

Aktuatory piezoelektryczne w inteligentnych kratownicach

Dariusz Grzybek

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział IMiR, Katedra Automatykacji Procesów

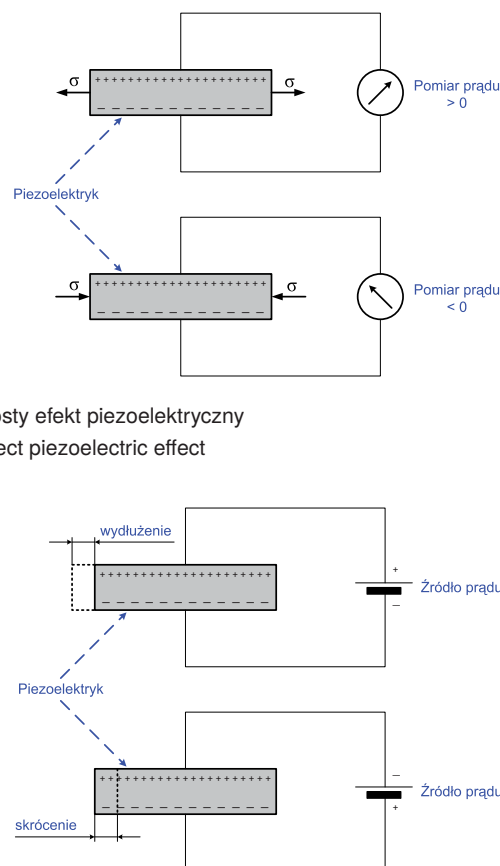
Streszczenie: Artykuł dotyczy zastosowania aktuatorów piezoelektrycznych do redukcji drgań kratownic. Kratownice z odpowiednio wbudowanymi aktuatorami piezoelektrycznymi stanowią obiecujący kierunek badań, gdyż pozwalają na uzyskanie wysokiej stateczności struktury przy stosunkowo niskiej wadze. Spełnienie takich wymagań jest szczególnie ważne w przemyśle lotniczym. Podstawowym zagadnieniem w projektowaniu takich kratownic jest rozmieszczenie aktuatorów piezoelektrycznych i czujników przyspieszeń w strukturze kratownicy. W celu wprowadzenia aktuatorów piezoelektrycznych do struktury kratownicy projektuje się specjalne aktywne pręty, których rozmieszczenie wyznacza się np. na podstawie rozkładu energii odkształcenia w poszczególnych prętach kratownicy. Sterowanie aktywnymi prętami realizowane jest przez odpowiednie zmiany napięcia V_p zasilającego aktuatory piezoelektryczne znajdujące się w tych prętach. Układ sterowania powinien zawierać podstawową pętlę regulacji, która obejmuje wszystkie aktuatory, czujniki przyspieszeń oraz komputer/sterownik. Układ sterowania może również zawierać dodatkowe pętle regulacji, obejmujące pojedynczy aktuator oraz czujnik siły.

Słowa kluczowe: konstrukcja inteligentna, materiały piezoelektryczne, kratownica, drgania, sterowanie

1. Wstęp

Występujące w materiałach piezoelektrycznych zjawisko konwersji energii mechanicznej na energię elektryczną (prosty efekt piezoelektryczny – rys. 1a) pozwoliło na szerokie zastosowanie tych materiałów w budowie przetworników pomiarowych, np. mierników ciśnienia, momentu, siły itp. Odwrotny efekt piezoelektryczny (rys. 1b), polegający na konwersji energii elektrycznej na mechaniczną, jest wykorzystywany m.in. w układach redukcji drgań różnego rodzaju konstrukcji, np. płyt, belek, kratownic.

