systemy takie mają zdolność adaptowania swoich funkcji w sposób inteligentny. Określenie adaptroniki jest używane do wszystkich systemów zawierających elementy konwencjonalnego regulatora i co najmniej jeden element posiadający cechę wielofunkcyjności.

Adaptronika jest więc nauką o strukturze i systemie, którego cechy albo zachowanie mogą być sterowane w określony sposób za pomocą inteligentnych materiałów i który

może adaptować się niezależnie od zakłóceń i warunków pracy. Początki adaptroniki możemy znaleźć przede wszystkim w materiałoznawstwie, ale także w automatyce i informatyce.

Materiały inteligentne to takie materiały, które mają możliwość wewnętrznej odpowiedzi na zewnętrzne wymuszenie w użyteczny dla nas sposób. Wymuszenie zewnętrzne może spowodować zmianę w otoczeniu materiałów, taką jak: temperatura, pole elektryczne i magnetyczne, wilgotność, ciśnienie, oświetlenie. Odpowiedzią na taką zmianę będzie zmiana jednej z cech materiału inteligentnego: kształtu, przewodnictwa, rozmiaru, struktury, koloru, polaryzacji, czy własności magnetycznych.

Na szczególną uwagę zasługują wielofunkcyjne materiały magnetoreologiczne, elektroreologiczne, termoelektryczne i mechanoreologiczne. 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 organ wykonawczy, sensory i kontrolery są zintegrowane z materiałami na poziomie mikro- i makroskopowym. Zazwyczaj organ wykonawczy i sensory są zbudowane z materiałów takich jak: piezoelektryki, stopy z pamięcią kształtu, ciecze magnetoreologiczne, ciecze elektroreologiczne itp.

W zależności od rodzaju reakcji możemy wyróżnić materiały reagujące na:

- temperaturę,
- 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.

### 1.1. Zastosowanie materiałów MR i PZT w budownictwie

Jednym z ciekawszych zastosowań materiałów inteligentnych są tłumiki na ciecz magnetoreologiczną stosowane w budownictwie w celu zabezpieczenia budynków i mieszkań od drgań sejsmicznych. Według badań naukowych urządzenia takie zwiększają możliwości kontrole w systemach chroniących przed trzęsieniami Ziemi, w tym nie tylko przed głównymi wstrząsami, ale także wstrząsami następczymi. Ruchy sejsmiczne powodują, że każde kolejne piętro przekazuje drgania następnemu. Nadmierny ruch, który może być zagrożeniem dla budynku i przedmiotów znajdujących się wewnątrz, jest kontrolowany przez rozpraszanie energii mechanicznej przez kolumnę tłumików. Zazwyczaj w przypadku wieżowców aż 1,5%–2,5% kosztów budowy przeznaczają się na ograniczenie zagrożeń sejsmicznych. Przy zastosowaniu amortyzatorów magneto-reologicznych kwotę tę można znacznie ograniczyć. Pierwszy budynek, w którym zastosowano tłumiki magnetoreologiczne, to otwarty w lipcu 2001 w Tokio, w Japonii budynek Narodowego Muzeum Inżynierii, Nauki i Innowacji (Nihon-Kagaku-Mirakan). Podobne zagadnienia poruszane były w pracach [2, 4, 17].

W drugiej połowie XX wieku bardzo popularne stało się budowanie mostów podwieszanych, czyli takiego rodzaju mostu wiszącego, w którym obciążenia części jezdnej prze-

noszone są na pylonie przez stalowe wanty. Z biegiem czasu zaczęto budować mosty o coraz dłuższych przęsłach. Pierwszy most, którego główne przęsło przekroczyło 500 m, to otwarty na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku Skarnsund Bridge w Norwegii. Inne osiągnięcia końca ostatniego stulecia to: Yang Pu Bridge (Chiny, 1993, główne przęsło 602 m), Normandie Bridge (Francja, 1994, 856 m), Tataka Bridge (Japonia, 1999, 890 m). Są to bardzo lekkie struktury, skonstruowane według najnowszych osiągnięć z dziedziny budownictwa. Budowle te, a zwłaszcza kable, są narażone na wibracje głównie z powodu warunków atmosferycznych, co jest przyczyną ich małego tłumienia wewnętrznego, relatywnie małej masy, dużej plastyczności oraz długości. Ogromne szkody mogą zostać wyrządzone z powodu wibracji kabli o dużej amplitudzie [10, 14, 15].

