

Tadeusz MISSALA

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Warszawa

## PIEZOELEKTRYCZNY PRZETWORNIK WYKONAWCZY DLA ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH

*W artykule przedstawiono najważniejsze elementy teorii zjawiska piezoelektrycznego odwrotnego oraz podstawowe właściwości elementów wykonawczych, bazujących na tym zjawisku. Przytoczono również ważniejsze wzory dla obliczania tych elementów. Zaprezentowano model przesuwnika kroczącego zbudowanego w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów oraz podano jego pomierzone charakterystyki.*

*Autor składa podziękowanie p. mgr inż. W. Klimasarze, konstruktorowi rozwiązania mechanicznego i p. mgr inż. R. Mazurkiewiczowi, konstruktorowi zasilacza, za owocną współpracę przy realizacji tematu.*

### I. WSTĘP

Elektromechaniczne przetwarzanie energii, t.j. zamiana energii mechanicznej na elektryczną i odwrotnie było, od początku rozwoju nauki o elektryczności, jednym z jej ważniejszych zagadnień.

Naturalnym dążeniem było wykorzystywanie każdego zjawiska fizycznego umożliwiającego realizację elektromechanicznego przetwarzania energii. Jednym z takich zjawisk jest zjawisko piezoelektryczne oraz zjawisko piezoelektryczne odwrotne zwane elektrostatyką, występujące w materiałach nazywanych ferroelektrykami.

Najwcześniej poznanym materiałem o właściwościach piezoelektrycznych był kwarc, lecz stosowanie go było trudne i drogie. Kolejno właściwości te wykryto w 1921 r. w soli Seignette'a (inaczej soli Rachele'a —  $\text{Na KC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) zsyntetyzowanej w 1655 r. W czasie I wojny światowej była ona stosowana do wytwarzania i pomiaru fal akustycznych. Stosowanie jej jest ograniczone ze względu na wysoką higroskopijność oraz niski punkt Curie powodujący, że właściwości ferroelektryczne są zachowane w stosunkowo wąskim zakresie temperatur od  $-15^\circ\text{C}$  do  $+22^\circ\text{C}$ .

W 1940 r. Busch i Scherrer wykryli właściwości ferroelektryczne w fosforanie potasu (KDP), zaś w 1945 r. zespół badaczy: Vul i inni znaleźli ferroelektryczny kryształ tytanianu baru, co zapoczątkowało badania nad materiałami piezoelektrycznymi ceramicznymi, obecnie najbardziej rozpowszechnionymi.

## 2. ZJAWISKO PIEZOELEKTRYCZNE I FERROELEKTRYKI

### 2.1. Zjawisko piezoelektryczne [2, 3, 4, 5]

#### 2.1.1. Podstawowe określenia

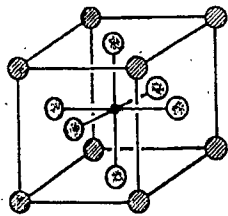
Piezoelektrycznością lub zjawiskiem piezoelektrycznym nazywa się polaryzację elektryczną materiału pod wpływem działania sił zewnętrznych lub odkształceń. Właściwości te mają m. in. kryształy należące do klas krystalograficznych bez środka symetrii. Płytką wyciętą z kryształu prostopadle do kierunku polaryzacji, pokryta elektrodami z metalu, wytwarza na swej powierzchni ładunki elektryczne pod wpływem sił odkształcających odpowiednio skierowanych. Jest to zjawisko piezoelektryczne proste.

Zjawiskiem piezoelektrycznym odwrotnym nazywa się zjawisko odkształcania się kryształu pod wpływem przyłożonego do niego pola elektrycznego. Jest ono wynikiem położenia ładunków elektrycznych w sieci krystalicznej kryształu. Zjawisko piezoelektryczne jest wykorzystywane głównie do przetwarzania sygnałów elektrycznych na sygnał mechaniczny i odwrotnie. Umożliwia to m.in.:

- współpracę elementów rezonansowych i fal sprężystych z układami i falami pomiarowymi,
- budowę przetworników pomiarowych dla wielkości mechanicznych,
- budowę mikroświatłowodów liniowych i obrotowych.

Materiałami piezoelektrycznymi nazywa się materiały o dostatecznie silnych właściwościach piezoelektrycznych i odpowiedniej odporności na inne czynniki fizyczne i chemiczne, umożliwiające stosowanie tych materiałów w urządzeniach technicznych (rezonatory, przetworniki pomiarowe, przetworniki wykonawcze). Są to głównie niektóre kryształy nieorganiczne (kryształy piezoelektryczne) wzmiankowane wyżej, niektóre materiały ceramiczne (ceramika piezoelektryczna), niektóre naturalne materiały organiczne (np. drewno) oraz niektóre tworzywa sztuczne. Obecnie w technice bardzo dużą rolę odgrywają materiały ceramiczne.

Piezoelektryczne materiały ceramiczne, ze względu na swą naturę, są normalnie materiałami izotropowymi, niepiezoelektrycznymi, a ich właściwości piezoelektryczne są formowane w czasie procesu produkcyjnego poprzez polaryzację w polu elektrycznym. Pozwala to na uzyskanie tzw., polaryzacji trwałej (poling), przy czym pozwala to na wybranie kierunku osi polaryzacji; zgodnie z Publikacją IEC [1] tę oś przyjmuje się jako oś Z. Spolaryzowane materiały ceramiczne dają odpowiedź liniową na małe sygnały



$ABO_3$   
 A  $\text{Pb, Ba}$   
 B  $\text{Ti, Zr}$   
 O  $\text{O}$

Rys. 1. Siatka przestrzenna  
 Pierowskiego kryształu  
 $ABO_3$  ( $BaTiO_3$ ) [7]

wejściowe. Ceramika piezoelektryczna są to materia-  
 ły o ogólnym wzorze chemicznym  $ABO_3$ , przy czym  
 jako pierwiastek A występuje ołów (Pb) lub bar (Ba),  
 zaś jako pierwiastek B - tytan (Ti) lub cyrkon (Zr)  
 i o siatce krystalicznej typu Perowskiego (rys. 1).  
 W trakcie polaryzacji następuje wychylenie central-  
 nie położonego atomu Ti lub Zr, co powoduje  
 wystąpienie polaryzacji trwałej (trwałego momentu  
 dipolowego). Objawia się to występowaniem prze-  
 strzennego wektora polaryzacji P lub równoważ-  
 nego mu wektora indukcji elektrycznej D na powie-  
 rchni elementu ceramicznego. Oba te wektory mogą być pomierzone.

Materiały ceramiczne zachowują nabytą polaryzację w temperaturach niższych od tej  
 temperatury zwanej punktem Curie (przez analogię do ferromagnetyków); powyżej  
 temperatury tracą swoją polaryzację. Ze względu na zachowanie analogiczne do  
 zachowania ferromagnetyków są również zwane ferroelektrykami.

