

DARIUSZ GRZYBEK*

WYKORZYSTANIE MECHANIZMU PRZETWARZANIA ENERGII W MATERIAŁACH PIEZOELEKTRYCZNYCH DO STEROWANIA DRGANIAMI

THE USE OF THE ENERGY CONVERSION MECHANISM IN THE PIEZOELECTRIC MATERIALS INTO THE VIBRATION CONTROL

Streszczenie

W artykule przedstawiono mechanizm konwersji energii w materiałach piezoelektrycznych oraz jego zastosowanie w układach odzyskiwania energii z drgań oraz układach sterowania drganiami. Przedstawiono model matematyczny przetwarzania energii, a także wybrane układy odzyskiwania energii oraz układy sterowania, w których wykorzystano to zjawisko.

Słowa kluczowe: materiały piezoelektryczne, drgania, sterowanie

Abstract

The paper summarizes the energy conversion mechanism in the piezoelectric materials as well as its application in the vibration control system. The mathematical model of the energy conversion was characterized. Selected harvesting system and control system, in which this phenomenon was applied, are also presented.

Keywords: piezoelectric materials, vibration, control

* Dr inż. Dariusz Grzybek, Katedra Automatykacji Procesów, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza.

1. Wstęp

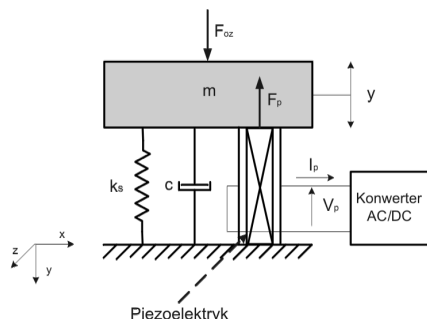
Piezoelektryki są to materiały, na których powierzchni indukują się ładunki elektryczne pod wpływem odkształcenia mechanicznego (prosty efekt piezoelektryczny) oraz odkształcają się lub drgają pod wpływem doprowadzonego napięcia stałego lub zmiennego (odwrotny efekt piezoelektryczny). Występujące w materiałach piezoelektrycznych zjawisko konwersji energii mechanicznej na energię elektryczną pozwoliło na szerokie zastosowanie tych materiałów w budowie przetworników pomiarowych, np. mierników ciśnienia, momentu, siły itp. Właściwość ta umożliwiła również budowę układów, w których materiały piezoelektryczne są wykorzystywane do wytwarzania energii elektrycznej z energii drgań lub sterowania drganiami, np. układy synchronicznego przełączania tłumienia (SSD).

Zmniejszające się zapotrzebowanie na moc różnego typu mikroukładów elektronicznych umożliwia wykorzystanie uzyskanej w ten sposób energii do ich zasilania. W pracy [1] zaprezentowano układ monitorowania składający się z mikroprocesora, pamięci, czujnika odkształcenia, układu pozycjonowania sygnałów czujników oraz nadajnika radiowego. Przedstawiony układ wymaga zasilania na poziomie $900 \mu\text{W}$ dla częstotliwości próbkowania 10 Hz lub $90 \mu\text{W}$ dla 1 Hz . Taki poziom mocy jest możliwy do uzyskania z układów odzyskiwania energii z piezoelektrykami. W pracy [7] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych układu odzyskiwania energii, w których uzyskano moc elektryczną 52 mW z energii drgań o częstotliwości 100 Hz i oporze $400 \text{ k}\Omega$. Jednak podstawowym ograniczeniem w stosowaniu piezoelektrycznych układów odzyskania energii jest to, że generowana moc elektryczna jest zbyt mała do zasilania większości układów elektronicznych [17]. Dlatego badania samozasilających się układów sterowania drganiami skupiają się głównie w obszarze układów pasywnych lub semiaktywnych.

2. Przetwarzanie energii w układzie mechanicznym z piezoelektrykiem

Przetwarzanie energii z wykorzystaniem materiałów piezoelektrycznych zachodzi w dwóch kierunkach: konwersja energii mechanicznej drgań na energię elektryczną, która może być wykorzystywana do zasilania mikroukładów elektronicznych, oraz konwersja dostarczonej z zewnątrz energii elektrycznej na energię mechaniczną, która może być wykorzystana do sterowania drganiami.

