ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria: ELEKTRYKA z. 95 Nr kol. 820

Tadeusz GLINKA

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechnika Śląska

SILNIK PIEZOELEKTRYCZNY

Streszczenie. Nowe materiały piezoelektryczne typu ceramicznego posiadają energetyczny współczynnik sprawności wynoszący kilkadziesiąt procent.

Materiały te umożliwiają budowę elektromechanicznych przetworników energii - silników piezoelektrycznych.

W artykule przedstawiono podstawy budowy i działania silnika piezoelektrycznego, przedstawiono także model takiego silnika i podstawowe jego charakterystyki elektromechaniczne.

1. Wstęp

Zjawisko powstawania indukcji elektrycznej w ciele stałym zachodzące pod wpływem naprężeń mechanicznych, nazywane w fizyce prostym efektem piezoelektrycznym, odkryli w 1880 r. bracia Pierre i Jacques Curie.

Zjawisko powstawania odkształceń materiałów piezoelektrycznych pod wpływem pola elektrycznego, odwrotny efekt piezoelektryczny, został teoretycznie przewidziany przez G. Lippmana, a praktycznie potwierdzony przez braci Curie w 1881 roku.

W praktyce po raz pierwszy kryształy piezoelektryczne zostały wykorzystane w 1917 r. do pobudzania fal akustycznych w wodzie. Odtąd rozpoczyna się okres stosowania kryształów piezoelektrycznych również w innych urządzeniach, np. w układach rezonansowych, generatorach o bardzo stabilnej częstotliwości zmian napięcia, filtrach o bardzo wąskim paśmie częstotliwości i innych.

Coraz powszechniejsze stosowanie kryształów piezoelektrycznych jest czynnikiem wymuszającym rozwój technologii ich otrzymywania, a także stymuluje poszukiwania coraz to nowych materiałów piezoelektrycznych. W układach i przyrządach elektronicznych wykorzystuje się kryształy kwarcu SiO_2, kryształy berlinitu $AlPO_4$ oraz kryształ niobianu litu $LiNbO_3$. Kryształy te cechuje duża stałość parametrów w czasie i w szerokim przedziale temperatury - natomiast mają niską sprawność przetwarzania energii w granicach 1% [1].

Drugą grupę materiałów piezoelektrycznych stanowią materiały ceramiczne. Materiały te cechuje prosta technologia wytwarzania, pozwalająca uzyskiwać próbki o dowolnej wielkości i kształcie. Wadą tych materiałów jest

trudność otrzymywania ceramik o powtarzalnych parametrach oraz znacznie mniejsza w porównaniu z kryształami kwarcu, stabilność parametrów w czasie, a także większa zależność ich parametrów od temperatury.

Ceramiki piezoelektryczne mają wysoką sprawność przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną dochodzącą do kilkudziesięciu procent.

Wysoka sprawność stanowi główną ich zaletę i stwarza możliwość wykorzystania tych materiałów do budowy elektromechanicznych przetworników energii [2, 3, 4, 5]. Konstruktorzy tych przetworników podają szereg ich zalet:

- duża stabilność prędkości obrotowej lub liniowej,
- prosta budowa w szczególności silnika liniowego,
- proste układy zasilania i sterowania,
- niski poziom hałasów, jeżeli pracują przy częstotliwościach ponad akustycznych.

W Instytucie Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej przeprowadzono także pewne wstępne prace dotyczące przetworników elektromechanicznych piezoelektrycznych [2]. Zbudowano model takiego silnika i przeprowadzono jego badania, co w sposób krótki omówiono w tym artykule.

2. Rezonator piezoelektryczny

Rezonator piezoelektryczny jest to próbka materiału piezoceramicznego określonego kształtu z naniesionymi metalicznymi elektrodami. W przetwornikach elektromechanicznych stosowane są rezonatory piezoelektryczne o kształcie prostopadłościanu lub pierścienia. W rezonatorze pod wpływem przyłożonego przemiennego pola elektrycznego wzbudzane są drgania mechaniczne. Piezoelektryczny rezonator mechanicznie nieobciążony (swobodny), w pobliżu częstotliwości rezonansowej można przedstawić w postaci schematu zastępczego z elementami skupionymi (rys. 1).

