

Barbara Kulesz, Andrzej Sikora
Politechnika Śląska, Gliwice

MODELE SILNIKÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH O RUCHU LINIOWYM I OBROTOWYM

MODELS OF PIEZOELECTRIC MOTORS WITH ROTATING AND LINEAR MOTION

Streszczenie: W artykule przedstawiono dwie koncepcje silników piezoelektrycznych - o ruchu obrotowym i o ruchu liniowym. Oba silniki oparte są o elementy piezoceramiczne, silnik o ruchu obrotowym o element w kształcie pierścienia, silnik o ruchu liniowym o elementy płaskie. Opisano szczegółowo budowę przetwornika o ruchu obrotowym, który działa jako silnik o ruchu ciągłym przerywanym w sposób zbliżony do silnika skokowego. Pokazano również metodę generacji siły posuwu w przetworniku o ruchu liniowym. Dla obu maszyn podano charakterystyki ruchowe. Opisano również pewne zasadnicze cechy źródeł zasilania obu przetworników.

Abstract: Two concepts for piezoelectric motors are presented in the paper, one with rotating and the other with linear motion. The rotating motor contains ring-shaped element, while the linear motion motor utilizes flat elements. Piezoceramic elements are used in both cases. The design of rotating transducer has been described in detail. This transducer may rotate either continuously with motion interrupted at regular intervals in a manner similar to that similar of a stepper motor. The method of generating moving force in the transducer with linear motion has been described. The operating characteristics of both transducers have been given. Some principal features of supply sources for both transducers have also been presented.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, elementy piezoelektryczne
Keywords: electrical machines, piezoelectric elements

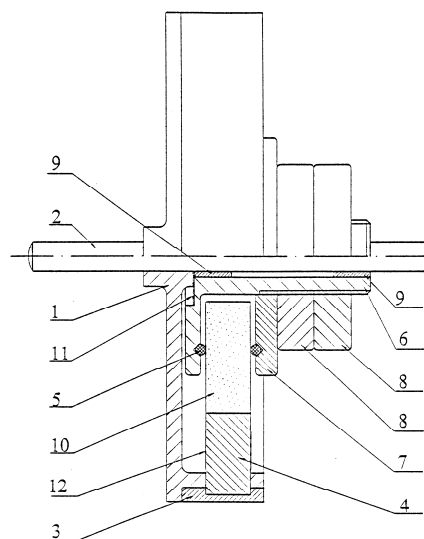
1. Wstęp

Zjawisko piezoelektryczne jest znane i dobrze opisane od co najmniej kilkudziesięciu lat. Natomiast wykorzystanie elementów piezoelektrycznych w praktyce, przynajmniej jako przetworników elektromechanicznych, nie jest zbyt powszechne. Jednym z ciekawszych problemów, z którym styka się projektant przetwornika piezoelektrycznego, jest sposób przełożenia drgającego ruchu elementu piezoelektrycznego na ruch „użyteczny”, na przykład liniowy lub obrotowy. Innym zasadniczym problemem jest dobór układu zasilania do danej konstrukcji przetwornika. W artykule przedstawiono dwie różne konstrukcje przetworników elektromechanicznych, skonstruowane w Zakładzie Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie Politechniki Śląskiej w ramach prac dyplomowych.

2. Silnik piezoelektryczny o ruchu obrotowym

2.1. Koncepcja budowy

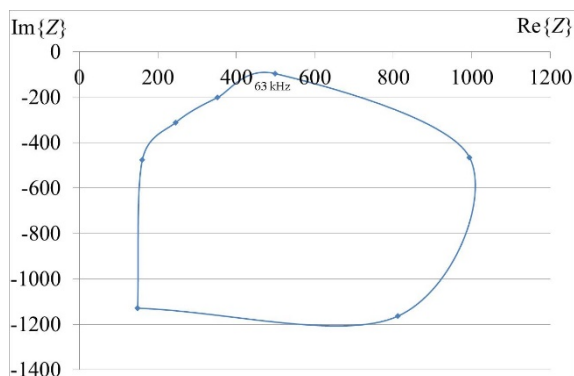
Zasadniczym elementem silnika jest element piezoceramiczny z tytanianu baru w formie pierścienia, natomiast elementy ciernie przenoszące ruch są wykonane w formie zespołu sztywnych płytek przypominających łopatki wentylatora. Dokładnie budowa silnika przedstawiona jest na rys.1.