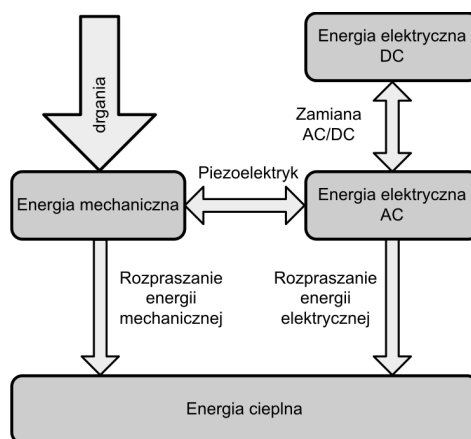
W układzie mechanicznym o jednym stopniu swobody zawierającym piezoelektryk (rys. 1) można wyróżnić trzy formy energii: mechaniczną, elektryczną i cieplną.



Rys. 1. Model układu o jednym stopniu swobody zawierającego piezoelektryk

Fig. 1. Model of a single degree-of-freedom system including a piezoelectric element

Wzajemne relacje pomiędzy tymi formami energii przedstawiono na rys. 2 [6].



Rys. 2. Przepływ energii w układzie mechanicznym zawierającym piezoelektryk
Fig. 2. Energy flow in the mechanical system including piezoelectric

W większości układów sterowania drzżaniami tłumienie realizowane jest przez rozpraszanie energii mechanicznej drzżan, czyli zamianę jej na energię cieplną. Zastosowanie piezoelektryka zwiększa możliwości tłumienia przez dodanie jeszcze jednej drogi prowadzącej do zmniejszenia energii drzżan: przez przetwarzanie energii z drzżan na energię elektryczną [11]. Należy zwrócić uwagę na występujące rozpraszanie energii elektrycznej. W układach przeznaczonych do odzyskiwania energii rozpraszanie energii elektrycznej jest zjawiskiem niepożądanym, któremu próbuje się przeciwdziałać przez poszukiwanie optymalnych układów elektronicznych stanowiących interfejs pomiędzy piezoelektrykiem a ewentualnym odbiornikiem odzyskanej energii [12]. W układach przeznaczonych do tłumienia drzżan rozpraszanie energii jest zjawiskiem pożądanym i od jego intensywności zależy skuteczność tłumienia [14].

3. Model matematyczny przetwarzania energii w materiałach piezoelektrycznych

3.1. Równania konstytutywne

W notacji tensorowej materiał piezoelektryczny jest opisany równaniami konstytutywnymi [2]:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{ij} &= s_{ijkl}^{(E)} \mathbf{T}_{kl} + d_{kij} \mathbf{E}_k \\ \mathbf{D}_i &= d_{ikl} \mathbf{T}_{kl} + \epsilon_{ik}^{(T)} \mathbf{E}_k, \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

- S** – tensor odkształcenia,
- T** – tensor naprężenia,
- D** – wektor indukcji elektrycznej,

- \mathbf{E} – wektor natężenia pola elektrycznego,
 s – tensor podatności przy stałym polu elektrycznym,
 d – tensor sprzężenia elektromechanicznego,
 ε – tensor przenikalności dielektrycznej piezoelektryka.

Po zamianie notacji na macierzową i przekształceniu:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_p &= \mathbf{c}_{pq}^{(E)} \mathbf{S}_q + \mathbf{e}_{pk} \mathbf{E}_k \\ \mathbf{D}_i &= \mathbf{e}_{iq} \mathbf{S}_q + \varepsilon_{ik}^{(S)} \mathbf{E}_k, \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

- $\mathbf{c}^{(E)}$ – macierz stałych elastyczności,
 \mathbf{e} – macierz stałych piezoelektrycznych.

Dla materiału piezoelektrycznego z rys. 1 rozciąganego wzdłuż osi równoległej do kierunku działania siły F_{oz} (oś y) równania konstytutywne (2) można zapisać [13]:

$$\begin{aligned} T_1 &= c_{11}^{(E)} S_1 + e_{31} E_3 \\ D_3 &= e_{31} S_1 + \varepsilon_{33}^{(S)} E_3, \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

- 1 – długość piezoelektryka (oś y),
 2 – szerokość piezoelektryka (oś x),
 3 – grubość piezoelektryka (oś z).