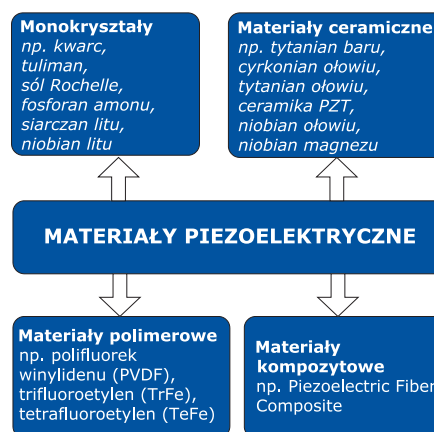
Obecnie znanych jest wiele materiałów wykazujących efekty piezoelektryczne (rys. 2). Konstrukcje zawierające w swojej strukturze materiał piezoelektryczny, będący elementem układu sterowania wybraną cechą tej konstrukcji nazywane są inteligentnymi (w literaturze angielskiej funkcjonuje przymiotnik *smart*). Dokładniej rzecz ujmując, inteligentną konstrukcją nazywa się strukturę inżynierską o znacznym stopniu autonomii, która umożliwia optymalne działanie, zapewnia adaptacyjną funkcjonalność i minimalizuje globalny koszt obsługi i eksploatacji tej konstrukcji [14]. Pierwsze prace naukowe dotyczące konstrukcji inteligentnych, zawierających materiały piezoelektryczne wykorzystywane do tłumienia drgań tych konstrukcji, powstały w latach 80. XX wieku, np. wykorzystanie folii PVF₂ zostało



a) prosty efekt piezoelektryczny
a) direct piezoelectric effect

b) odwrotny efekt piezoelektryczny
b) inverse piezoelectric effect

Rys. 1. Konwersja energii w materiałach piezoelektrycznych
Fig. 1. Energy conversion in the piezoelectric materials



Rys. 2. Podstawowe grupy materiałów piezoelektrycznych
Fig. 2. Basic groups of the piezoelectric materials

opisane w 1985 r. przez Baileya i Hubbarda [2]. W obecnie publikowanych pracach autorzy skupiają się na opracowaniu efektywnych algorytmów sterowania elementami piezoelektrycznymi, które stanowią integralne części konstrukcji [13].

W przemyśle lotniczym oraz astronautyce trwają nieustannie poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych, które poprawią właściwości eksploatacyjne budowanych samolotów, satelitów, stacji orbitalnych [12] itp. Znaczącym elementem latających obiektów są kratownice. Trudne warunki eksploatacji w atmosferze lub w przestrzeni okołozemskiej zmuszają konstruktorów do poszukiwania rozwiązań kratownic, które posiadałyby zarówno odpowiednie właściwości dynamiczne, gwarantujące stateczność struktury jak i miały niską wagę, co będzie prowadzić do redukcji kosztów ich budowy i eksploatacji. Oba wymagania są przeciwstawne, gdyż lekka struktura zwykle charakteryzuje się niskim współczynnikiem wewnętrznego tłumienia drgań. Jednym z potencjalnych rozwiązań, pozwalających na jednoczesną realizację tak postawionych wymagań, jest wprowadzenie do konstrukcji kratowej elementów z materiałów piezoelektrycznych, spełniających funkcję aktuatora lub/i sensora w układzie sterowania drganiami. Elementy piezoelektryczne mogą być zaimplementowane poprzez zastąpienie wybranych prętów kratownicy aktywnymi prętami zawierającymi aktuator piezoelektryczny. Zgodnie z przedstawioną wcześniej definicją, można tak zbudowaną konstrukcję nazwać inteligentną.

2. Budowa inteligentnych kratownic

2.1. Aktuatory piezoelektryczne

Aktuatorami nazywa się elementy wykonawcze, których zadaniem jest generowanie sił lub przemieszczeń na podsta-