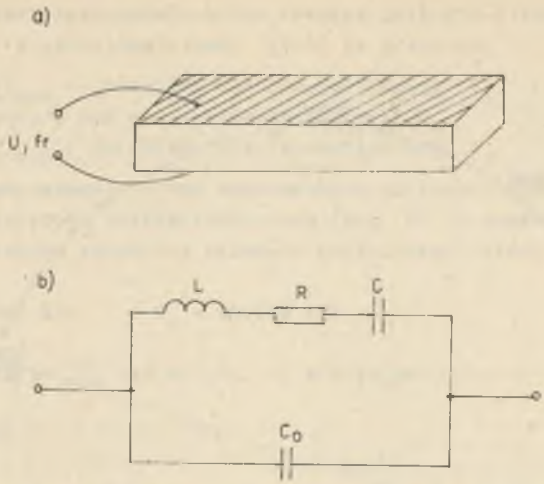
Pojemność C_0 nazywana jest pojemnością statyczną rezonatora, a parametry L, R, C parametrami dynamicznymi, przy czym rezystancja R reprezentuje straty mechaniczne w płytce.

Charakterystyka modułowo-fazowa admitancji rezonatora piezoelektrycznego wynosi

$$\underline{Y} = j\omega C_0 + \frac{1}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = G + jB \tag{1}$$

przy czym

$$G = \frac{\omega^2 C^2 R}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2}$$



Rys. 1. Rezonator piezoelektryczny (a) i jego elektryczny schemat zastępczy (b)

$$B = \omega C_0 + \frac{\omega C(1 - \omega^2 LC)}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2}$$

i ma kształt zbliżony do okręgu (rys. 2).

Charakterystyka ta może być wykorzystana dla identyfikacji parametrów schematu zastępczego:

Maksimum admitancji $|\underline{Y}_{max}|$ występuje w przypadku tzw. rezonansu szeregowego, to znaczy gdy:

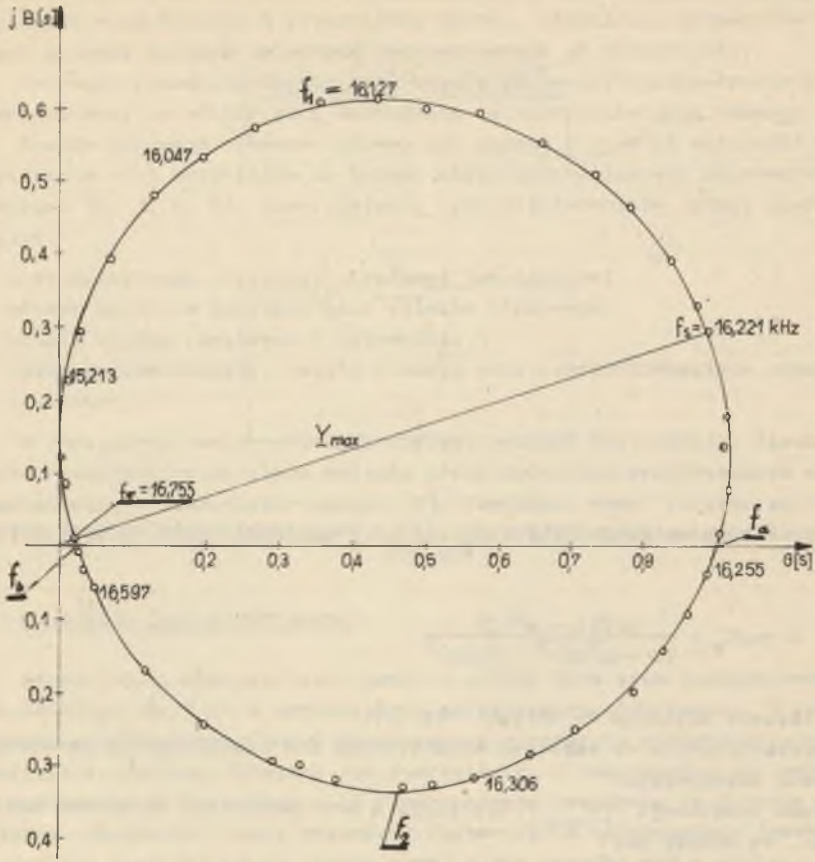
$$j\omega_s L + \frac{1}{j\omega_s C} = 0 \tag{2}$$