3.2. Równania wiążące zmienne mechaniczne z elektrycznymi

W celu uzyskania równań wiążących zmienne mechaniczne ze zmiennymi elektrycznymi należy uwzględnić następujące związki [10]:

$$E = -\frac{V_p}{L} S = \frac{y}{L} I_p = A \frac{dD}{dt} F_p = AT \quad (4)$$

gdzie:

- V_p – napięcie między końcami elementu piezoelektrycznego,
 I_p – natężenie prądu na piezoelektryku,
 F_p – siła generowana przez piezoelektryk,
 y – przemieszczenie masy,
 L – grubość piezoelektryka,
 A – przekrój piezoelektryka.

Po podstawieniu (4) do (3) i przekształceniu otrzymano [7, 10, 13, 15]:

$$\begin{aligned} F_p &= k_p y + \alpha V_p \\ I_p &= \alpha \frac{dy}{dt} - C_0 \frac{dV_p}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:

- α – współczynnik siły generowanej przez piezoelektryk,
 C_0 – pojemność piezoelektryka,
 k_p – sztywność piezoelektryka.

Powyższe współczynniki można wyznaczyć z zależności:

$$\alpha = \frac{e_{13}A}{L} \quad C_0 = \frac{\epsilon_{33}^{(S)}A}{L} \quad k_p = \frac{c_{33}^{(E)}A}{L} \quad (6)$$

3.3. Energia przetwarzana przez piezoelektryk

Równanie ruchu układu mechanicznego, przedstawionego na rys. 1, z uwzględnieniem (5) ma postać:

$$F_{oz} = m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + (k_s + k_p)y + \alpha V_p \quad (7)$$

Po obustronnym scałkowaniu i wymnożeniu przez prędkość uzyskuje się bilans energii:

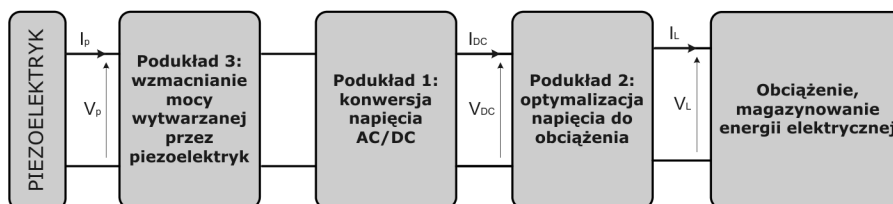
$$\int_0^t F_{oz} \frac{dy}{dt} dt = \int_0^t m \frac{d^2 y}{dt^2} \frac{dy}{dt} dt + \int_0^t c \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 dt + \int_0^t (k_s + k_p)y \frac{dy}{dt} dt + \int_0^t \alpha V_p \frac{dy}{dt} dt \quad (8)$$

Ostatnim składnikiem równania (8) jest energia E_t przetworzona przez piezoelektryk [3, 8]:

$$E_t = \int_0^t \alpha V_p \frac{dy}{dt} dt = \frac{1}{2} C_0 V_p^2 + \int_0^t V_p I_p dt \quad (9)$$

4. Piezoelektryczne układy odzyskiwania energii z drgań

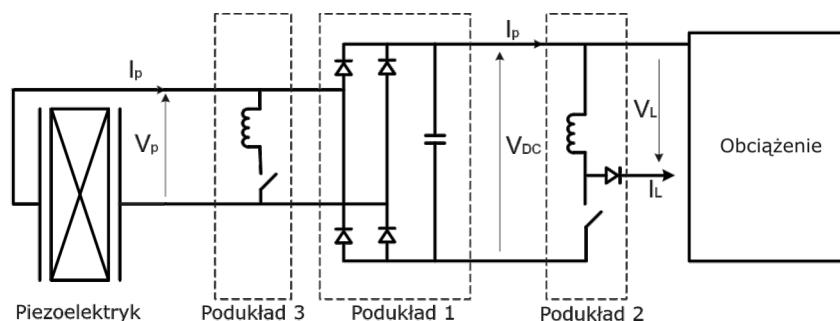
W celu przetwarzania i wykorzystania energii elektrycznej uzyskanej z drgań buduje się układy elektroniczne nazywane układami odzyskiwania energii. Można wyodrębnić trzy podstawowe typy takich układów [9]. Najprostszy jest układ złożony tylko z konwertera napięcia AC/DC (jak na rys. 1). Kolejnym typem jest układ zawierający oprócz konwertera AC/DC również podukład optymalizujący napięcie do wymagań zasilanego odbiornika. Najbardziej rozbudowanym typem jest układ zawierający oprócz dwóch wcześniejszych podukładów również wzmacniacz mocy elektrycznej wytwarzanej przez piezoelektryk. Wzajemne relacje pomiędzy podukładami przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Podukłady w układach odzyskiwania energii

Fig. 3. Subsystems in the energy harvesting systems

Przykład praktycznej realizacji układu odzyskiwania energii zawierającego wszystkie trzy podukłady przedstawiono na rys. 4 [9, 13].