Według badań przeprowadzonych w ciągu ostatnich kilku lat większość drgań spowodowana jest przez specyficzne interakcje deszczu i wiatru. Takie wibracje po raz pierwszy zaobserwowano na moście Meiko-Nishi w Japonii. Drgania pojawiły się w warunkach słabego lub średniego wiatru (5,15 m/s) i słabego deszczu. Ta mieszanka wiatru i deszczu wzbudziła wibracje kabli w kilku pierwszych modach, z częstotliwością 1,3 Hz i amplitudą osiagającą 1 m. Od tego czasu rozpoczęto badania nad innymi przyczynami takiego stanu rzeczy. Jeden z największych stopni wibracji zaobserwowano na moście Oresund, który łączy Danię i Szwecję, podczas ciężkich opadów śniegu. Drgania te zostały najprawdopodobniej wzbudzone przez mokry śnieg osiadający na powierzchni kabli. Amplituda wibracji kabli wynosiła prawie 3 m, a okres trwania zjawiska ponad godzinę. Podobne drgania obserwowano dwukrotnie na moście Dubrowni w Chorwacji, gdzie w wyniku tego procesu uszkodzona została izolacja kabli.

W celu ograniczenia wibracji przy mocowaniach kabli często montowane są zewnętrzne tłumiki wiskotyczne, co ma poprawić tłumienie drgań przez liny. W celu dobrej amortyzacji każda lina musi być oddzielnie nastrojona. W praktyce bardzo trudno jest określić dominującą formę drgań, do której tłumik wiskotyczny musi być nastrojony, co więcej, w określonych warunkach dominująca moda może być różna dla różnych lin. Należy także nadmienić, że im dłuższe są kable, tym trudniejsze jest tłumienie ich wibracji. W dzisiejszych czasach mosty o głównym przęsle mającym ponad 1000 m i linach o długości ponad 550 m to już codzienność. Przykładem mogą być mosty Stonecutters (Hongkong, główne przęsło 1018 m, maksymalna długość liny 536 m) i Sutong (Chiny, 1088 m, 577 m). Z powodów praktycznych zewnętrzne tłumiki mocowane są na odległości 1–2% od mocowania lin, co w pewnym stopniu ogranicza możliwości tłumienia. Z tego powodu, jak również z wspomnianej wcześniej konieczności strojenia każdego z amortyzatorów osobno, poszukiwane są nowe rozwiązania. Najbardziej obiecującą możliwością jest stosowanie tłumików magnetoreologicznych na podobnej zasadzie, jak te wiskotyczne. Zaletą urządzeń magnetycznych jest to, iż ich charakterystyka tłumienia może być w łatwy sposób adaptowana w zależności od warunków atmosferycznych.

Pierwszą aplikacją implementującą tłumiki magnetoreologiczne w budowie mostu była zamontowana w 2002 roku w Chinach na moście Dongting Lake.

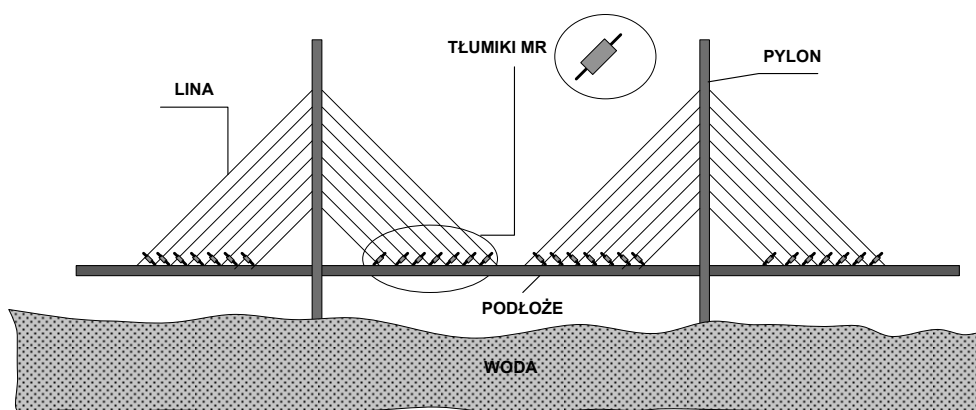
Możliwe jest stosowanie rozwiązań magnetoreologicznych w ochronie mostów i ich użytkowników. Przykładem mogą być tłumiki firmy Lord Corp., które zamontowane do lin mostu zapewniają kontrolowane w sposób ciągły, relatywnie tanie rozwiązanie chroniące mosty przed zjawiskiem „galopu” (drgań powstałych w wyniku działalności wiatru i deszczu). Według wielu badań m.in. [10, 14, 15] amortyzatory na ciecz magnetoreologiczną mają sprawność kilkukrotnie większą niż standardowe tłumiki wiskotyczne.