$$\omega_s = 2\pi f_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\underline{Y}_{max} = \frac{1}{R} + j\omega_s C_0 \tag{3}$$

Minimum admitancji $|\underline{Y}_{min}|$ występuje, gdy zachodzi tzw. rezonans równoległy:

$$j\omega_r L + \frac{1}{j\omega_r C} + \frac{1}{j\omega_r C_0} = 0 \tag{4}$$



Rys. 2. Wykres admitancji płytki piezoelektrycznej

$$2\pi f_r = \omega_r = \sqrt{\frac{C_o + C}{LCC_o}}$$

$$\underline{Y}_{min} = \frac{R}{R^2 + \frac{LC}{C_o(C_o + C)}} + j\left[\sqrt{\frac{1 + \frac{C}{C_o}}{LC}}\, C_o - \frac{\frac{C}{C_o}\sqrt{\frac{L}{C}}\,\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{C}{C_o}}}}{R^2 + C_o(C_o + C)}\right] \tag{5}$$

Znając z pomiarów wykres modułowo-fazowy rezonatora, można określić metodą graficzną admitancje $\underline{Y}_{max}$ i $\underline{Y}_{min}$ dla częstotliwości rezonansowych f_s i f_r. Z admitancji $\underline{Y}_{max}$ (równanie 3) oblicza się R i C_o, a z admitancji $\underline{Y}_{min}$ (równanie 5) pozostałe dwa parametry płytki L i C.

Parametry schematu zastępczego można również obliczyć z innych punktów charakterystyki częstotliwościowej $\underline{Y}(\omega)$, na przykład:

$B_{max} = (\mathrm{Im}\ \underline{Y})_{max}$ - określoną dla częstotliwości f_1,
$B = 0$ - określoną dla częstotliwości f_a i f_b,
$B_{min} = (\mathrm{Im}\ \underline{Y})_{min}$ - określoną dla częstotliwości f_2.

Dla płytki nieobciążonej, którą wykorzystano do budowy modelu silnika, zdjęto charakterystykę częstotliwościową (rys. 2). W oparciu o tę charakterystykę wyznaczono parametry schematu zastępczego, które wynoszą:

$f_s = 16{,}221$ kHz $\qquad f_r = 16{,}755$ kHz

$R = 1{,}084\,\Omega$; $\quad C_o = 4{,}97\ \mu F$, $\quad C = 0{,}32\ \mu F$

$L = 17$ mH.

Parametry te mogą służyć do doboru generatora zasilającego oraz do obliczeń projektowych przetwornika elektromechanicznego. Płytki piezoelektryczne mają kilka pasm częstotliwości rezonansowych. Podane tutaj pasmo 16 kHz jest pierwszą częstotliwością rezonansową. Druga i wyższe częstotliwości rezonansowe leżą w paśmie znacznie wyższym od częstotliwości akustycznej. Stąd też są częściej wykorzystywane w przetwornikach elektromechanicznych z uwagi na minimalne zakłócenia akustyczne.

3. Piezoelektryczne przetworniki elektromechaniczne

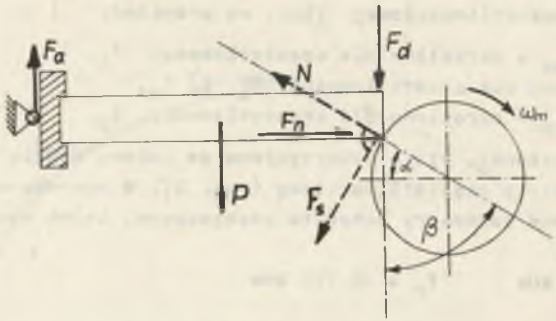
Energia elektryczna dostarczana do płytki piezoelektrycznej jest zamieniana pod wpływem pola elektrycznego na energię drgań mechanicznych. Problem konstrukcji przetwornika elektromechanicznego piezoelektrycznego sprowadza się do zamiany tych drgań w ruch obrotowy lub liniowy.