Tab. 1. Parametry wybranych aktuatorów komercyjnych

Tab. 1. Parameters of the chosen commercial actuators

Nazwa aktuatora	Max. siła generowana F_p [N]	Max. skok aktuatora Δ [μ m]	Max. napięcie zasilające V [V]	Szywność piezoelektryka k_p [N/ μ m]
Piezomechanik PSt150/20/190/V525	11 000	250	150	40
Piezomechanik PSt 1000/35/80	50 000	105	1 000	450
Physic Instrumente P-235-90	30 000	180	1 000	150



a) aktuatory Physic Instrumente
a) Physic Instrumente actuators



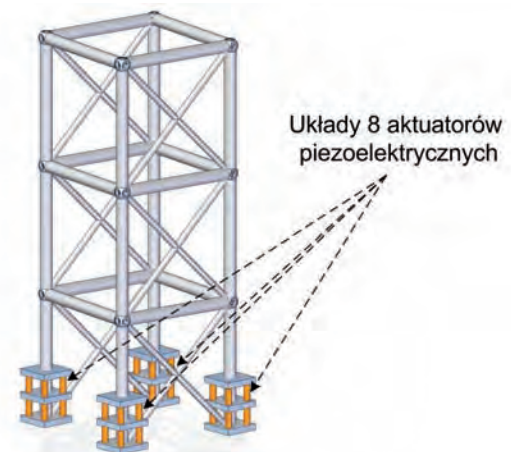
b) aktuatory Piezomechanik
b) Piezomechanik actuators

Rys. 3. Przykłady komercyjnych aktuatorów [16, 17]

Fig. 3. Examples of the commercial actuators [16, 17]

wie sygnałów sterujących. Najczęściej wykorzystywanym materiałem do budowy aktuatorów piezoelektrycznych jest ceramika PZT. Ceramika PZT powstaje przez spiekanie tytanianu i cyrkonianu ołowiu z niewielkimi domieszkami tlenku niklu i tlenku manganu. PZT charakteryzuje się silnym zarówno prostym jak i odwrotnym efektem piezoelektrycznym, stąd znajduje szerokie zastosowanie zarówno w budowie czujników jak i aktuatorów. Obecnie aktuatory są dostępne w ofercie wielu firm, wśród których najbardziej znane to: Piezomechanik (rys. 3a), Physic Instrumente (rys. 3b) oraz Cedrat. Uzyskiwane przez aktuatory siły osiągają wartość kilkudziesięciu kN (tab .1).

W [7] przedstawiono wyniki badań układu sterowania drganiami czteropoziomowej konstrukcji kratowej o wysokości 3,7 m i wadze 2000 kg (rys. 4).



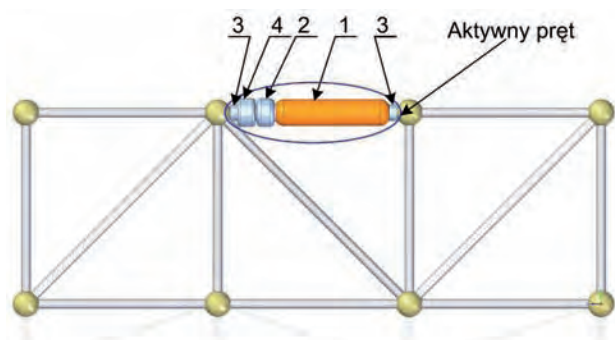
Rys. 4. Rozmieszczenie aktuatorów piezoelektrycznych w konstrukcji kratowej [7]

Fig. 4. Arrangement of piezoelectric actuators in the truss structure

Do sterowania drganiami wykorzystano 32 aktuatory piezoelektryczne, rozmieszczone u podstawy konstrukcji kratowej. Każdy aktuator o wymiarach 25×25×36 mm generował siłę o wartości 19,6 kN przy 100 V napięcia zasilającego. Uzyskano 12 % redukcję drgań kratownicy, poddanej sinusoidalnemu wymuszeniu. W przedstawionej aplikacji nie zastosowano specjalnie zaprojektowanych aktywnych prętów, a jedynie – zewnętrznie montowane do podstawy konstrukcji – aktuatory piezoelektryczne.

Konieczność dostosowania się do przestrzennej struktury kratownicy wymaga zaprojektowania i wykonania dedykowanych aktywnych prętów, które zawierają aktuator piezoelektryczny, przetwornik siły oraz elementy mechaniczne, pozwalające na montaż pręta w strukturze kratownicy. W bardziej rozbudowanych aktywnych

prętach stosuje się również czujnik przemieszczenia [15]. Główne elementy aktywnego pręta kratownicy przedstawiono na rys. 5.