W ostatnich latach materiały piezoelektryczne stały się niezwykle popularne w badaniach z zakresu kontroli drgań i ochrony przed hałasem. W systemach kontroli drgań używane są zarówno jako sensory, jak i aktuatory. Zaletą stosowania elementów piezoelektrycznych w tłumieniu drgań, w porównaniu np. z cieczami magnetoreologicznymi, jest stabilność takiego systemu. Materiały takie mogą być naklejane na różne powierzchnie, choć największą skuteczność mają, oddziałując na cienkie powierzchnie metalowe.

Materiały takie używa się także w technikach pomiarowych jako nieniszcząca metoda badania wad w materiałach i konstrukcjach.

## 2. Implementacja tłumika MR w konstrukcji mostów podwieszanych

Jak już wspomniano w poprzednim rozdziale, tłumiki na ciecz magnetoreologiczną można wykorzystać przy tłumieniu drgań występujących w linach mostów podwieszanych. Prace nad takimi rozwiązaniami prowadzi obecnie wiele ośrodków badawczych [7, 9]. Rysunek 1 przedstawia przykład aplikacyjny dla mostu podwieszanego gdzie zastosowano semiaktywne tłumiki MR do tłumienia drgań kilku niższych częstotliwości drgań własnych dla każdej z lin mostu.



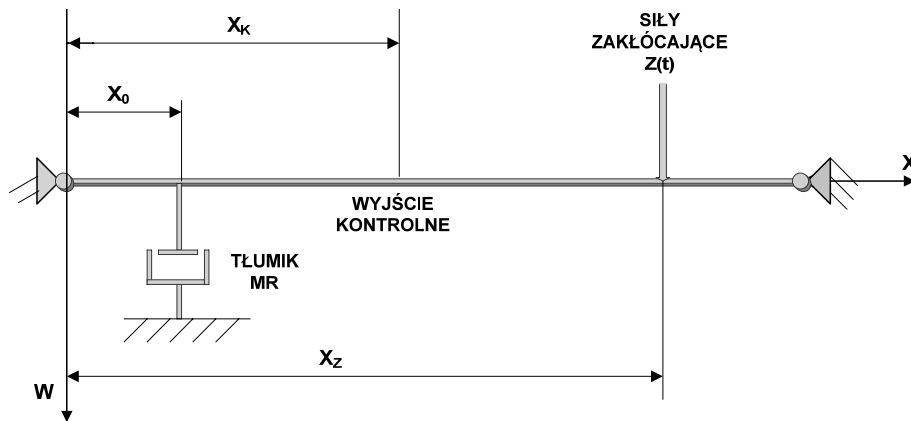
Rys. 1. Układ tłumików MR dla mostu podwieszanego (schemat autora)

Fig. 1. MR damper system for suspended bridge (schema by the author)

Przedstawiony przykład pokazuje jedną z możliwych koncepcji sterowania tłumikiem magnetoreologicznym, który w sposób optymalny tłumić drgania  $n$  pierwszych form drgań liny wywołanych impulsem siły oddziałującym w dowolnym punkcie liny.

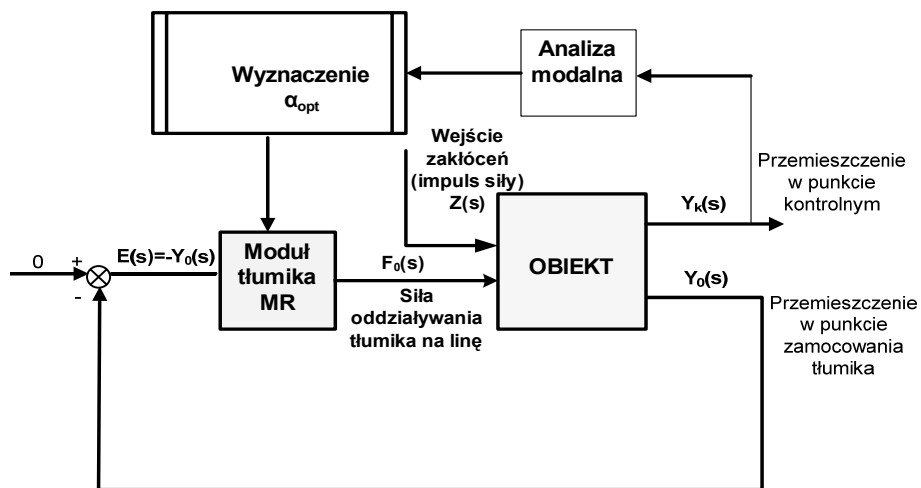
Przypadek opisywany na rysunku 1 rozdzielono na mniej ogólne przypadki, gdzie procesowi kontroli podlegać będą pojedyncze liny mostu. Rysunek 2 przedstawia schemat układu wraz z podstawowymi oznaczeniami oraz przyjętym układem współrzędnych.