### 2.1.2. Podstawowe zależności matematyczne

Ogólnym równaniem fizyki opisującym zjawisko piezoelektryczne jest [4]:

$$E_i = \sum_j P_{ijk} S_{jk} \quad i, j = x, y, z \quad (2.1)$$

gdzie:

$E_i$  — składowa wektora natężenia pola elektrycznego w kierunku osi  $i$  w V/m

$S_{jk}$  — tensor odkształceń względnych m/m

$P_{ijk}$  — trójwymiarowy tensor współczynników piezoelektrycznych

Jeżeli kryształ ma symetrię osiową to  $P_{ijk} = 0$

Wygodniejszą i obecnie powszechnie stosowaną formą zapisu równań stanu dla  
 elementów piezoelektrycznych jest forma macierzowa [2]:

$$\begin{cases} S = s^E T + d_i E \\ D = dT + \epsilon^T E \end{cases} \quad (2.2)$$

gdzie:

T — tensor naprężeń Pa

S — tensor odkształceń względnych m/m

- D — wektor indukcji elektrycznej C/m<sup>2</sup>
- S<sup>z</sup> — macierz podatności mechanicznych w stałym polu elektrycznym m<sup>2</sup>/N
- d — macierz stałych piezoelektrycznych dla odkształcenia i pola elektrycznego C/N
- ε<sup>T</sup> — macierz przenikalności elektrycznej przy stałym odkształceniu
- d<sub>t</sub> — macierz transportowana względem macierzy d

Pomiędzy wektorami natężenia pola elektrycznego, indukcji elektrycznej i polaryzacji zachodzi zależność [4]:

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.3)$$

gdzie:

P — wektor polaryzacji elektrycznej

Dla kryształu anizotropowego składowe wektora P są:

$$P_i = \sum_j a_{ij} E_j \quad i, j = x, y, z \quad (2.4)$$

Współczynniki występujące w równaniu (2.2) określa się następująco [6]:

— jeżeli element jest w stanie zwarcia (E=0), otrzymuje się:

$$\begin{cases} D = dT & \text{stąd} \\ d = \frac{D}{T} & \frac{C}{N} \end{cases} \quad (2.5)$$

— jeżeli element nie jest obciążony mechanicznie (T=0), to:

$$\begin{cases} S = d_t E & \text{stąd} \\ d_t = \frac{S}{E} & \frac{C}{N} \end{cases} \quad (2.6)$$

— jeżeli element jest w stanie jałowym (D=0), otrzymuje się:

$$E = - \frac{d}{\epsilon^T} T$$

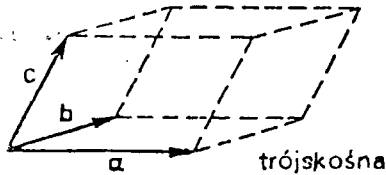
a jeżeli oznaczyć  $\frac{d}{\epsilon^T} = g$ , to jest:

$$E = -gT \quad (2.7)$$

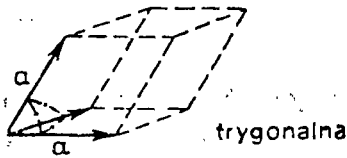
gdzie:

$g$  — jest piezoelektryczną stałą napięciową w  $\frac{Vm}{N}$

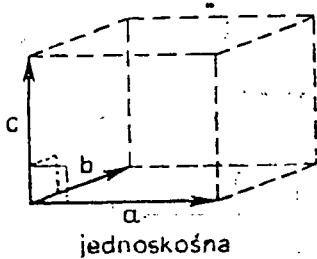
Z kombinacji równań (2.2) przy założeniu braku obciążenia mechanicznego ( $T=0$ ) otrzymuje się:



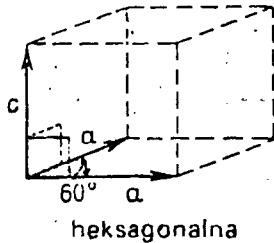
$$S = \frac{dt}{\epsilon^T} D = gD \quad (2.8)$$



Szczególnie wygodnym zapisem równań (2.2) jest macierz elektropiezospężystości [2], stanowiąca zbiór współczynników materiałowych występujących w równaniach stanu. Układ współczynników w macierzy elektropiezospężystości umożliwia łatwe zestawienie równań stanu dla kryształu piezoelektrycznego o danej symetrii (rys. 2).

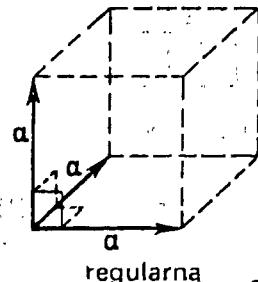
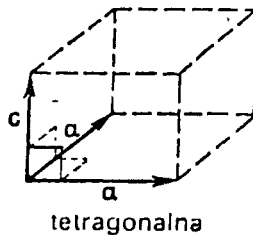
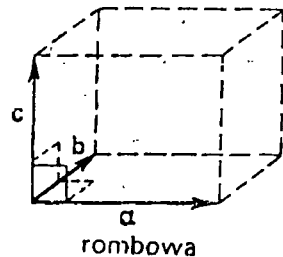


Oprócz zmiennych i współczynników występujących w równaniach (2.2), z punktu widzenia przydatności materiału piezoelektrycznego do przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną, ważną rolę odgrywa statyczny współczynnik sprężenia elektromechanicznego. Współczynnik ten jest określony wzorem:



$$k = \sqrt{\frac{W_{12}^2}{W_1 W_2}} \quad (2.9)$$

w którym:  $W_{12}$  - gęstość energii piezoelektrycznej dana jako:



Rys. 2. Siedem klas sieci krystalicznej [4].

$$W_{12} = \frac{1}{2} \sum_k d_{ik} E_i T_k \quad (2.10)$$

$W_1$  — gęstość energii mechanicznej:

$$W_1 = \frac{1}{2} \sum_{pq} s_{pq}^E T_p T_q \quad (2.11)$$

$W_2$  — gęstość energii elektrycznej:

$$W_2 = \frac{1}{2} \sum_{ij} \epsilon_{ij}^T E_i E_j \quad (2.12)$$

Przyczym:  $p, q$  zmieniają się od 1 do 6, a  $i, j$  od 1 do 3. Definiuje się również współczynniki sprzężenia cząstkowe  $k_{ip}$ , określające sprzężenia pomiędzy energią piezoelektryczną a energiami: elektryczną występującą w osi  $i$  i mechaniczną występującą w osi  $p$ . Macierz elektropiezospężystości materiałów ceramicznych podano w tabl. 1 [1, 7].

Tablica 1. Macierz elektropiezorezystywności materiałów ceramicznych.

	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$E_1$	$E_2$	$E_3$
$S_1$	$s_{11}$	$s_{12}$	$s_{13}$						$d_{31}$
$S_2$	$s_{12}$	$s_{11}$	$s_{13}$						$d_{31}$
$S_3$	$s_{13}$	$s_{13}$	$s_{33}$						$d_{33}$
$S_4$				$s_{44}$				$d_{15}$	
$S_5$					$s_{44}$				$d_{15}$
$S_6$						$s_{66}$			
$D_1$					$d_{15}$		$\epsilon_{11}$		
$D_2$				$d_{15}$				$\epsilon_{11}$	
$D_3$	$d_{31}$	$d_{31}$	$d_{33}$						$\epsilon_{33}$

$$s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$$

Układ macierzy wg [1].

Definiuje się również dla nich współczynniki sprzężenia elektromechanicznego:

— poprzeczny (transwersalny):

$$k_{31} = \sqrt{\frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T s_{11}^E}} \quad (2.13)$$

planarny:

$$k_p = \sqrt{\frac{2}{1 + s_{12}^E/s_{11}^E}} \quad k_{31} = \sqrt{\frac{2 d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T (s_{11}^E + s_{12}^E)}} \quad (2.14)$$

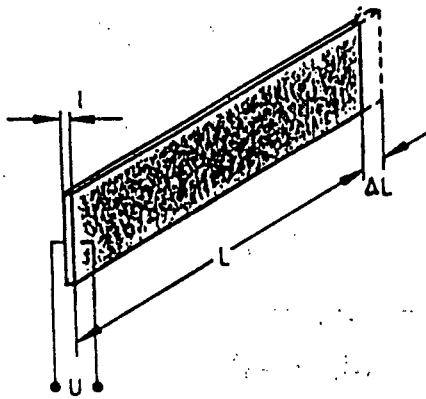
## 2.2. Materiały piezoelektryczne

Właściwości niektórych materiałów piezoelektrycznych są podane w [2, 6, 7], natomiast w tabl. 2 zestawiono właściwości polskich płytek ceramicznych produkcji CERAD.