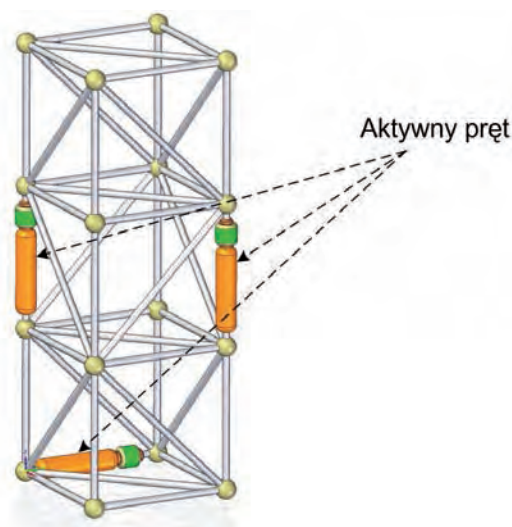
Rys. 5. Główne elementy aktywnego pręta kratownicy. 1 – aktyuator piezoelektryczny, 2 – czujnik siły, 3 – zamocowanie, 4 – czujnik przemieszczenia

Fig. 5. Main elements of active truss bar. 1 – piezoelectric actuator, 2 – force sensor, 3 – fix, 4 – displacement sensor

Najważniejsze cechy aktywnego pręta kratownicy wynikają z własności zastosowanego aktywnego piezoelektrycznego: generowanej siły, napięcia zasilania, sztywności, pojemności.

2.2. Przestrzenne rozmieszczenie aktyuatorów w strukturze kratownicy

W konstrukcjach o mniejszej wadze możliwe jest zastąpienie wybranych prętów kratownicy aktywnymi prętami, zawierającymi aktyuator piezoelektryczny. Rozmieszczenie przestrzenne tych prętów może być różne. Na rys. 6 przedstawiono przykładowe umiejscowienia aktywnych prętów w kratownicy. Wybór lokalizacji aktywnych prętów w strukturze kratownicy w bezpośredni sposób wpływa na efektywność tłumienia drgań i jest uzależniony od tego, które postaci drgań projektant chce tłumić. Spośród metod wyznaczania najbardziej korzystnej lokalizacji aktywnych prętów można



Rys. 6. Przykładowe rozmieszczenie aktywnych prętów [5, 4]

Fig. 6. Exemplary arrangement of the active bars [5, 4]

wyróżnić metodę bazującą na określaniu największej energii odkształcenia [10] oraz metody optymalizacji ogólnego zastosowania Simulated Annealing oraz Genetic Algorithm [6].

W pierwszej metodzie projektant oblicza stosunek energii odkształcenia poszczególnych prętów do ogólnej energii odkształcenia kratownicy, zgodnie ze wzorem:

$$v_i = \frac{k_p (b_p^T \Phi_i)^2}{\omega_i^2} \quad (1)$$

gdzie k_p – sztywność piezoelektryka, b_p – wektor współczynników uwzględniających lokalizację siły generowanej przez aktywny pręt w globalnym układzie współrzędnych, w którym opisana jest kratownica, ω_i – i -ta częstość drgań własnych kratownicy, Φ_i – postaci drgań własnych odpowiadające i -tej częstości drgań własnych. Większa wartość v_i dla n -tego pręta oznacza większy wpływ tego pręta na i -tą postać drgań własnych. Stąd projektant, zgodnie z tą metodą, powinien wybrać umiejscowienia w kratownicy aktywnych prętów tak, aby zastępowały pasywne pręty o największej wartości v_i dla poszczególnych postaci drgań własnych.