Obecnie w konstrukcji silników piezoelektrycznych można wyróżnić trzy typy [3]:

- silniki piezoelektryczne z aktywnym stojanem i pasywnym wirnikiem,
- silniki piezoelektryczne z aktywnym wirnikiem i pasywnym stojanem,
- silniki piezoelektryczne z aktywnym wirnikiem i aktywnym stojanem.

Zaprezentowany tutaj zostanie silnik z aktywnym stojanem i pasywnym wirnikiem. Schemat kinematyczny tego silnika podano na rys. 3. Układ pokazany na rys. 3 poddany jest działaniu następujących sił:

F_d - siły docisku płytki do wirnika,
P - siły ciężkości płytki,
F_s - siły reakcji w punkcie zamocowania płytki,
$F_n(t)$ - siły napędzającej.



Rys. 3. Kinematyczny schemat silnika piezoelektrycznego

Wektory sił F_d, P, F_a, F_n na rys. 3 narysowane są linią ciągłą. Siły F_d, P, F_a są siłami stałymi w czasie, natomiast siła F_n jest siłą zmienną sinusoidalnie

$$F_n(t) = F_o \sin\omega t \tag{6}$$

Jeśli płytka piezoelektryczna jest zamocowana wahliwie, to z równania momentów działających w punkcie styku płytki z wirnikiem można obliczyć, że

$$F_a = \frac{1}{2} P \tag{7}$$

W punkcie styczności płytki piezoelektrycznej i wirnika działają dwie siły wypadkowe:

- siła styczna:

$$F_s(t) = F_n(t)\sin\alpha - (F_d + \frac{1}{2} P)\sin\beta \tag{8}$$

- siła normalna:

$$N(t) = F_n(t)\cos\alpha + (F_d + \frac{1}{2} P)\cos\beta \tag{9}$$

Wektory siły $F_s(t)$ i $N(t)$ na rys. 2 są narysowane linią przerywaną. Na rys. 3 pokazano siły $F_s(t)$ i $N(t)$ działające na płytkę piezoelektryczną. Identyczne siły o zwrotach przeciwnych będą działać na wirnik. Pod wpływem siły $\left[-F_s(t)\right]$ będzie odbywał się ruch wirnika. W przedziałach czasu, w których płytka się wydłuża i siła napędzająca ma wartość dodatnią przy odpowiednim kącie α, istnieje możliwość spełnienia warunku:

$$\eta_t N(t) \geq F_s(t)$$

gdzie

η_t - współczynnik tarcia

i wówczas mamy do czynienia z ruchem płytki i ruchem wirnika bezpoślizgowym. Z warunku tego można obliczyć kąt α styku płytki z normalną do powierzchni wirnika, przy którym nie występuje poślizg. Kąt ten określamy dla amplitudy siły napędzającej, to jest dla chwili $t_1 = \frac{\pi}{2\omega}$

$$F_n(t_1) = F_o$$

Oznaczając

$$\lambda = \frac{F_d + \frac{1}{2}P}{F_o} \tag{10}$$

oraz

$$\eta_t = \sin\alpha_o \tag{11}$$

a także biorąc pod uwagę, że wartość η_t jest mała $\eta_t \cong 0{,}1$ można założyć, że

$$1 \approx \cos\alpha_o. \tag{12}$$

Przy tym założeniu otrzymuje się wyrażenie na określenie kąta styku α, przy którym nie występuje poślizg, to jest przy którym prędkość liniowa płytki piezoelektrycznej przy jej wydłużaniu się jest równa prędkości obwodowej wirnika.