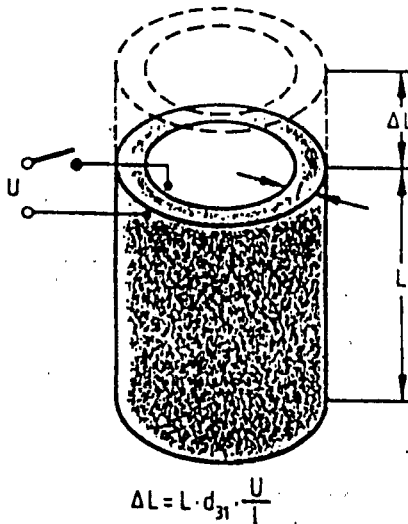
## 3. PODSTAWOWE ELEMENTY KONSTRUKCYJNE

Tablica 2. Dane ceramiki piezoelektrycznej "CERAD" (PL)

Typ	K2
współczynniki piezoelektryczne	$d_{31} = -170 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$ $d_{33} = 350 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$
stała dielektryczna	$\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 2100 \div 2200$
współczynnik sprzężenia	$k_{33} = 0,52$
rezystywność	$\zeta = \sim 10^{10} \Omega \text{m}$
grupa materiałowa	PZT
skład chemiczny	$\text{Pb (ZrTi)}_3 \text{O}_3$
grubość płytki	$L_E = 0,5 \text{ mm}$
średnica płytki	$D = 10 \text{ mm}$
napięcie koercji	$E_c = 1500 \text{ V/mm}$



Rys. 3. Belka warstwowa



Rys. 4. Element rurkowy

Tensorowa struktura równań (2.1) i (2.2) wskazuje na możliwość zrealizowania kilku wykonawczych elementów piezoelektrycznych wykonawczych. Stosuje się trzy główne wykonania:

- elementy warstwowe:  
belka (rys. 3) lub płytka,  
rurka (rys. 4),  
stos płytek (rys. 5).

### 3.1. Elementy warstwowe

Elementy warstwowe są wykonywane najczęściej jako dwuwarstwowe belki prostokątne lub płyty okrągłe.

Warstwy mają przeciwną polaryzację (rys. 6). Poszczególne warstwy mogą być połączone szeregowo lub równoległe. Wykorzystywane jest zjawisko zmiany wymiaru poprzecznego do kierunku pola elektrycznego. Właściwości tych elementów jako elementów wykonawczych są opisane następującymi zależnościami [8]:

- a) belka warstwowa jednostronnie umocowana (rys. 6a)

$$\zeta_{max} \approx 3 d_{31} \left(\frac{l}{d}\right)^2 U \quad (3.1)$$

$$F_{max} \approx \frac{3}{4} \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \frac{d}{l} bU$$

$$l \geq 20d; l \geq 10b \quad (3.2)$$



$$f_{rez} \cong 0,16 \frac{d}{l^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma s_{11}^E}} \quad (3.3)$$

przy czym:

- $\zeta, F, d, l, b$  — wg oznaczeń na rysunku  
 $f_{rez}$  — częstotliwość rezonansu mechanicznego  
 $\gamma$  — gęstość materiału  
 $U$  — napięcie dla układu równoległego połączeń

Przy przyłożeniu napięcia  $U$  do elementu z warstwami połączonymi szeregowo otrzymuje się o połowę mniejsze wartości  $\zeta$  i  $F$ .

b) belka warstwowa swobodna podparta na końcach (rys. 6b)

$$\zeta_{max} \approx \frac{3}{4} d_{31} \left(\frac{l}{d}\right)^2 U \quad (3.4)$$

$$F_{max} \approx 3 \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \cdot \frac{db}{l} U \quad (3.5)$$

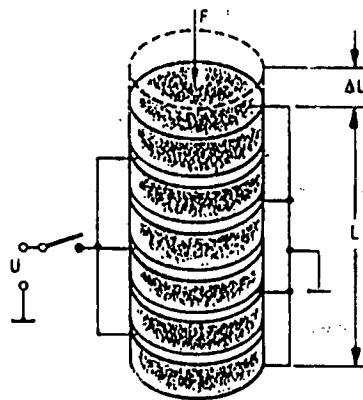
$$f_{rez} \cong \frac{d}{l^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma s_{11}^E}} \quad (3.6)$$

Oznaczenia jak poprzednio.

c) płyta okrągła swobodnie podparta (rys. 6 c)

$$\zeta_{max} = 3d_{31} \left(\frac{R}{d}\right)^2 U \quad (3.7)$$

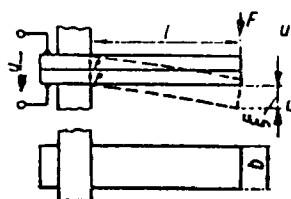
$$F_{max} = 4\pi \frac{d_{31}}{s_{11}^E} dU \quad (3.8)$$



$$\Delta L = d_{31} \cdot n \cdot U$$

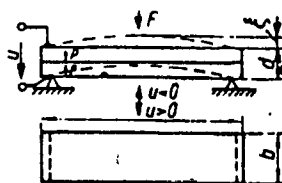
Rys. 5. Stos płytek

a) połączenie elektryczne szeregowe



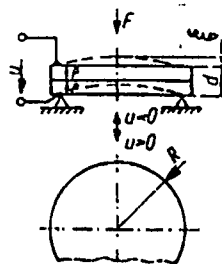
połączenie elektryczne równoległe

b) połączenie elektryczne szeregowe



połączenie elektryczne równoległe

c) połączenie elektryczne szeregowe



połączenie elektryczne równoległe

Rys. 6. Elementy warstwowe

a) helka umocowana jednostronnie, b) belka podparta swobodnie, c) płyta okrągła podparta swobodnie.

$$f_{rez} \approx 0,255 \frac{d}{R^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma s_{31}^E}} \quad (3.9)$$

W przypadku zastosowania w pompie membranowej wypierana objętość ciecży jest:

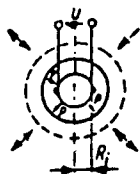
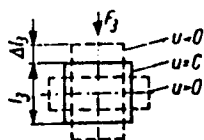
$$V_{max} \approx \frac{3}{2} \pi d_{31} \frac{R \cdot 4}{d^2} U \quad \text{dla } R \geq 20d \quad (3.10)$$

### 3.2. Elementy rurkowe

Element jest wykonany w postaci rurki cienkościennej, której obie powierzchnie walcowe są pokryte elektrodami (rys. 7). Tu również wykorzystuje się zjawisko zmiany wymiaru poprzecznego (długość rurki) względem kierunku przyłożonego pola elektrycznego. Właściwości tego elementu jako elementu wykonawczego scharakteryzowane są następującymi zależnościami [8]:

$$\frac{\Delta l_3}{l_3} = d_{31} \frac{U}{R_o - R_i} + s_{11}^E \cdot \frac{F_3}{\pi (R_o^2 - R_i^2)} \quad (3.11)$$

$$\frac{\Delta W}{W} \approx d_{33} \frac{U}{R_o - R_i} + \frac{s_{11}^E}{3} \cdot \frac{F_3}{\pi (R_o^2 - R_i^2)} \quad (3.12)$$



$$\frac{\Delta W}{W} = d_{31} \frac{U}{R_o - R_i} + s_{33}^E \Delta p \quad (3.13)$$

Częstotliwości rezonansowe:

-- dla drgań grubości ścianki, przy stałej średnicy wewnętrznej

$$f_D \approx \frac{1}{2(R_o - R_i)} \sqrt{\frac{c_{33}^2}{\gamma}} \quad (3.14)$$

Rys. 7. Element rurkowy

— dla drgań ścianki wewnętrznej i długości

$$f_r = \frac{1}{\pi (R_a - R_i)} \cdot \frac{1}{\sqrt{s_{13}^E \gamma}} \quad (3.15)$$

przy czym:

grubość ścianki  $W = R_a - R_i$

ciśnienie hydrostatyczne  $\Delta p_r$  działa promieniowo

różnica ciśnień  $\Delta p_r = (p_a - p_i)$

indeks  $a$  dla ścianki zewnętrznej

indeks  $i$  dla ścianki wewnętrznej

### 3.3. Stos płytek

Stos płytek jest złożony z płytek okrągłych lub prostokątnych dwustronnie pokrytych elektrodami (rys. 8). Wykorzystuje się deformację w kierunku działającego pola elektrycznego.