3. Sterowanie inteligentnymi kratownicami

Konstrukcję kratową z aktyuatorami piezoelektrycznymi można w przybliżeniu opisać liniowym równaniem ruchu [8], w którym uwzględniono siłę generowaną przez aktyuator piezoelektryczny F_p [9]:

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + Kq = bF + b_p F_p \quad (2)$$

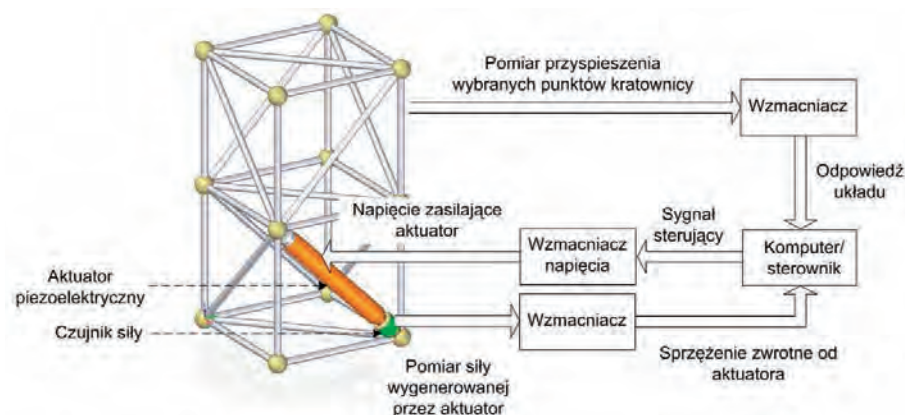
gdzie q – przemieszczenie, M i K są to macierze mas i sztywności struktury kratowej, C – macierz współczynników tłumienia, F – siła od obciążenia zewnętrznego. Siła F_p składa się z dwóch składowych: siły generowanej pod wpływem przyłożonego napięcia oraz siły sprężystości aktyuatora [11]:

$$F_p = \frac{e_{13} A}{L} V_p - k_p q \quad (3)$$

gdzie e_{13} – stała materiałowa piezoelektryka [Cm^{-2}], A – przekrój piezoelektryka w aktyuatorze [m^2], L – długość piezoelektryka w aktyuatorze [m], V_p – napięcie zasilające aktyuator. Ostatecznie równanie ruchu opisujące inteligentną kratownicę ma postać:

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + (K + k_p) q = bF + \frac{e_{13} A}{L} V_p \quad (4)$$

Projektant może wpłynąć na wartość siły sprężystości $F_{ps} = k_p q$ jedynie przez wybór materiału piezoelektrycznego. Sterowanie inteligentnymi kratownicami polega więc na odpowiednim kształtowaniu siły wytwarzanej przez aktyuator F_p przez odpowiednią modyfikację sygnału sterującego, jakim jest wartość napięcia V_p , którym zasilane są poszczególne aktywatory piezoelektryczne. Układ sterowania inteligentną kratownicą składa się z podstawowej pętli regulacji, w skład której wchodzi aktywatory piezoelektryczne, czujniki przy-



Rys. 7. Schemat ideowy układu sterowania inteligentną kratownicą

Fig. 7. Schema of control system of the smart truss

spieszenia wybranych punktów kratownicy oraz komputer/sterownik z zaimplementowanym algorytmem sterowania. Układ sterowania może również obejmować pomocniczą pętlę zawierającą aktuator, czujnik siły wygenerowanej przez aktuator oraz komputer/sterownik (rys. 7).

Istotnym problemem do rozwiązania jest umiejscowienie czujników przyspieszenia w strukturze kratownicy. Podobnie jak dla aktywnych prętów powinno być znalezione optymalne umiejscowienie tych czujników. Można zastosować ten sam algorytm wyliczania pozycji jak dla aktywnych prętów [5].