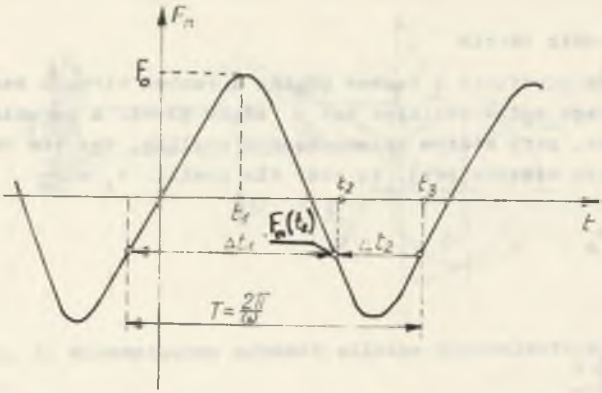
$$\alpha = \arcsin\left[\lambda \sin(\beta + \alpha_o)\right] + \alpha_o \tag{13}$$

Można również określić optymalny stosunek siły docisku i amplitudy siły napędzającej

$$\lambda = \frac{\sin(\alpha - \alpha_o)}{\sin(\beta + \alpha_o)} \tag{14}$$

W półokresach drgań płytki, przy których długość płytki piezoelektrycznej zmniejsza się, kierunek siły napędzającej $F_n(t)$ zmienia się na przeciwny $F_n(t) < 0$, co powoduje zmniejszenie się siły normalnej $N(t)$.
Gdy $N(t)$ zmniejszy się do zera, wówczas nastąpi oderwanie roboczego końca płytki piezoelektrycznej od powierzchni wirnika (rys. 4).

$$N(t_2) = F_n(t_2)\cos\alpha + (F_d + \frac{1}{2}P)\cos\beta = 0 \tag{15}$$



Rys. 4. Przebieg czasowy siły napędzającej $F_n(t)$ płytki piezoelektrycznej przy jej blokadzie mechanicznej

stąd

$$\sin\omega t_2 = \frac{F_d + \frac{1}{2}P}{F_o} \cdot \frac{\cos\beta}{\cos\alpha}$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega}\left[\pi + \arcsin\frac{F_d + \frac{1}{2}P}{F_o} \cdot \frac{\cos\beta}{\cos\alpha}\right]$$

Natomiast ponowny styk płytki i wirnika nastąpi w czasie narastania $N(t)$ w chwili t_3, gdy $N(t_3) = 0$ (rys. 4).

$$t_3 = \frac{1}{\omega}\left[2\pi - \arcsin\frac{F_d + \frac{1}{2}P}{F_o}\frac{\cos\beta}{\cos\alpha}\right]$$

Czas styku płytki piezoelektrycznej z wirnikiem

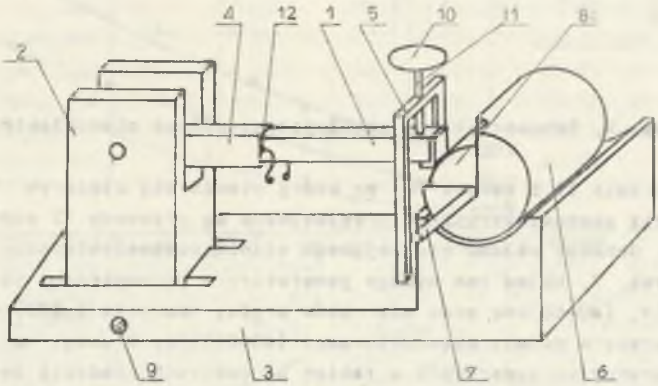
$$\Delta t_1 = \frac{2\pi}{\omega} - \Delta t_2$$

przy czym czas oderwania się końca płytki od wirnika

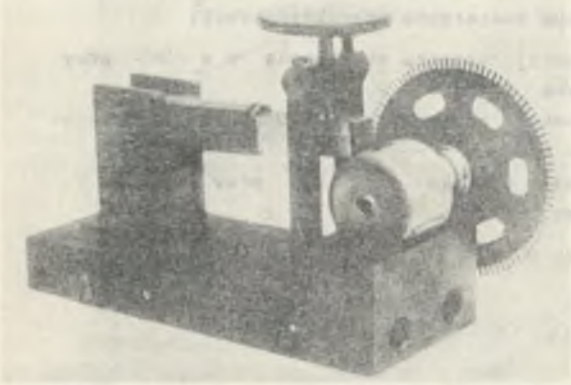
$$\Delta t_2 = t_3 - t_2 = \frac{1}{\omega}\left[\pi - 2\arcsin\frac{F_d + \frac{1}{2}P}{F_o} \cdot \frac{\cos\beta}{\cos\alpha}\right]$$