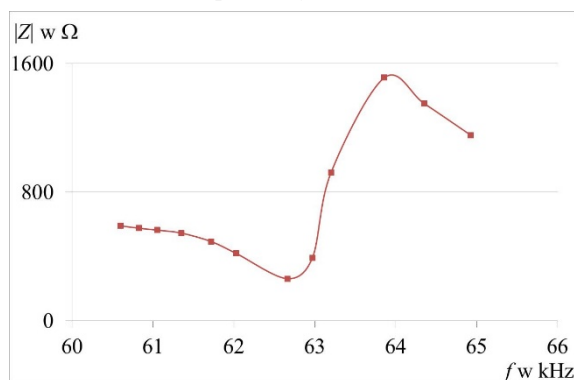
Rys.1. Budowa silnika piezoelektrycznego – opis w tekście (za [4])

Element piezoelektryczny (10) jest osadzony przy pomocy gumowych podkładek dystansowych (5) na kołnierzowej tulei mocującej (6). Tuleja mocująca (6) jest ułożyskowana na wałku (2) silnika przy pomocy dwóch łożysk (9) ślizgowych. Na wałku (2) jest osadzona na stałe aluminiowa tarczowo-cylindryczna konstrukcja (1) mocująca elementy wirnika. Częścią wirnika odpowiedzialną za transmisję drgań elementu piezoelektrycznego są osadzone na wcisk w konstrukcji (1) płytki kontaktowe (4). Płytki kontaktowe (4) są dodatkowo unieruchomione przy pomocy pierścienia blokującego (3). Silnik posiada 12 płytek kontaktowych (4) wykonanych z blaszek stalowych równomiernie rozłożonych na obwodzie wirnika. Kąt między płytką kontaktową (4) i powierzchnią walcową elementu piezoelektrycznego (10) wynosi 55° .

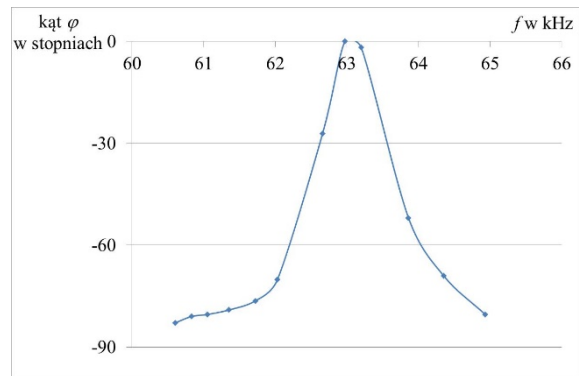
Charakterystykę amplitudowo-fazową elementu piezoelektrycznego pokazano na rys.2, charakterystykę impedancji i kąta fazowego na rys. 3 i 4.



Rys.2. Charakterystyka amplitudowo-fazowa piezoelementu, napięcie zasilania 19,7 V, impedancja w Ω



Rys.3. Moduł impedancji piezoelementu, napięcie zasilania 36,5 V

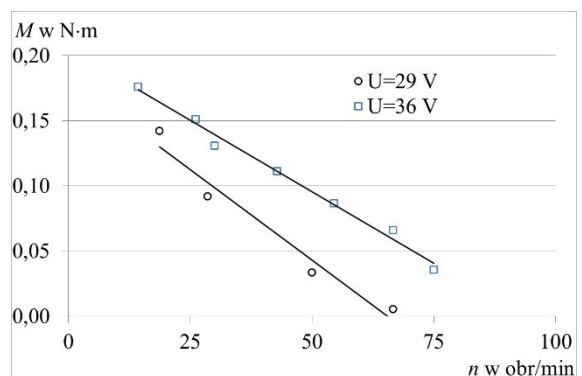


Rys.4. Kąt fazowy piezoelementu w zależności od częstotliwości, napięcie zasilania 36,5 V