Konstruktor inteligentnej kratownicy ma szerokie spektrum algorytmów sterowania, które może wykorzystać. W [15] przedstawiono wyniki badań sterowania inteligentną kratownicą z wykorzystaniem rozmytych sieci neuronowych. Dzięki zastosowaniu tego sterowania uzyskano skrócenie czasu tłumienia drgań o około 75 %. W [3] do sterowania aktywnymi prętami wykorzystano algorytm LQR, dzięki czemu zredukowano amplitudę drgań o około 50 %. W układzie sterowania przedstawionym w [1] wykorzystano odporny algorytm H_2 , co pozwoliło na redukcję amplitudy drgań w granicach 50–75 %. W [5] sterowanie zostało zrealizowane w oparciu o odporny algorytm H_∞ , a w [4] wykorzystano sterowanie modalne.

4. Podsumowanie

Badania nad konstrukcjami kratowymi z aktywnymi prętami zawierającymi aktuator piezoelektryczny są obecnie prowadzone w wielu laboratoriach naukowych. Zasadniczym celem budowy takich kratownic jest uzyskanie lekkiej konstrukcji i jednocześnie charakteryzującej się wysokim współczynnikiem wewnętrznego tłumienia drgań. Prace badawcze prowadzone są w trzech głównych obszarach:

- 1) opracowania rozwiązań konstrukcyjnych aktywnych prętów, zawierających aktuator piezoelektryczny, czujnik siły oraz specjalnie zaprojektowane zamocowanie pręta w strukturze kratownicy,
- 2) znalezienia najbardziej efektywnego rozmieszczenia aktywnych prętów oraz czujników przyspieszenia w strukturze kratownicy,

- 3) opracowania algorytmów sterowania, pozwalających na generowanie sygnałów sterujących aktuatorami piezoelektrycznymi na podstawie aktualnego stanu kratownicy. Obok wymienionych obszarów badawczych, poszukuje się również rozwiązań układów sterowania nie wymagających zasilania zewnętrznego. Energia do zasilania takich układów mogłaby być odzyskiwana z drgań sterowanej konstrukcji.

Wykonano w ramach pracy statutowej nr 11.11.130.560. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Automatykacji Procesów.

Bibliografia

1. Abreu G.L.C., Lopes V.: H_2 Optimal control for smart truss structure, Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications, Serra Negra 2010, 961–966.
2. Bailey W.S, Hubbard J.E.: *Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam*, „Control and Dynamics”, 1985, nr 8, 60–611.
3. Bueno D., Marqui C. Santos R., Neto C., Lopes V.: *Experimental active vibration control in truss structures considering uncertainties in system parameters*, „Mathematical Problems in Engineering”, 2008.
4. Carvalho R., Silva S., Lopes V.: *Modal control applications in intelligent truss structures*, ABCM Symposium Series in Mechatronics, vol. 1, 2004, 304–310.
5. Carvalho R., Silva S., Lopes V.: *Robust control applications for smart truss structure*, Conference & Exposition on Structural Dynamics, Brazylia 2005.
6. Degertekin S.O.: *A comparison of simulated annealing and genetic algorithm for optimum design of nonlinear steel space frames*, „Structural and Multidisciplinary Optimizaton” 2007, 347–359.
7. Kamada T.: *Active vibration control of frame structures with smart structures usisng piezoelectric actuators*, „Smart Materials and Structures”, 6/7, 448–456.
8. Lewandowski R.: *Dynamika konstrukcji budowlanych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
9. Preumont A.: *On the damping of a piezoelectric truss*, Mechanics of the 21st Century, Springer 2005.
10. Preumont A., Dufour J.P., Malekian C.: *Active damping by a local force feedback with piezoelectric actuators*, „Journal of Guidance, Control and Dynamic”, vol. 15, 1992, 390–395.
11. Qiu J., Jiang H., Ji H., Zhu K.: *Comparison between four piezoelectric energy harvesting circuits*, Front. Mech. Eng. China 2009, vol. 4(2), 153–159.
12. Sciocso F., Gasbarri P., Marianetti C., Togli Ch.: *Control of vibrations of the international space station*

with piezoelectric actuators, International Astronautical Federation, 2005, IAC-05-IAF-C2.4.08.