Deformacja ta wynosi [9]:

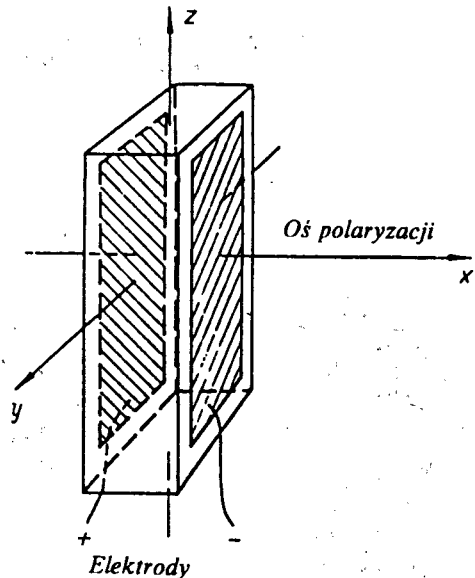
$$(3.16) \quad \Delta L_x = \frac{d_{33} U L_E}{L_E} = d_{33} U$$

gdzie:

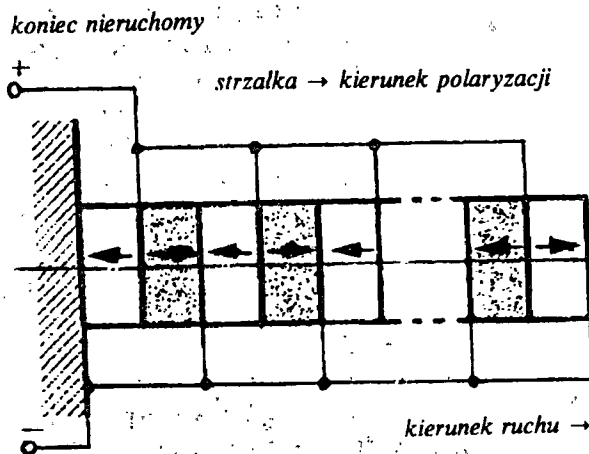
$\Delta L$  deformacja w kierunku osi  $x$  (przyłożonego pola elektrycznego)

$L_E$  grubość płytki

Deformacja  $\Delta L_x$  ma kierunek przyłożonego pola, tj. następuje powiększenie rozmiaru płytki. Ponieważ  $\Delta L_x$  jest małe, dla uzyskania przesunięcia porównywalnego z przesunięciami, jakie dają elementy warstwowe i rur-



Rys. 8. Pojedyncza płytka



Rys. 9. Schemat stosu płytek.

rodami zewnętrznymi. Jak wynika z obliczeń modelowych [10] wykonanych dla układu jak na rys. 11a, deformacja płytki wygląda jak na rys. 11b, tj. brzeg płytki nie pokryty elektrodą nie deformuje się. Na rys. 10b pokazano schemat kinematyczny działania stosu.

Stos zbiera się w obudowy, których przykłady podano na fot. 1. Płytki są umieszczone wewnątrz sprężyny rurowej, która stanowi obudowę stosu a jednocześnie daje wstępne naprężenia, konieczne do prawidłowego działania elementu.

### 3.4. Porównanie

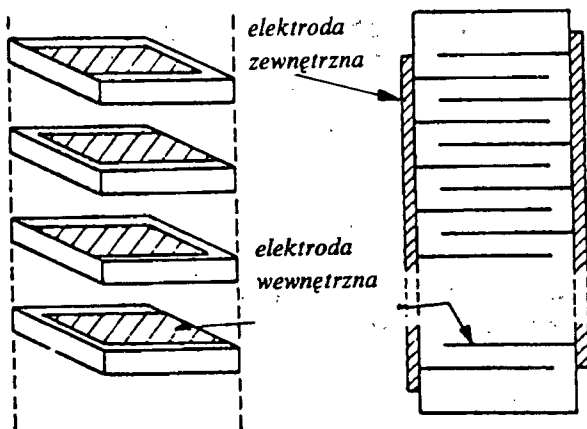
Stała dielektryczna  $d_{33}$  jest zawsze większa niż stała  $d_{31}$ , na ogół jest ona dwukrotnie większa. Oznacza to, że stos płytek daje, przy tej samej długości, prawie dwukrotnie większe wydłużenia niż belka warstwowa, lub przy tych samych wymaganych wydłużeniach stos może być dwukrotnie krótszy. Ponadto wydłużenie jest dla stosu niez-

kowe, należy zestawić stos płytek według schematu na rys. 9. Wówczas całkowite przesunięcie końca stosu będzie:

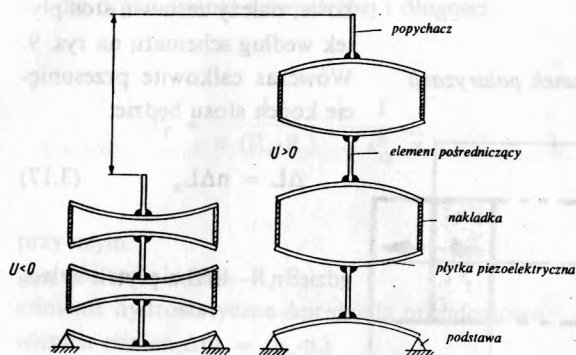
$$\Delta L = n\Delta L_x \quad (3.17)$$

gdzie:  $n$  — liczba płytek w stosie.

Należy tu zwrócić uwagę na występujące zjawisko brzegowe. Zostanie ono rozpatrzone na podstawie schematu stosu podanego na rys. 10a. Elektrody płytek dochodzą do jednego brzegu, którym łączą się z elekt-



Rys. 10a. Schemat budowy stosu płytek.



Rys. 10b. Schemat działania stosu

stosowania rurek długich i cienkościennych, gdyż wydłużenie dla nich wynosi [9]; (ze wzoru 3.11 przy  $F_3=0$ ):

$$\Delta L_{31} = \frac{d_{31}UL}{L_E} \quad (3.18)$$

gdzie:

- $d_{31}$  — stała piezoelektryczna
- $U$  — przyłożone napięcie
- $L$  — długość rurki
- $L_E$  — grubość rurki

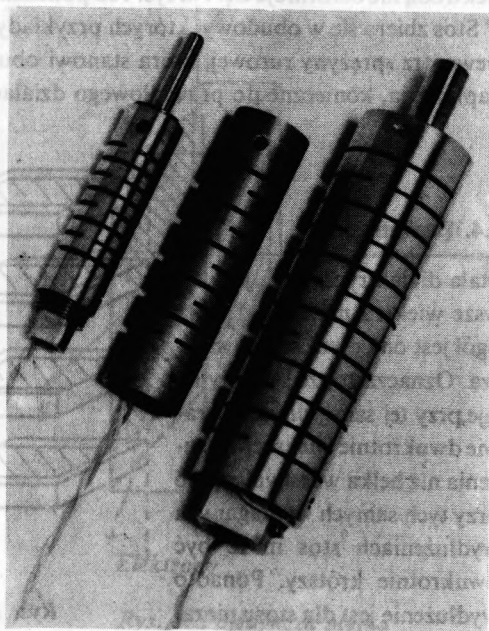
Ponieważ  $L_E$  powinno być małe, to siły przenoszone będą niewielkie skutkiem czego element będzie podatny na wyboczenia (mało stabilny). Natomiast zaletą elementu rurkowego jest jego łatwość w wykonaniu oraz taniocść, tym niemniej możliwości stosowania elementów rurkowych są ograniczone. Poza stosami płytek znaczne zastosowania znajdują również belki warstwowe.