Przyjęto, iż układ sterowania działał będzie według schematu określonego na rysunku 3.



Rys. 2. Schemat analizowanego układu (schemat autora)

Fig. 2. The diagram of the analyzed system (schema by the author)



Rys. 3. Schemat układu sterowania (schemat autora [12])

Fig. 3. Control system diagram (schema by the author)

Kryterium optymalności jest związane z możliwie szybkim zanikiem ruchu liny. Funkcję ograniczającą od góry przemieszczenie po upływie czasu  $t_k$  można zapisać w postaci

$$FunkCelu = \sum A_i e^{-\alpha_i t_k} \quad (1)$$

gdzie:

- $A_i$  – amplituda drgań  $i$ -tej formy,
- $\alpha_i$  – współczynnik tłumienia  $i$ -tej formy,
- $t_k$  – czas kontroli funkcji ograniczającej przebieg czasowy.

Szczegółowe wyniki symulacji dla wielomodalnego tłumienia drgań długich lin dla jednego z możliwych przypadków autor przedstawił w publikacji [12].

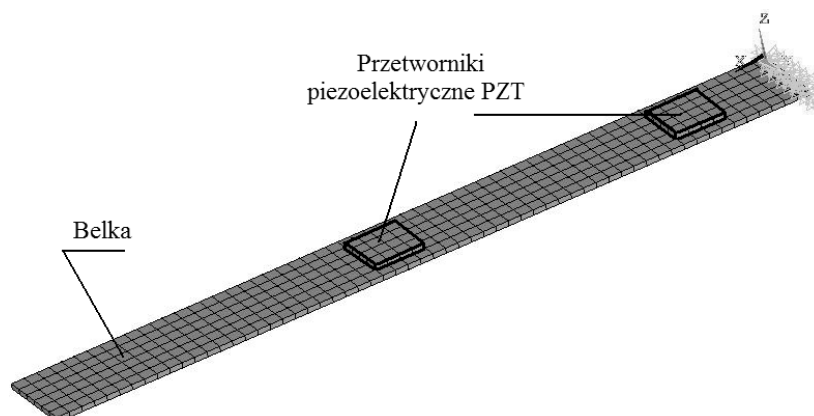
### 3. Implementacja przetwornika PZT w elemencie płytowo-belkowym

Zastosowanie odpowiednio sterowanych elementów piezoelektrycznych, rozmieszczonych w odpowiedniej konfiguracji na powierzchni drgającej belki jest jedną ze współcześnie rozwijanych metod redukcji ich drgań.

Problem kontroli drgań w elementach belkowych wspornikowych badany był przez wielu naukowców [3, 13].

Belki wspornikowe używane są w budownictwie w bardzo szerokim zakresie. Z ciekawszych implementacji materiałów piezoelektrycznych w budownictwie można wymienić mosty kratownicowe, gdzie struktury takie użyto do tłumienia elementów belkowych.

Dźwigary kratowe (kratownice) projektuje się jako układy prostych i sztywnych prętów, przenoszących osiowe siły ściskające i rozciągające, połączonych ze sobą przegubowo w węzłach. Najkorzystniejszym układem pod względem wykonawczym i konstrukcyjnym jest kratownica w kształcie litery W (rys. 4). Kratownice o takim kształcie są wykonywane dla mostów kolejowych o rozpiętości od 60 do 120 m.



Rys. 4. Schemat belki wraz z elementami piezoelektrycznymi i obwodem elektrycznym (schemat autora)

Fig. 4. The diagram of the beam with piezoelectric elements and electrical circuit (schema by the author)

W przypadku analiz numerycznych, zwłaszcza w przypadku modelowania metodą elementów skończonych w środowisku ANSYS, często pojedyncze „pręty” modeluje się jako elementy belkowe.

Elementy piezoelektryczne – akulatory – 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 [1, 3, 5, 6, 8, 11, 16].

W pracy przeanalizowano przykład pasywnego tłumienia drgań jednostronnie umocowanej belki dla pojedynczej częstotliwości rezonansowej. Drgania wymuszane były siłą 100 N przyłożoną w węzle znajdującym się na końcu belki. Analiza przeprowadzona została metodą elementów skończonych w programie ANSYS a wyniki zostaną w przyszłości zweryfikowane na stanowisku pomiarowym.