4. Opis modelu silnika

Szkic konstrukcyjny modelu silnika pokazany jest na rys. 5, a na rys. 6 zdjęcie zbudowanego modelu. Elementem aktywnym jest prostopadłościenna



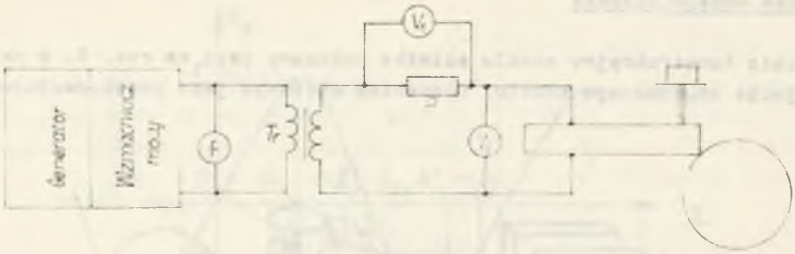
Rys. 5. Szkic konstrukcyjny silnika piezoelektrycznego



Rys. 6. Silnik piezoelektryczny - widok ogólny

płytka piezoelektryczna 1 z metalicznymi elektrodami napylonymi na jej dwóch przeciwległych powierzchniach bocznych. Wielkość płytki warunkowała wybór konstrukcji silnika. Płytka piezoceramiczna umieszczona jest w metalowej obejmie 4 i odizolowana jest od niej folią mikanitową. Obejma łącznie z płytką umieszczona jest wahliwie w trzymadle 2 zamocowanym na podstawie 3. Trzymadło jest blokowane śrubą 9 i można go przesuwać, zmieniając w ten sposób kąt przyłożenia płytki do wirnika. Koniec roboczy płytki piezoceramicznej zakończony jest nasadką ze stali twardej i oparty jest na wirniku stalowym 8.

Wirnik osadzony jest na wałku 7, który jest ułożyskowany za pomocą łożysk ślizgowych samocentrujących się w obudowie 6. Urządzenie dociskające roboczy koniec płytki piezoelektrycznej do wirnika składa się z prowadni-



Rys. 7. Schemat układu zasilającego silnik piezoelektryczny

cy 5, sworznia 11 i tarczy 10, na którą stawia się ciężarek F_d. Do elektrod płytki piezoelektrycznej przylutowane są przewody 12 doprowadzające napięcie. Schemat układu zasilającego silnik piezoelektryczny pokazany jest na rys. 7. Układ ten wymaga generatora o parametrach: około 100 W, (100-300)V, (40-60)kHz oraz mierników prądu, napięcia i mocy przystosowanych do pracy w paśmie częstotliwości (40-60)kHz. Z uwagi na brak w naszym laboratorium generatora o takich parametrach, badania zostały przeprowadzone w paśmie pierwszej częstotliwości rezonansowej płytki, to jest (15-17)kHz. Układ ten z uwagi na transformator dopasowujący Tr nie mógł być wykorzystany w pasmach wyższych częstotliwości rezonansowych. Nie mieliśmy również rozwiązanego zagadnienia pomiaru mocy, co zubożyło pomiary, gdyż nie można było określić np. sprawności silnika.