### 3.5. Zastosowania

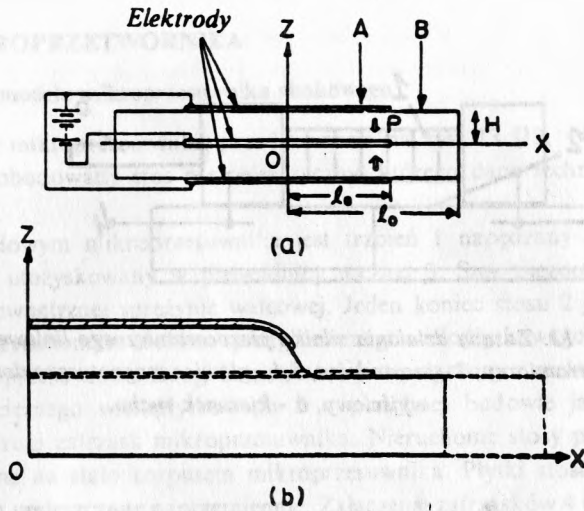
Elementy piezoelektryczne wykonawcze znajdują różnorakie zastosowania [12]; wykorzystuje się je m.in. w budowie:

leżne od powierzchni poprzecznej płytek. Zastosowanie płytek o większej średnicy daje elementy stabilniejsze i zdolne do przenoszenia większych sił. To powiększenie sił przenoszonych jest również możliwe w przypadku belek warstwowych, zaś nie jest możliwe w przypadku rurek.

Elementy rurkowe umożliwiają uzyskanie znacznie większych wydłużeń tylko w przypadku za-



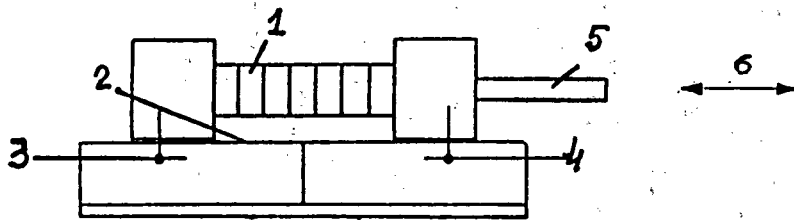
Fot. 1.  
Wygląd zewnętrzny stosu obudowanego.



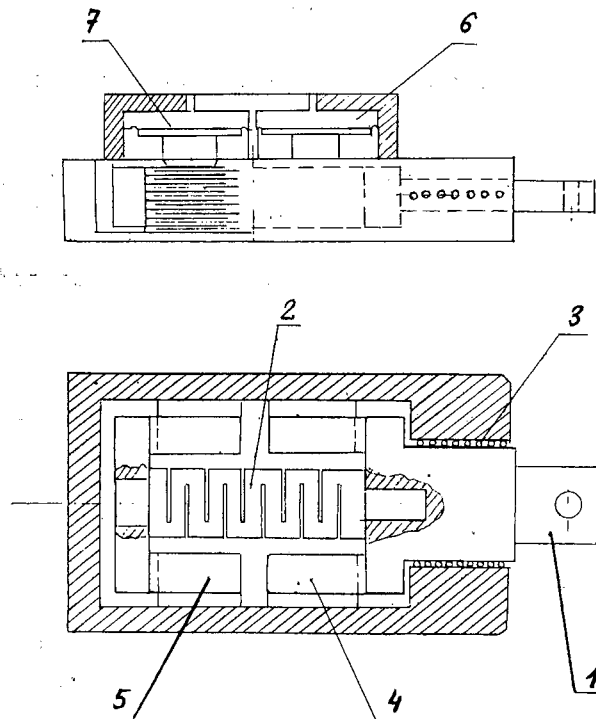
Rys. 11. a) schemat stosu przyjęty do modelowania, b) wyniki obliczeń symulacyjnych.

- mikrosilników o ruchu obrotowym i liniowym, ciągłym i skokowym,
- przesuwników taśmy magnetycznej, przekaźników, silników elektrohydraulicznych i pompki membranowych,
- translatorów i oscylatorów do poruszania elementów optycznych np. w interferometrach i przyrządach laserowych,
- zaworów wtryskowych dla silników spalinowych.

Szczególnie interesujące, z punktu widzenia robotyki, jest zastosowanie elementów piezoelektrycznych w budowie translatora skokowego (rys. 12) o wielokrotnionym ruchu trzpienia wyjściowego. Belka piezoelektryczna lub stos płytek (1) może być blokowana zatrzaskami (3,4), przy czym wykorzystuje się efekt przedstawiony na rys. 10b. Przez odpowiednią sekwencję włączania napięć podawanych na element piezoelektryczny i na zatrzaski otrzymuje się ruch kroczący: zablokowanie początku elementu, wydłużenie go, zablokowanie końca elementu, zwolnienie początku elementu, skurczenie elementu, zablokowanie początku itd. Ruch wsteczny następuje według sekwencji odwrotnej.



**Rys. 12. Zasada działania silnika piezoceramicznego liniowego [20].**  
 1 - stos piezoceramiczny, 2 - prowadnica, 3,4 - głowice magnetyczne dociskowe, 5 - trzpień wyjściowy, 6 - kierunek ruchu.



**Rys. 13. Szkic budowy modelu mikroprzesuwnika.**  
 1 - trzpień wyjściowy, 2 - stos piezoceramiczny, 3 - prowadnica, 4 i 5 - sprzęgła cierne, 6 i 7 - komory membranowych siłowników pneumatycznych.



## 4. MODEL MIKROPRZETWORNIKA

### 4.1. Opis budowy modelu mikroprzesuwnika skokowego

Schemat budowy mikroprzesuwnika przedstawiono na rys. 13 [13, 14]. Elementem napędowym jest obudowany stos piezoelektryczny, którego dane techniczne podano w tablicy 2.