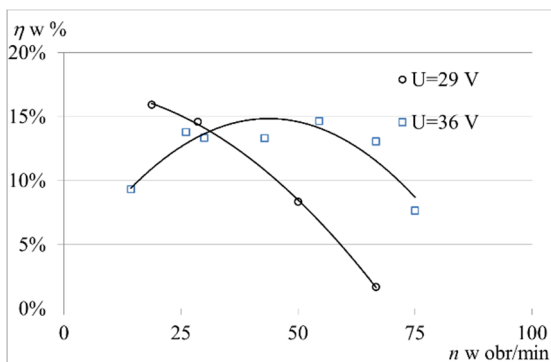
2.2. Charakterystyki silnika

Silnik zasilany jest napięciem przemiennym sinusoidalnym z dedykowanego zasilacza. Poziom napięcia (wartość skuteczna) można regulować w granicach od ok. 20 do ok. 40 V. Prąd silnika jest na poziomie od kilkunastu do ok. 100 mA przy napięciu ok. 40 V, moce pobierane są rzędu pojedynczych W. Jedną z opcji zasilacza jest również automatyczne doregulowanie generowanej częstotliwości do częstotliwości rezonansowej na zasadzie sprzężenia zwrotnego od prądu płynącego przez silnik. Na rys. 5 i 6 pokazano charakterystyki mechaniczne i sprawności silnika dla dwóch różnych napięć zasilania i częstotliwości bliskiej rezonansowej (62,5 kHz).

W układzie zasilania zaimplementowano również opcję ruchu „skokowego” silnika. Opcja ta realizowana jest na zasadzie powtarzającego się wyłączenia i załączenia napięcia zasilania piezoelementu, co skutkuje przerywanym ruchem wirnika.



Rys.5. Charakterystyki mechaniczne silnika

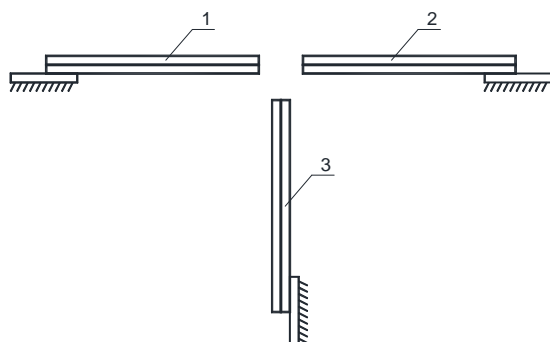


Rys.6. Charakterystyki sprawności silnika

3. Napęd piezoelektryczny o posuwie liniowym

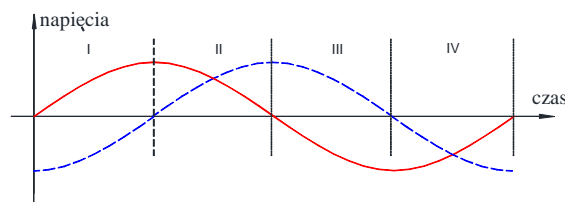
3.1. Koncepcja budowy

W skład silnika wchodzi 3 elementy piezoelektryczne, zamocowane tak jak pokazano na rys.7. Do zasilania elementów piezoelektrycznych użyto dedykowanego zasilacza generującego układ dwóch napięć sinusoidalnych o regulowanej amplitudzie i przesunięciu fazowym. Wolne końce elementów piezoelektrycznych pod wpływem zasilania ich napięciem sinusoidalnym wykonują ruchy drgające w jednej osi (przetworniki poziome w górę i w dół, przetwornik pionowy w lewo i w prawo). Na elementach piezoelektrycznych umieszcza się element wykonawczy, tzw. suwak, wykonany z lekkiego tworzywa sztucznego.