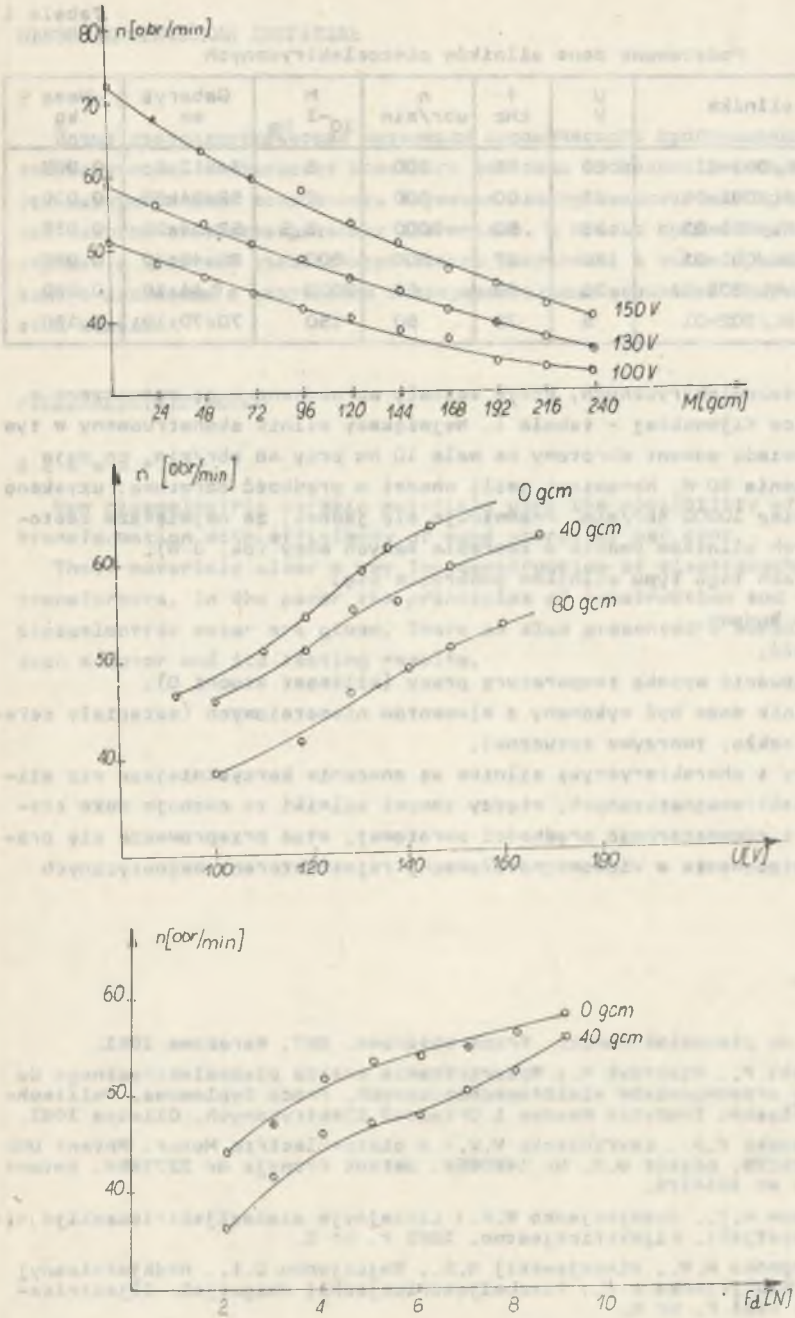
W tym układzie pomiarowym pomierzono charakterystyki:

- prędkości obrotowej w funkcji momentu obciążenia $n = f(M)$ przy $U = const$ i $f = 16,3$ kHz i $F_d = 4$ N,
- prędkości obrotowej w funkcji napięcia $n = f(U)$ przy $M = const$ i $f = 16,3$ kHz i $F_d = 4$ N,
- prędkości obrotowej od siły docisku $n = f(F_d)$ przy $U = 100$ V, $f = 16,3$ kHz i $M = const$,

które przedstawiono na rys. 8.