13. Seung-Bok Ch., Younh-Min H.: *Piezoelectric actuators. Control applications of smart materials*, CRC Press, 2010.
14. Tylikowski A.: *Konstrukcje inteligentne*, „Mechanika Teoretyczna i Stosowana”, 1997, nr 4.
15. Zheng K., Zhang Y., Yang Y., Yan S., Dou L., Chen J.: *Active Vibration Control of Adaptive Truss Structure Using Fuzzy Neural Network*, IEEE 2008, 4872–4875.
16. [www.piezomechanik.com] – Piezomechanik GmbH.
17. [www.physikinstrumente.com] – PI Leader in: Piezo Solutions, Nano-Positioning, Precision Motion Control, NanoAutomation, Piezo Stage, Hexapod, PZT, Piezo Actuator, Transducer: Sub-Nanometer Resolution, Metrology, Photonic Packaging Automation, Piezo Linear Motor, Steering Mirror, Translation Rotation Stage, MicroPositioning, Hexapods, Capacitance Sensor.

Piezoelectric actuators in the smart trusses

Abstract: The following article deals with the subject of piezoelectric actuators application to vibration reduction of trusses. The trusses with properly incorporated piezoelectric actuators are a promising research area, because such structures enable to obtain high structure stability with low weight. Fulfillment of such requirements is particularly important in the aviation industry. However, designer of such a truss has to solve the problem of the arrangement of the piezoelectric actuators and acceleration sensors in the truss structure. Special active bars are designed in order to introduce piezoelectric actuators to the truss structure. Arrangement of such active bars is determined, for example, on the basis of the strain energy distribution in each truss bars. The control of active bars is realized through the voltage changes which supply the piezoelectric actuators. Control system contains a basic control loop, which includes all actuators, acceleration sensors and computer. The control system can also contain additional control loops, which include a single actuator and force sensor.

Keywords: smart structure, piezoelectric materials, truss, vibrations, control

dr inż. Dariusz Grzybek

Jest adiunktem w AGH Akademia Górniczo-Hutnicza na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w Katedrze Automatykacji Procesów. W pracy naukowej zajmuje się sterowaniem wielowymiarowym obiektami dynamicznymi oraz wykorzystaniem materiałów inteligentnych w sterowaniu procesami.

e-mail: dariusz.grzybek@agh.edu.pl



4METAL.PL

Ponad 2000 podwykonawców z całego świata

[katalog firm] PONAD 2000 FIRM Z CAŁEGO ŚWIATA
PODZIELONYCH NA KATEGORIE

[giełda pracy] OGŁOSZENIA PRACOWNIKÓW
I PRACODAWCÓW Z BRANŻY

NEW [giełda materiałów] OGŁOSZENIA KUPNA I SPRZEDAŻY, SZCZEGÓLOWO
PODZIELONE NA GATUNKI I KSZTAŁTY MATERIAŁÓW

[giełda maszyn] PONAD 2300 AKTUALNYCH OGŁOSZEŃ
KUPNA I SPRZEDAŻY

[wydarzenia] LISTA TARGÓW I IMPREZ BRANŻOWYCH
ZE ŚWIATA

[aktualności] TECHNOLOGIE, WYWIADY, SPRAWOZDANIA,
WSZYSTKO CZEGO POTRZEBUJESZ

[media] INFORMACJE O CZASOPISMACH
BRANŻOWYCH Z CAŁEGO ŚWIATA

[video] RELACJE, WYWIADY,
PREZENTACJE



GET THE MEMBERSHIP

REKLAMA

energoelektronika.pl
ZAPRASZAMY
na IX edycję SZKOLENIA dla
SŁUŻB UTRZYMANIA RUCHU

LUBLIN 30 listopada 2011



ZDOBĄDŹ
CENNA
WIEDZĘ I KONTAKTY!!!

Więcej informacji na temat
szkolenia znajdziesz na stronie
www.seminarium.energoelektronika.pl



Partnerzy



Jeżeli jesteś zainteresowany zaprezentowaniem produktu lub nowego rozwiązania
napisz do nas na marketing@energoelektronika.pl