Rys.7. Orientacyjny układ zamocowania elementów piezoelektrycznych (1,2,3) w modelu silnika

Na rys. 8 pokazany jest układ dwóch napięć zasilających silnik, podzielony na 4 cykle odpowiadające pewnym kombinacjom wychyleń elementów.



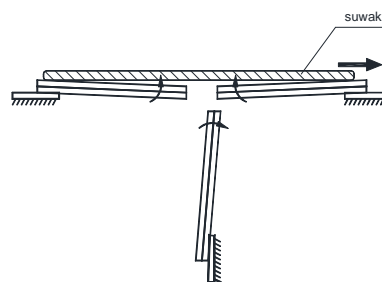
Rys. 8. Przebiegi napięć zasilających elementy: linią ciągłą oznaczone jest napięcie pary elementów poziomych, linią przerywaną napięcie elementów pionowych

W pierwszej fazie działania napędu przetwornik pionowy popycha suwak w kierunku poziomym, natomiast dwa poziome przetworniki wracają do położenia zerowego (spoczynkowego) (rys. 9a)).

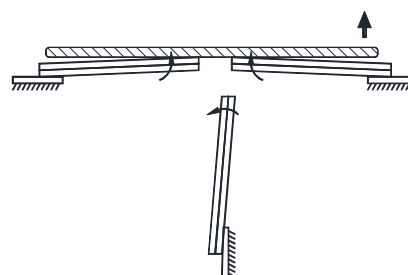
W drugiej fazie przetwornik pionowy wraca do położenia zerowego, a przetworniki poziome unoszą delikatnie suwak uniemożliwiając tym samym powrót na poprzednio zajmowaną pozycję (rys.9b)).

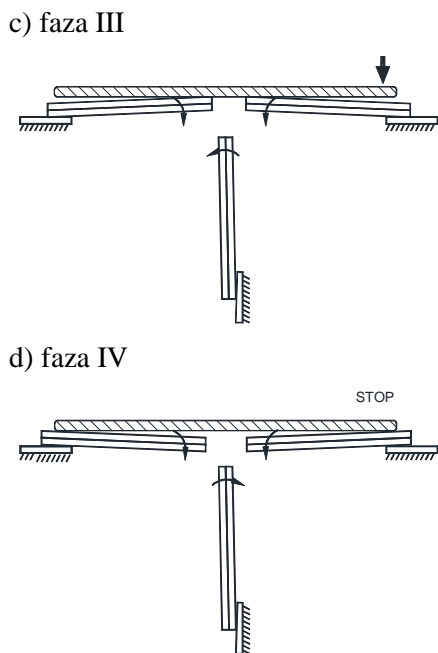
W trzeciej fazie przetwornik pionowy odchyła się w kierunku przeciwnym do kierunku przesuwu suwaka, a przetworniki poziome powracają do położenia zerowego opuszczając tym samym suwak (rys. 9c)). W czwartej fazie przetwornik pionowy wraca do położenia zerowego, a przetworniki poziome wychylają się w przeciwną stronę do kierunku unoszenia suwaka. W tej fazie suwak nie przemieszcza się (rys. 9d)). Następnie cały proces jest cyklicznie powtarzany.

a) faza I



b) faza II





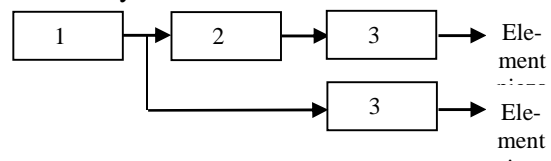
Rys.9. Wychylenia elementów i ruch suwaka w poszczególnych przedziałach sterowania (faza I-IV jak na rys.8). Strzałkami zaznaczono kierunek przemieszczania się elementów i suwaka

Dzięki wygenerowaniu odpowiedniej sekwencji napięć zasilających (przesunięcia fazowe) ruchy elementów piezoelektrycznych są zgodne z tymi pokazanymi na rys.9.