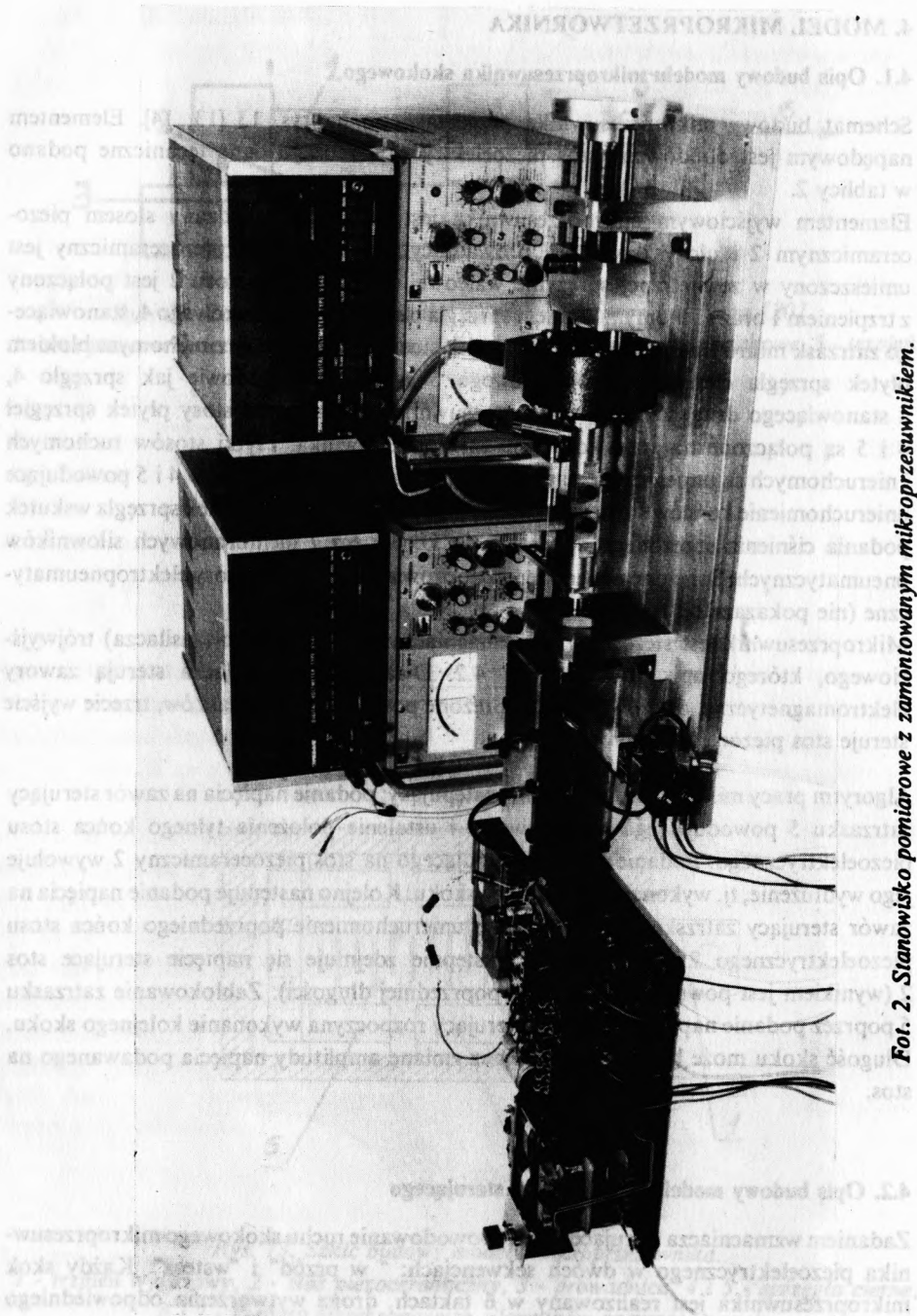
Elementem wyjściowym mikroprzesuwnika jest trzpień 1 napędzany stosem piezoceramicznym 2 i ułożyskowany w prowadnicy tocznej 3. Stos piezoceramiczny jest umieszczony w zewnętrznej sprężynie walcowej. Jeden koniec stosu 2 jest połączony z trzpieniem 1 oraz ruchomym blokiem sprzęgła ciernego wielopłytkowego 4, stanowiącego zatrzask mikroprzesuwnika. Drugi koniec stosu jest połączony z ruchomym blokiem płytek sprzęgła ciernego wielopłytkowego 5 o podobnej budowie jak sprzęgło 4, a stanowiącego drugi zatrzask mikroprzesuwnika. Nieruchome stopy płytek sprzęgieł 4 i 5 są połączone na stałe korpusem mikroprzesuwnika. Płytki stosów ruchomych i nieruchomych są umieszczone naprzemiennie. Załączenie zatrzasków 4 i 5 powodujące unieruchomienie końców stosu uzyskuje się przez ściskanie bloku płytek sprzęgła wskutek podania ciśnienia sprężonego powietrza do komór 6 i 7 membranowych siłowników pneumatycznych. Sprężone powietrze jest doprowadzane przez zawory elektropneumatyczne (nie pokazane na rysunku).

Mikroprzesuwnik jest sterowany ze wzmacniacza elektronicznego (zasilacza) trójwyjściowego, którego opis podano w p. 4.2. Dwa z wyjść zasilacza sterują zawory elektromagnetyczne, doprowadzające sprężone powietrze do zatrzasków, trzecie wyjście steruje stos piezoceramiczny.

Algorytm pracy mikroprzesuwnika jest następujący: podanie napięcia na zawór sterujący zatrzasku 5 powoduje jego zablokowanie i ustalenie położenia tylnego końca stosu piezoelektrycznego. Podanie napięcia sterującego na stos piezoceramiczny 2 wywołuje jego wydłużenie, tj. wykonanie pierwszego skoku. Kolejno następuje podanie napięcia na zawór sterujący zatrzasku 4, co powoduje unieruchomienie poprzedniego końca stosu piezoelektrycznego 2 i trzpienia 1. Następnie zdejmuje się napięcie sterujące stos 2 (wynikiem jest powrót stosu do jego poprzedniej długości). Zablokowanie zatrzasku 5 poprzez podanie napięcia na zawór sterujący rozpoczyna wykonanie kolejnego skoku. Długość skoku może być zmieniana przez zmianę amplitudy napięcia podawanego na stos.

### 4.2. Opis budowy modelu wzmacniacza sterującego

Zadaniem wzmacniacza sterującego jest spowodowanie ruchu skokowego mikroprzesuwnika piezoelektrycznego w dwóch sekwencjach: " w przód" i "wstecz". Każdy skok mikroprzesuwnika jest realizowany w 6 taktach, drogą wytworzenia odpowiedniego



Fot. 2. Stanowisko pomiarowe z zamontowanym mikroprzesuwnikiem.

stanu (podanie napięcia lub jego brak) na wyjściach M1, M2 i S w każdym taktie. Stany wyjść M1, M2, S dla poszczególnych taktów przy ruchu "w przód" i "wstecz" przedstawiono w tablicy 3. Wyjścia M1 i M2 sterują zawory elektropneumatyczne zatrząsków pneumatycznych mikroprzesuwnika, natomiast wyjście S uaktywnia stos piezoceramiczny, powodując jego wydłużenie. Dla napięć wyjściowych wyjść M1 i M2 przyjęto wartość 24 V, wynikającą z parametrów zaworów. Napięcie na wyjście S może być nastawiane za pomocą rezystora w granicach od 400 V do ok. 800 V. W modelu zrealizowano to (dla uproszczenia) przez przelutowywanie rezystorów, zgodnie ze szkicem (rys. 14)). Każdy i-ty przerzutnik jest wyzwalany narastającym zboczem wyjścia  $Q_{i-1}$  poprzedniego, w ten sposób generuje się na wyjściach  $Q_i$  sekwencję taktów, której przebieg pokazano na rys. 15. Czas trwania każdego taktu  $\tau_i$  jest nastawiany potencjometrem w zakresie od ok. 0,5 s do ok. 3 s. Powtarzające się kolejno sekwencje taktów mogą być wygaszane lub wznawiane przyciskiem START-STOP powodującym zablokowanie lub odblokowanie bramki AND3 układu MCY74081<sub>II</sub>. Zatrzymanie sekwencji taktów następuje zawsze na taktie 1.

Impulsy generowane w poszczególnych taktach (tablica 3) kolejno ładują lub zerują trzy przerzutniki typu D (układy MCY74013). Stany wyjść przerzutników pierwszego 1Q i drugiego 2Q, poprzez bramki AND układu MCY74081 i zanegowane bramki NOR układu MCY74001, sterują, odwracając fazę, wzmacniacze wyjść M1 i M2, zbudowane na tranzystorach T1 i T2 oraz T3 i T4. Przelącznikiem WSTECZ-W PRZÓD zamienia się, poprzez bramki AND, działanie stanów wyjść 1Q i 2Q na wzmacniacze wyjściowe dla M1 i M2. Stan zanegowanego wyjścia trzeciego przerzutnika D-10 steruje odwracającą fazę wzmacniacz wyjścia S, zbudowany na tranzystorach T5 i T6.

Napięcia stałe są uzyskiwane z prostowników mostkowych przyłączonych do uzwojeń transformatora sieciowego TRS 250. Załączenie sieci jest sygnalizowane świeceniem diody emitującej światło czerwone. Stabilizator TDD1615 daje napięcie +15 V zasilające układy scalone. Napięcie +24 V zasila wzmacniacze wyjściowe dla wyjść M1 i M2. Napięcie 800 V, poprzez filtr dolnoprzepustowy złożony z dwóch kondensatorów 4μF/1000V i rezystora R o nastawianej wartości, zasila wzmacniacz wyjścia S.

### 4.3. Badania wstępne modelu

#### 4.3.1. Cele i program badań

Celem przeprowadzonych badań wstępnych modelu mikroprzesuwnika było sprawdzenie podstawowych parametrów wykonanej konstrukcji.

W związku z tym program badań obejmował:

- a) sprawdzenie zakresu przenoszonych sił;
- b) sprawdzenie skuteczności działania zatrząsków pneumatycznych,

c) wyznaczenie charakterystyk drogi odpracowanej w funkcji: liczby skoków, napięcia sterowania i siły obciążającej.