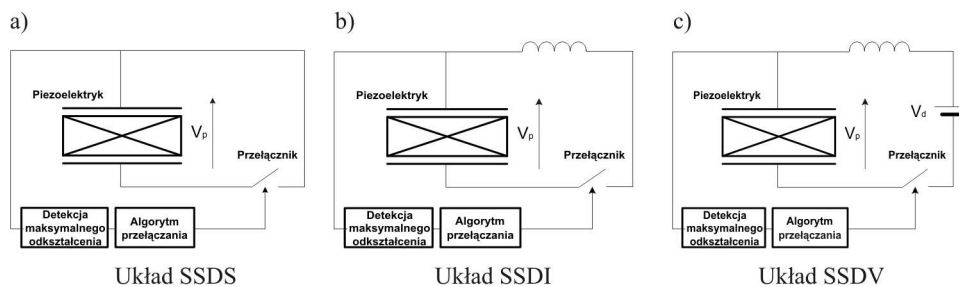


Rys. 4. Przykładowa budowa układu odzyskiwania energii

Fig. 4. Example of the energy harvesting system

5. Układy sterowania drganiami z piezoelektrykami

Mechanizm przetwarzania energii w materiałach piezoelektrycznych jest wykorzystywany m.in. w semiaktywnej metodzie tłumienia drgań – *synchronized switch damping* (SSD). Tłumienie drgań realizowane jest przez rozpraszanie energii. Podstawowe układy SSD zawierają podukład detekcji maksymalnego odkształcenia piezoelektryka, podukład przełączania oraz przełącznik. Zasada działania układu SSD opiera się na inwersji napięcia V_p przez zamknięcie przełącznika, co powoduje wygenerowanie siły w piezoelektryku o zwrocie przeciwnym do siły zewnętrznej. Inwersja napięcia jest zsynchronizowana z maksymalnym odkształceniem piezoelektryka, które jest wykrywane przez podukład detekcji [5, 14].



Rys. 5. Rodzaje układów sterowania SSD

Fig. 5. Types of the SSD control systems

Układy SSDS i SSDI wymagają zewnętrznego źródła energii o niewielkiej mocy tylko do zasilania przełącznika (rys. 5). Moc potrzebna do zasilania układów SSDS i SSDI nie przekracza 1 mW [14]. Efektywność tłumienia drgań z wykorzystaniem układów SSDV jest znacznie wyższa, jednak wymagają one zewnętrznego źródła energii. Tłumienie drgań z wykorzystaniem jednego układu SSDV z zewnętrznym źródłem energii elektrycznej o napięciu 10 V jest porównywalne z tłumieniem sześciu układów SSDI. W pracy [14] przedstawiono wyniki badań zasilania układów sterowania SSDV energią odzyskaną

z drgań z wykorzystaniem piezoelektryków. Wyniki badań wskazują na to, że taki sposób zasilania nie pozwala na uzyskanie znacznie wyższej efektywności tłumienia w stosunku do układów SSDI.

Jednak działanie algorytmu przełączania realizującego zamykanie przełącznika po osiągnięciu maksymalnego odkształcenia piezoelektryka nie jest satysfakcjonujące. Mimo że pozwala na zadowalające tłumienie drgań o wyższych częstotliwościach, to tłumienie drgań o niższych częstotliwościach jest zdecydowanie gorsze [8]. Dlatego prowadzone są badania różnego typu algorytmów sterowania przełączaniem, np. probabilistycznych [4], czy też adaptacyjnych [8]. Biorąc pod uwagę, że do zasilania przełącznika potrzebna jest niewielka moc, budowane są układy wykorzystujące odzyskaną energię z drgań do zasilania przełączania [8].