5. Wnioski

Badania wykazały, że istnieje możliwość wykorzystania materiałów piezoelektrycznych do budowy przetworników elektromechanicznych. Z uwagi na brak w naszych laboratoriach źródeł zasilania o wysokiej częstotliwości i dużej mocy, badania były prowadzone przy dolnej częstotliwości rezonansowej płytki, to jest 16,3 kHz. Częstotliwość zalecana do zasilania silnika winna mieścić się w przedziale częstotliwości ultradźwiękowych (20-200) kHz. Brak watomierza uniemożliwił wykonanie pełnego zakresu badań charakterystyk elektromechanicznych silnika. W literaturze [5] podane są dane



Rys. 8. Charakterystyki silnika piezoelektrycznego

Tabela 1

Podstawowe dane silników piezoelektrycznych

Typ silnika	U V	f kHz	n obr/min	M 10^{-3} Nm	Gabaryt mm	Masa kg
DPE-01, WL/001-01	20	65	300	3	34x13x6	0,005
DPE-0,4, WL/001-01	35	50	600	7	52x24x20	0,035
DPE-0,4, WL/001-02	35	50	2000	2,5	52x24x20	0,035
DPE-1,5, WL/001-01	120	27	600	500	88x40x30	0,080
DPE-0,75, NL/301-01	30	60	60	2000	Φ 44x10	0,080
DPE-0,4, NL/302-01	5	70	60	150	70x70x10	0,150

silników piezoelektrycznych, które zostały opracowane i są wytwarzane w Politechnice Kijowskiej - tabela 1. Największy silnik skonstruowany w tym ośrodku posiada moment obrotowy na wale 10 Nm przy 48 obr/min, co daje moc obciążenia 50 W. Natomiast jeśli chodzi o prędkość obrotową, uzyskano górną granicę 10000 obr/min. Przewiduje się jednak, że największe zastosowanie tych silników będzie w zakresie małych mocy (ok. 3 W).

W zaletach tego typu silników podkreśla się:

- prostotę budowy,
- niepalność,
- można dopuścić wysoką temperaturę pracy (kilkaset stopni C),
- cały silnik może być wykonany z elementów niemetalowych (materiały ceramiczne, szkło, tworzywa sztuczne),
- parametry i charakterystyki silnika są znacznie korzystniejsze niż silników elektromagnetycznych, między innymi silniki te cechuje duża stabilność i równomierność prędkości obrotowej, stąd przeprowadza się próby ich stosowania w videomagnetofonach, rejestratorach magnetycznych itp.

LITERATURA

[1] Wstęp do piezoelektroniki. Praca zbiorowa. WNT, Warszawa 1981.

[2] Migurski P., Pietrzyk W.: Wykorzystanie efektu piezoelektrycznego do budowy przetworników elektromechanicznych. Praca dyplomowa. Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych, Gliwice 1983.

[3] Vishnevski V.S., Lavrinienko V.V.: A piezo-Electric Motor. Patent USA Nr 4019079, patent U.K. Nr 1480864, patent Francja Nr 2277458, patent Canada Nr 1034179.

[4] Trofimow A.I., Jewmjenjenko W.W.: Liniejnyje piezoeljektriczeskije mikrodwigatjeli. Eljektriczjestwo. 1981 r. Nr 5.

[5] Ławrinjenko W.W., Wisznjewskij W.S., Bojczjenko O.Ł., Hadkjernicznyj S.P., Szuljrjenko A.P.: Piezoeljektriczjeskij dwigatjel. Eljektriczjestwo 1981 r. Nr 6.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do redakcji dnia 2.V.1984 r.

ПЪЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ

Р е з ю м е

Новые пъезоэлектрические материалы керамического прогснождения имеют энергетический коэффициент полезного действия несколько десятков процент. Эти материалы дают возможность строения электромеханических преобразователей энергии-пъезоэлектрических двигателей. В статье предложены основы постройки и действия пъезоэлектрического двигателя, а также приведены модель такого двигателя и результаты экспериментальных испытаний полученные на этой модели.

PIEZO-ELECTRIC MOTOR

S u m m a r y

New piezoelectric ceramic materials give the possibility of energy transformation with efficiency of some scores of per cent.

These materials clear a way for construction of electromechanical transformers. In the paper the principles of construction and action of piezoelectric motor are given. There is also presented a working model of such a motor and its testing results.