Belka oraz warstwa kleju zostały zamodelowane przez cztery warstwy elementów brylowych solid45, a przetworniki piezoelektryczne jako element pól sprzężonych typu solid5. Redukcję drgań w sposób pasywny przeprowadzono przez dołączenie do elektrody elementu piezoelektrycznego odpowiednio dobranego dwójnika szeregowego RL dla drugiej częstotliwości rezonansowej (rozwiązanie zaprezentowane przez Hagooda i von Flotowa). W obliczeniach numerycznych obwód elektryczny zamodelowano przez skupione elementy elektryczne typu circu94.

Dla zamodelowanej belki z elementami piezoelektrycznymi wykonano analizę modalną w celu określenia częstotliwości rezonansowych. W metodzie pasywnej [19] przez analizę statyczną modelu wyznaczono pojemność przetwornika piezoelektrycznego (iloraz ładunku i napięcia). Dobrano także odpowiednie dla drugiej częstotliwości indukcyjność i oporność w celu stworzenia elektrycznego obwodu rezonansowego (dwójnik szeregowy RLC).

W częstotliwości rezonansowej układu mechanicznego pojawia się antyrezonans, dla którego amplituda drgań jest bardzo silnie zmniejszona.

#### 4. Wnioski

Artykuł przedstawia analizę zagadnienia możliwości stosowania kontrolowalnych materiałów inteligentnych w zagadnieniach inżynierii lądowej. Szczególną uwagę zwrócono na ciecze magnetoreologiczne i przetworniki piezoelektryczne, jako klasę materiałów mogących w szczególnie łatwy sposób być implementowane, zwłaszcza w budownictwie.

Przedstawione dwa przypadki badawcze: dla mostu podwieszanego z zastosowaniem semiaktywnych tłumików MR oraz dla mostów kratownicowych z zastosowaniem elementów PZT pokazują możliwości struktur inteligentnych, w szczególności jeśli chodzi o zagadnienia tłumienia drgań i hałasu.

#### 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] Cao H., Reinhorn M., Soong T.T., *Design of an Active Mass Damper for a Tall TV Tower in Nanjing*, Engineering Structures, Vol. 20, 1998, 134-143.
- [3] 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.
- [4] Dyke S.J., Spencer B.F., Sain M.K., Carlson J.D., *An Experimental Study of MR Dampers for seismic protection*, Smart Mater Structures, 1998, 693-703.
- [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 – Mechanika 331, Politechnika Krakowska, Kraków 2007.
- [7] Maślanka M., Sapiński B., Snamina J., *Experimental Study of Vibration Control of Cable with Attached MR Damper*, Journal of the Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 45, 2007.
- [8] Moheimani S.O.R., Fleming A.J., *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*, Springer, London 2006.
- [9] Sapiński B., *Linear Magnetorheological Fluid Dampers for Vibration Mitigation*, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2004.
- [10] Sun L., Zhang Q., Chen A., Lin Z., *Cable vibration control countermeasures and structural health monitoring system design of Sutong Bridge*, Proceedings of 12<sup>th</sup> International Symposium of Students and Young Mechanical Engineers, Safety and Management, Kyoto 2004.
- [11] Ścisło Ł., *FEM Analysis of a Beam for Piezoelectric Passive Vibration Control System*, Czasopismo Techniczne, z. T-8, M-2/2010, Kraków 2010.
- [12] Ścisło Ł., *Optimal Vibration Control of a Cable with MR Damper Attached*, Proceedings of 12<sup>th</sup> International Symposium of Students and Young Mechanical Engineers, Gdańsk 2009.
- [13] Tylikowski A., Przybyłowicz P.M., *Nieklasyczne materiały piezoelektryczne w stabilizacji i tłumieniu drgań*, Instytut Podstaw Budowy Maszyn PW, 2004.
- [14] Wang X., Gordaninejad F., *Lapunow-based Control of a Bridge Using Magnetorheological Fluid Damper*, Research Poster, Composite and Intelligent Materials Laboratory, University of Nevada, USA, 2005.
- [15] Wang X., Ni Y., Ko J.M., Chen Z.Q., *Optimal Design of viscous dampers for multi-mode vibration control of bridge cables*, Engineering Structures, Vol. 27, 2005, 729-800.
- [16] Wiciak J., *Wybrane zagadnienia redukcji drgań i dźwięków strukturalnych*, Monografia nr 175, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2008.
- [17] Yi F., Dyke S.J., *Performance of smart structures*, Proc SPIE, 2000, 94-104.