3.2. Zasilanie silnika

W układzie zasilania zastosowano generator funkcji XR-8038 firmy Exar. Układ ten może generować trzy różne sygnały (sinusoidalny, prostokątny, piłokształtny), odznacza się małym zniekształceniem sygnału wyjściowego sinusoidalnego (1%), szerokim zakresem generowanych częstotliwości 0,001-300 kHz, możliwością zmiany wypełnienia 2-98% oraz nieskomplikowaną aplikacją. Przy wyznaczaniu charakterystyk elementu piezoelektrycznego można wykorzystać możliwości zmiany częstotliwości, wypełnienia, oraz regulacji wartości skutecznej napięcia uzyskane na stopniu wyjściowym układu. Stopień wyjściowy układu stanowi blok wzmacniacza oparty na układzie OPA452. Generator zasilany jest za pomocą prostego zasilacza o napięciach symetrycznych $\pm 12V$. Blok wyjściowy stanowią dwa torów wzmacniające oparte na wzmacniaczu operacyjnym OPA452 w standardowym układzie. Jeden z torów wzmacniających został poprzedzony układem przesuwnika fazy zbudowanym na wzmacniaczu operacyjnym UA741,

przesunięcie fazy sygnału wejściowego wynosi 90° . Schemat blokowy układu zasilania pokazano na rys. 10.



Rys.10. Schemat blokowy układu zasilania; 1 – generator funkcyjny, 2 – przesuwnik fazowy, 3 – wzmacniacz

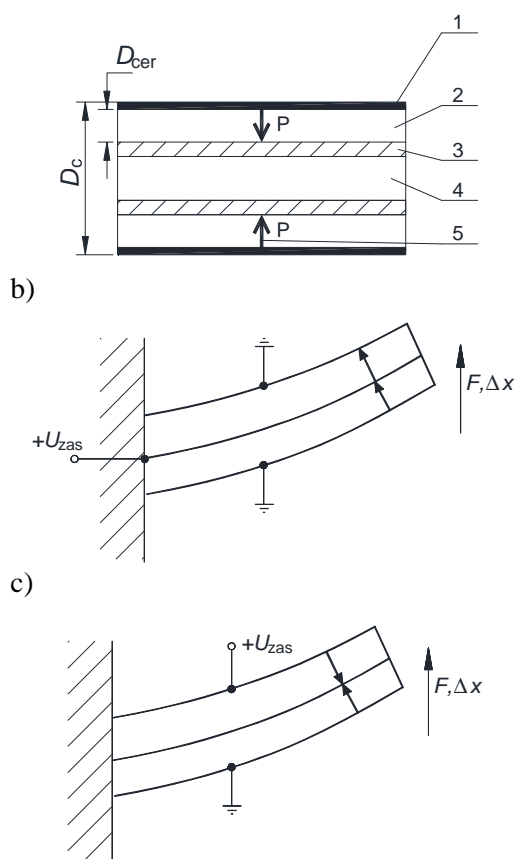
3.2. Elementy piezoelektryczne wykorzystane w silniku

Do budowy napędu piezoelektrycznego zastosowano elementy piezoelektryczne tzw. dwuwarstwowe. Element taki ma w rzeczywistości 9 warstw: 4 warstwy elektrod, 2 piezoceramiczne warstwy, 2 warstwy adhezyjne i jedna środkowa wkładka regulacyjna (która usztywnia oraz wzmacnia mechanicznie cały element i ogranicza jego możliwość ruchu). Użycie dwóch warstw piezoelektrycznych pozwala na zredukowanie o połowę napięcia zasilania każdej z warstw, przy czym efekt mechaniczny „stosu” jest identyczny jak pojedynczego elementu zasilanego pełnym napięciem. Ugięcie elementów tego typu zawiera się w przedziale od setek do tysięcy mikrometrów, a siła zginania zawiera się w przedziale od setnych do dziesiątych części niutonów.