Wykonanie badań wymagało zbudowania specjalnego stanowiska pomiarowego. Opis badań i ich wyniki zostaną podane po omówieniu budowy stanowiska pomiarowego.

#### 4.3.2. Stanowisko pomiarowe

Szkic budowy stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 16 zaś na fot. 2 fotografię stanowiska wraz z zamontowanym mikroprzesuwnikiem, wzmacniaczem sterującym i przyrządami pomiarowymi.

Na sztywnej płycie 2 stanowiącej podstawę stanowiska pomiarowego ustawiono badany mikroprzesuwnik 1 oraz przetworniki pomiarowe drogi 12 i siły 5. Mikroprzesuwnik został przymocowany do podstawy za pomocą wspornika 3 i nakrętki 8. Listwa 11 sprzęga trzpień wyjściowy mikroprzesuwnika z przetwornikiem pomiarowym drogi. Łącznik 9 sprzęga trzpień mikroprzesuwnika z przetwornikiem pomiarowym siły. Konstrukcja łącznika dzięki zastosowaniu łożysk wahliwych, eliminuje wpływ ewentualnych niedokładności montażowych na wyniki pomiarów. Siła obciążająca trzpień mikroprzesuwnika jest zadawana pokrętkiem 14 przez śrubę 15 i sanie 6, poruszające się po prowadnicy 13. Zawory elektropneumatyczne 10 służą do sterowania zatrząsków pneumatycznych mikroprzesuwnika i są uruchamiane przez wzmacniacz sterujący.

Tak przetwornik pomiarowy drogi - transformator różnicowy o liniowym ruchu rdzenia, jak i przetwornik pomiarowy siły mostek tensometryczny dają wyjściowy sygnał elektryczny napięciowy. Sygnały wyjściowe przetworników są mierzone za pomocą woltomierzy cyfrowych typu V541 MERATRONIK. Przed przystąpieniem do pomiarów przetworniki wywzorcowano.

#### 4. 3. 3. Wyniki pomiarów

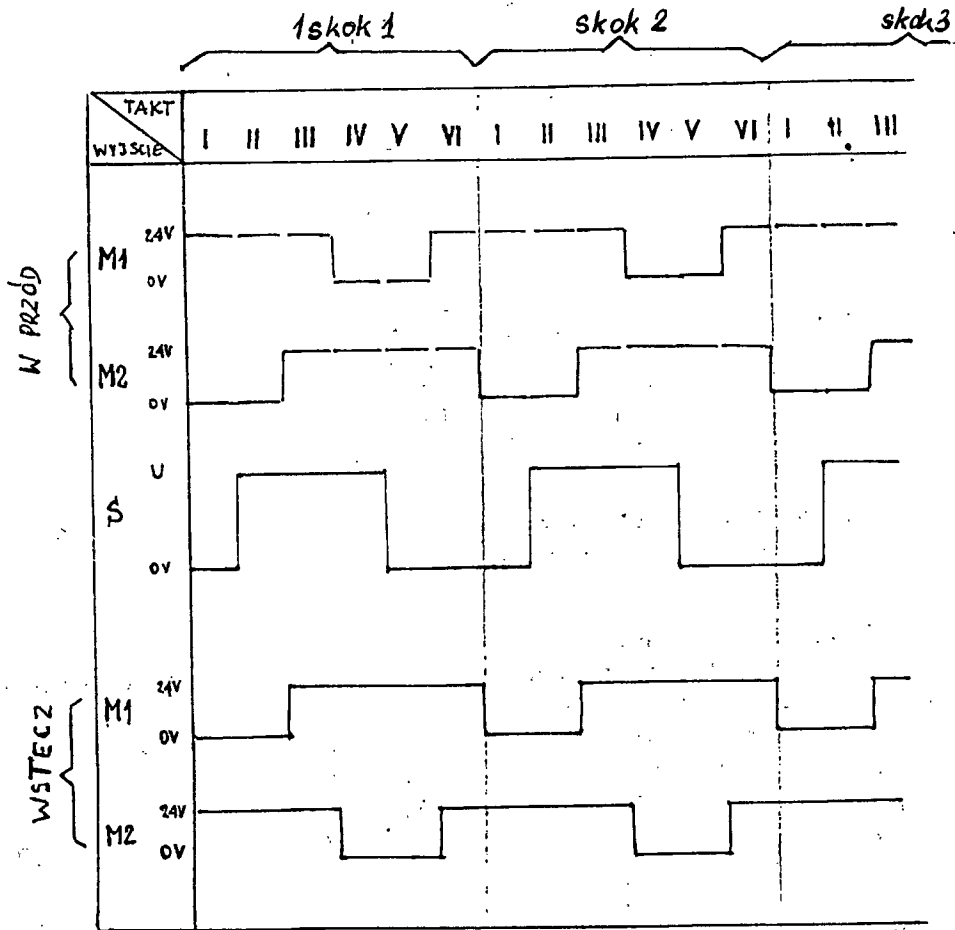
##### 4.3.3.1. Sprawdzenie zakresu przenoszonych sił

Mikroprzesuwnik ustawiony na stanowisku pomiarowym zasilano napięciem 710 V ze wzmacniacza sterującego i obciążano siłą skierowaną przeciwnie do przewidywanego ruchu trzpienia. Siłę zadawano pokrętkiem 14 (rys. 16). Następnie włączano cykl wykonania jednego skoku. Jeżeli skok został wykonany, zwiększano obciążenie aż do zablokowania mikroprzesuwnika. Zablokowanie to nastąpiło przy działaniu siły 375 N.

##### 4.3.3.2. Sprawdzenie skuteczności działania zatrząsków pneumatycznych

Mikroprzesuwnik ustawiono na stanowisku pomiarowym, następnie wysunięto go z położenia początkowego o ok. 10 kroków. Zdjęto napięcie sterowania, po czym zablokowano przedni zatrząsk pneumatyczny (bliższy przetwornika pomiarowego siły).

Tablica 3. Przebiegi napięć wyjściowych.



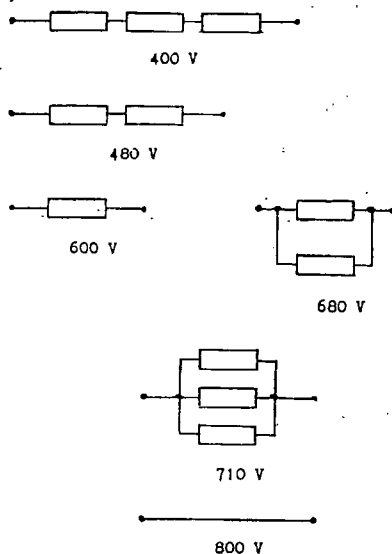
Pokrętem 14 (rys. 16) zadawano siłę aż do wystąpienia poślizgu.

Zaobserwowano:

- wystąpienie drobnego skoku przy obciążeniu 225 N,
- wystąpienie drugiego małego skoku przy obciążeniu 470 N;
- dalszą pewną pracę aż do obciążenia 500 N, tj. do granicy pomiaru.

Pomiar ten był wykonany na niedotartych w czasie eksploatacji płytkach sprzęgła, stanowiącego zatrask.

Uznano, że otrzymane wyniki nie stanowią przeszkody dla przeprowadzenia dalszych pomiarów.

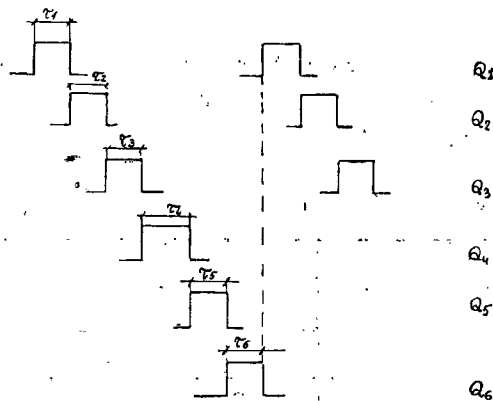


Rys. 14. Układy rezystorów 33k dla nastawiania napięcia wyjściowego na wyjściu S wzmacniacza sterującego.