6. Wnioski

W obszarze sterowania drganiami mechanizm przetwarzania energii w materiałach piezoelektrycznych może być wykorzystany do:

- budowy czujników np. przemieszczenia, które mogą być zastosowane w pętli sprzężenia zwrotnego w układach sterowania,
- rozpraszania energii mechanicznej drgań w układach sterowania drganiami, np. układach SSD,
- odzyskiwania energii z drgań i zasilania elementów układu sterowania, mających niskie zapotrzebowanie na moc, np. elementów układu monitorowania,
- budowy samozasilających się układów sterowania drganiami, obszar możliwych realizacji takich układów jest jednak znacznie ograniczony ze względu na niewielką moc, jaką można uzyskać z układów odzyskiwania energii, obiecującym obszarem badawczym jest rozwój samozasilających się układów SSDI ze względu na niewielką moc potrzebną do zasilania układu przełączania.

Badania układów sterowania drganiami zawierających piezoelektryki prowadzone są w trzech obszarach:

- praw sterowania pozwalających na poprawę jakości multimodalnego sterowania,
- układów elektronicznych o niewielkim zapotrzebowaniu mocy zasilającej,
- samozasilających się układów sterowania drganiami.

Układy sterowania drganiami wykorzystujące mechanizm przetwarzania energii w piezoelektrykach umożliwiają modyfikację cech strukturalnych i parametrycznych układów drgających porównywalną do osiąganą przy zastosowaniu semiaktywnych układów sterowania zasilanych z zewnętrznego źródła energii o niewielkiej mocy.

Wykonano w ramach pracy statutowej nr 11.11.130.560. Katedra Automatykacji Procesów, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza.

Literatura

- [1] Arms S.W., Townsend C.P., Churchill D.L., Galbreath J.H., Mundell S.W., *Power Management for energy harvesting wireless sensors*, SPIE Symposium on Smart Structures & Smart Materials 2005.
- [2] Cupiał P., *Coupled electromechanical vibration problems for piezoelectric distributed-parameter systems*, Politechnika Krakowska – seria Mechanika, Kraków 2008.
- [3] Guyomar D., Badel A., Lefeuvre E., Richard C., *Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 2005, Vol. 52, No. 4.
- [4] Guyomar D., Badel A., *Nonlinear semi-passive multimodal vibration damping: an efficient probabilistic approach*, Journal of sound and Vibration 2006, No. 294, 249-268.
- [5] Ji H., *Multi-modal vibration control using a synchronized switch based on a displacement switching threshold*, Smart Materials and Structures 2009, No. 18.
- [6] Junrui L., Wei-Hsin L., *Energy harvesting and dissipation with piezoelectric materials*, Proceedings of the IEEE, June 20-28, 2008, China.
- [7] Kim H.W., Priya S., Muchino K., Newnham R.E., *Piezoelectric energy harvesting under high pre-stressed cyclic vibrations*, Journal of Electroceramics 2005, No. 15, 27-34.
- [8] Lallart M., Lefeuvre E., Richard C., Guyomar D., *Self-powered circuit for broadband, multimodal piezoelectric vibration control*, Sensors and Actuators 2008, No. 143, 377-382.
- [9] Lefeuvre E., Badel A., Richard C., Petit L., Guyomar D., *A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems*, Sensors and actuators 2006, No. 126, 405-416.
- [10] Lefeuvre E., Sebald G., Guyomar D., Lallart M., Richard C., *Materials, structures and power interfaces for efficient piezoelectric energy harvesting*, J electroceram 2009, No. 22, 171-179.
- [11] Lesieutre G.A., Ottman G.K., Hofmann H.F., *Damping as a result of piezoelectric energy harvesting*, Journal of Sound and Vibration 2004, No. 269, 991-1001.
- [12] Makiyama K., *Low energy dissipation electric circuit for energy harvesting*, Smart Materials and Structures 2006, No. 15, 1493-1498.
- [13] Minazara E., Vasic D., Costa F., Poulin G., *Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting*, Ultrasonics 2006, No. 44, 699-703.
- [14] Qiu J., Ji H., Zhu K., *Semi-active vibration control using piezoelectric actuators in smart structures*, Front. Mech. Eng. China 2009, No. 4(3), 242-251.
- [15] Qiu J., Jiang H., Ji H., Zhu K., *Comparison between four piezoelectric energy harvesting circuits*, Front. Mech. Eng. China 2009, No. 4(2), 153-159.
- [16] Shen H., Qiu J., Ji H., Zhu K., Balsi M., Giorgio I., *Low-power circuit for piezoelectric vibration control by synchronized switching on voltage sources*, Elsevier 2010.

- [17] Sodano H.A., Inman D.J., Park G., *A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials*, The Shock and Vibration Digest 2004, Vol. 36, No. 3, 197-205.