Piezoelektryczne przetworniki są zazwyczaj charakteryzowane poprzez parametry takie jak swobodne odchylenie i siła blokowania. Swobodne odchylenie (X_f) odpowiada przesunięciu przy maksymalnym zalecanym napięciu, gdy siłownik porusza się w pełni swobodnie i nie wywiera żadnej siły. Siła blokowania (F_b) odpowiada sile wywieranej przy maksymalnym zalecanym napięciu, gdy siłownik jest zupełnie zablokowany i niezdolny do ruchu. Maksymalne odchylenie występuje, gdy siła jest równa zeru, a siła jest maksymalna gdy odchylenie jest zerowe.

W napędzie zastosowano przetworniki typu T215-H4-303YB, wykonane z ceramiki PZT (tytanian ołowiano-cyrkonowy). Parametry podano w tabeli 1, zaś budowę przetwornika wraz ze sposobem zasilania pokazano na rys. 11.

a)



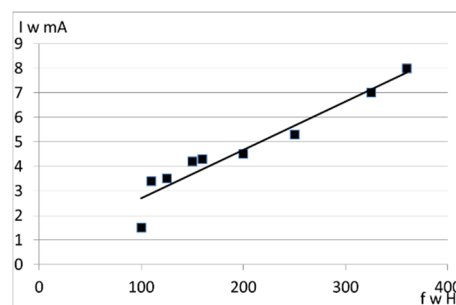
Rys.11. Element piezoceramiczny T215-H4-303Y; a) budowa: 1 – elektroda niklowa lub srebrna, 2 – piezoceramika (PSI5H4E), 3 – warstwa łącząca (adhezyjna), 4 – wkładka środkowa (mosiądz), P – polaryzacja przy połączeniu szeregowym, D_{cer} – grubość piezoceramiki, D_c – grubość całego elementu; b) sposób zasilania elementów przy połączeniu szeregowym, c) sposób zasilania elementów przy połączeniu równoległym

Tabela 1. Parametry elementów T215-H4-303Y

masa	m	1,2 g
szywność		$5,3 \cdot 10^2$ N/m
pojemność*	C_s	32 nF
	C_p	128 nF
napięcie znamionowe*	U_{Ns}	± 80 V
	U_{Np}	± 40 V
wychylenie maksymalne (swobodne)	X_f	± 300 μ m
siła przy zablokowaniu	F_b	$\pm 0,16$ N
temperatura Curie	T_C	230°C

*indeks p odnosi się do połączenia równoległego, indeks s do połączenia szeregowego przetworników

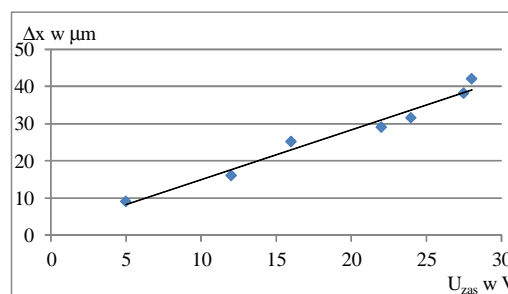
Pomierzoną charakterystykę prądowo-częstotliwościową elementu (wartość skuteczna prądu w funkcji częstotliwości) pokazano na rys. 12.



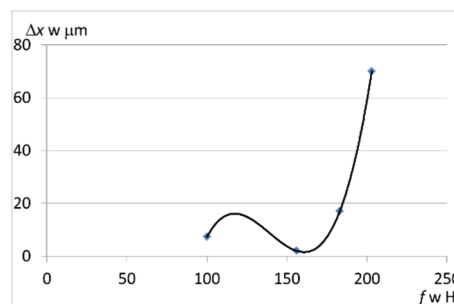
Rys. 12. Charakterystyka prądowo-częstotliwościowa elementu, zasilanie napięciem 21 V

Na rys. 13 zamieszczono pomierzone charakterystyki wychylenia przetwornika w funkcji napięcia i częstotliwości zasilania.