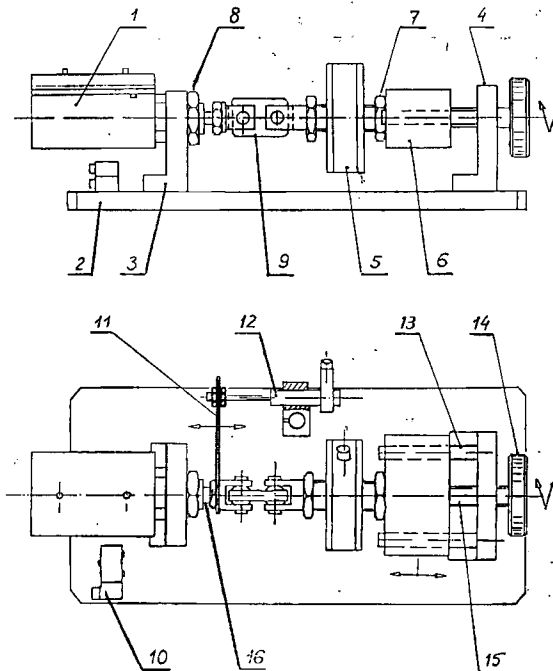
#### 4.3.3.3. Wyznaczenie charakterystyk

Mikroprzesuwnik ustawiono na stanowisku pomiarowym. Pomiar charakterystyk przeprowadzono według następującej procedury:

- mikroprzesuwnik pracował w reżimie wykonywania pojedynczych skoków,
- po wykonaniu każdego skoku mierzono jego długość,
- pomiary wykonywano dla 10 skoków w przód i 10 skoków wstecz,
- pomiary dla nieobciążonego mikroprzesuwnika wykonywano przy rozłączonym łączniku 9 (rys. 16),
- siłę zadawano pokrętelem 14 tak, by była ona skierowana przeciwnie do kierunku ruchu trzpienia,
- ponieważ układ pomiarowy nie utrzymywał stałej wartości siły, nastawiano ją przed i po wykonaniu każdego kroku,
- pomiary wykonano dla napięć sterowania: 710 V, 600 V i 400 V, przy czym dla każdego z napięć wykonywano pomiary dla obciążeń (kolejno) 0, 50, 100, 150, 200 i 250 N, dla każdego obciążenia przy ruchu w przód i wstecz; następnie przełączano na inną wartość napięcia sterowania,
- ponieważ zauważono, że przy ruchu wstecz mikroprzesuwnik przenosi mniejsze obciążenia, zmniejszono je o 25 N, otrzymując tym sposobem pewne dodatkowe informacje,



Rys. 15. Przebiegi impulsów taktowych.



Rys. 16. Stanowisko do badań mikroprzesuwnika.

1 - mikroprzesuwnik, 2 - podstawa, 3 - wspornik do mocowania mikroprzesuwnika, 4 - wspornik śań, 5 - tensometryczny czujnik typ 612013 firmy HOTINGER, 6 - sanie, 7 - nakrętka, 8 - nakrętka do mocowania mikroprzesuwnika do wspornika 3, 9 - łącznik, 10 - zespół zaworów elektropneumatycznych, 11 - listwa, 12 - transformatorowy czujnik przesunięcia, 13 - prowadnice śań, 14 - pokrętło, 15 - śruba nastawcza, 16 - trzpień mikroprzesuwnika.

— przy wyliczaniu długości skoków w ruchu wstecz liczono je od położenia końcowego osiągniętego przy ruchu w przód i oznaczano jako ujemne. Wartości przesunięć po 10 skokach zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Wartości przesunięć po 10 skokach [ $\mu\text{m}$ ]

$U_V$	710		600		400	
$F_N$	+	—	+	—	+	—
0	431	192	306	252	214	159
50	305	212	228	179	167	102
100	210	132	183	107	117	77*
150	207	55	152	98*	87	—
200	158	—	127	—	71	—
250	111	—	82	—	48	—

\*) przy obciążeniu mniejszym o 25 N

#### 4.3.4. Wnioski z badań

Przedstawione powyżej wyniki badań upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- mikroprzesuwnik działa pewnie w granicach przenoszonych obciążeń,
- charakterystyki przesunięcia w funkcji liczby wykonywanych skoków są liniowe w granicach mierzonych przesunięć,
- układ wzajemny charakterystyk jest zgodny z danymi wynikającymi z teorii zjawiska piezoelektrycznego odwrotnego, wyjątek stanowi charakterystyka dla  $U = 710\text{V}$ ,  $F = 0$  i biegu "wstecz", prawdopodobnie wskutek niedotarcia zatrząsków,
- nieliniowości ujawniają się przy większych obciążeniach w obszarze początkowych skoków,
- przy pracy "wstecz" mikroprzesuwnik wykonuje mniejsze skoki i przenosi mniejsze obciążenia; zjawisko to powinno być dokładniej zbadane.

Wnioskiem generalnym jest, że mikroprzesuwnik z zatrząskami pneumatycznymi, taki jak opracowano i zbadano, może być podstawą dla prowadzenia dalszych prac konstrukcyjnych zmierzających do opracowania urządzenia prototypowego. Można więc uznać, że etap prac modelowych spełnił zadanie w sensie pozytywnym.



## Literatura

- [ 1 ] IEC Publ. 483, Guide to dynamic measurements of piezoelectric ceramics with high electromechanical coupling. 1976.
- [ 2 ] Encyklopedia techniki. Elektrotechnika. 1983, WNT.
- [ 3 ] Poradnik Inżyniera. Elektronika. 1971, WNT.
- [ 4 ] Feynman R. P., Leighton R.B., Sands M.: Feynmana wykłady z fizyki. T. 2, cz. 2. Warszawa 1970, PWN.
- [ 5 ] Missalowa J., Missala T.: Elektryczne pomiary wielkości mechanicznych. Warszawa 1971, PWN.
- [ 6 ] PXE Piezoelectric ceramics. Mullard. Data Sheets. 1974.
- [ 7 ] Volz H.: Piezoelektrische Keramiken mit ferroelektrischen Eigenschaften. Elektronik 1982, z. 6, s. 72-76.
- [ 8 ] Magerl R., Kunath P.: Praktische Dimensionierung piezoelektrischer Wandler. Elektrik 1975, z. 1/2, s. 665-667.
- [ 9 ] Reiman W.: Aufbau und Wirkungsweise elektrostriktiver Translationselemente. Feingerätetechnik 1977, z. 12, s. 537-540.
- [10] Takahashi i in.: Internal Electrode Piezoelectric Ceramics Actuator. J.J. of Appl. Physics 1983, vol. 22, Supplement 22-2, s. 157-159.
- [11] Kunath P., Roscher H. -J.: Einsatz piezoelektrischer Bauelemente in elektro-mechanischen Stellgliedern. Nachrichtentechnik-Elektronik 1977, z. 9, s. 381-383.
- [12] Missala T.: Piezoelektryczny mikroprzetwornik wykonawczy dla robotów przemysłowych. P.K.1. Rozpoznanie stanu techniki na świecie na podstawie literatury i opisów patentowych. Rozpoznanie dostępności potrzebnych materiałów. Opracowanie założeń do budowy modelu laboratoryjnego mikroprzetwornika. MERA-PIAP 1990, nr rej. 6417.
- [13] Missala T. i in.: Piezoelektryczny mikroprzetwornik wykonawczy dla robotów przemysłowych P.K.2. Opracowanie dokumentacji szkicowej, wykonanie i badania wstępne modelu laboratoryjnego mikroprzetwornika i bloku sterowania. Określenie zakresu i harmonogramu dalszych prac. MERA-PIAP 1990, nr rej. 6543.
- [14] Missala T., Klimasara W., Flejta E.: Mikroprzesuwnik skokowy z napędem piezoelektrycznym. Zgłoszenie patentowe. P-286819, 1990.