a)



b)



Rys.13. Charakterystyki wychylenia przetwornika: a) w funkcji napięcia zasilania przy $f = 270$ Hz, b) w funkcji częstotliwości zasilania, $U_{zas} = 21$ V

Wychylenie elementu piezoelektrycznego jest liniową funkcją napięcia zasilania, zgodnie z zależnością:

$$\Delta x = \frac{4l^2 U_{zas} d_{33}}{D_{cer}^2} \quad (1)$$

gdzie:

l - długość przetwornika, $l = 34,9$ mm

d_{33} - stała piezoelektryczna materiału,

$$d_{33} = 650 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$$

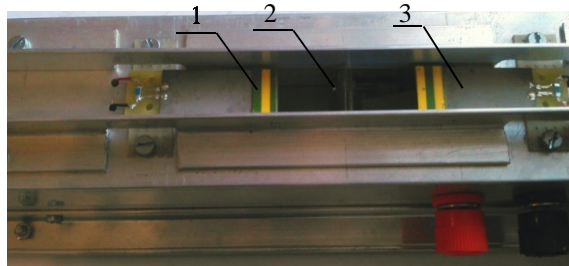
D_{cer} - grubość warstwy piezoceramiki,

$$D_{\text{cer}} = 0,127 \text{ mm.}$$

Częstotliwość rezonansowa elementu znajduje się w przedziale częstotliwości ok. 200 Hz, co nie odpowiada danym producenta (270 Hz). Dla potrzeb laboratorium studenckiego w zasilaczu na stałe ustawiono częstotliwość napięcia wyjściowego na poziomie 255 Hz, natomiast amplitudę tego napięcia można regulować w zakresie od ok. 3,5 do 21,5 V. Płytki poziome i pionowa zasilane są osobno.

3.3. Konstrukcja mechaniczna napędu piezoelektrycznego

Na rys. 14 pokazane jest zamocowanie elementów piezoelektrycznych.



Rys. 14. Mocowanie elementów piezoelektrycznych: 1,3 - elementy poziome, 2 - element pionowy

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono konstrukcję, sposób działania i przykładowe charakterystyki ruchowe dla 2 przetworników elektromechanicznych opartych o elementy piezoelektryczne: silnika o ruchu obrotowym, z elementem piezoelektrycznym w kształcie pierścienia, o częstotliwości rezonansowej ok. 63 kHz (pasmo działania w obszarze ultradźwięków, od ok. 60,5 do 65 kHz) i przetwornika o ruchu liniowym, w

którym zastosowano elementy piezoelektryczne płaskie o częstotliwości rezonansowej rzędu 200 Hz. Przetworniki te jak dotychczas nie znalazły zastosowania komercyjnego, są natomiast wykorzystywane do celów dydaktycznych, ciesząc się dużym zainteresowaniem studentów, dla których jest to jedna z nielicznych okazji w trakcie studiów zapoznania się z właściwościami elementów piezoelektrycznych i możliwościami ich praktycznego zastosowania.

5. Literatura

- [1] Zakrzewski J., Kampik M.: *Sensory i przetworniki pomiarowe*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013, ISBN 978-83-7880-052-1
- [2] Miłek M.: *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Zielona Góra 2006, ISBN 83-7481-023-8
- [3] Smolucha W.: *Wstęp do piezoelektroniki*. WKŁ, Warszawa 1980, ISBN 83-206-0041-3.
- [4] Dobrociński W.: *Konstrukcja, zasilanie, sterowanie silnika piezoelektrycznego tarczowego*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 1999r.
- [5] Cieplak K.: *Silnik piezoelektryczny*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2008r.
- [6] <http://www.czujniki.pl> (24.06.2008)
- [7] <http://www.piezo.com> (29.01.2015)
- [8] <http://www.newscaletech.com> (24.06.2008)
- [9] <http://www.physikinstrumente.com> (24.06.2008)
- [10] <http://www.siemens.pl> (24.06.2008)