

## Ətalətli pyezoelektrik addım mühərrikinin işləmə sürətinin artırılması

### Metrologiya və cihazqayırma

**Abdulova A.G.**

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti*

E-mail: aytenabdulovago@gmail.com

Pyezoelektrik addım mühərrikləri kiçik diskret yerdəyişmələri yaratmaq üçün geniş istifadə olunur. Onlar əks pyzeoeffekt əsasında işləyirlər və elektrik gərginliyinin hesabına pyezoelementin deformasiyası nəticəsində nanometrlərdən mikrometrlərə qədər yerdəyişmələri minimal xəta çərçivəsində yaradırlar. Təklif olunan çoxelementli ətalətli pyezoelektrik addım mühərrikləri digər mühərriklərə nisbətən daha sadə konstruksiyaya, yüksək etibarlılığa və böyük istismar müddətinə malik olduğuna görə yüksək işləmə sürəti əldə edilməklə geniş tətbiq edilə bilər.

*Açar sözlər:* ətalət, pyezoelektrik, addım mühərriki, bimorf lövhə, işləmə sürəti.

#### **Giriş**

Addım mühərrikləri rotor yerdəyişməsini yüksək dəqiqliklə həyata keçirməyə imkan verir. Addım mühərrikinin fırlanma sürəti idarə impulslarının verilməsənin tezliyi ilə müəyyən edilir, hər addım tam dövrün bir hissəsini təşkil edir [1, 2].

Hazırda sənayedə tətbiq olunan addım mühərriklərinin əksəriyyətində hər addımın həyata keçirilməsi zamanı rotor dərhal tarazlıq vəziyyətinə qayıda bilmir və nəticədə tarazlıq vəziyyətinin ətrafında sönən rəqslər yaranır. Əksər sxemlərdə bu cür rəqslərin olması arzu-olunmazdır, çünki bu zaman işləmə sürəti azalır. Eyni zamanda mövcud addım mühərriklərində elektromaqnit sahəsinin mövcudluğu sistemin digər elementlərinin işinin pozulmasına səbəb ola bilər [3, 4].

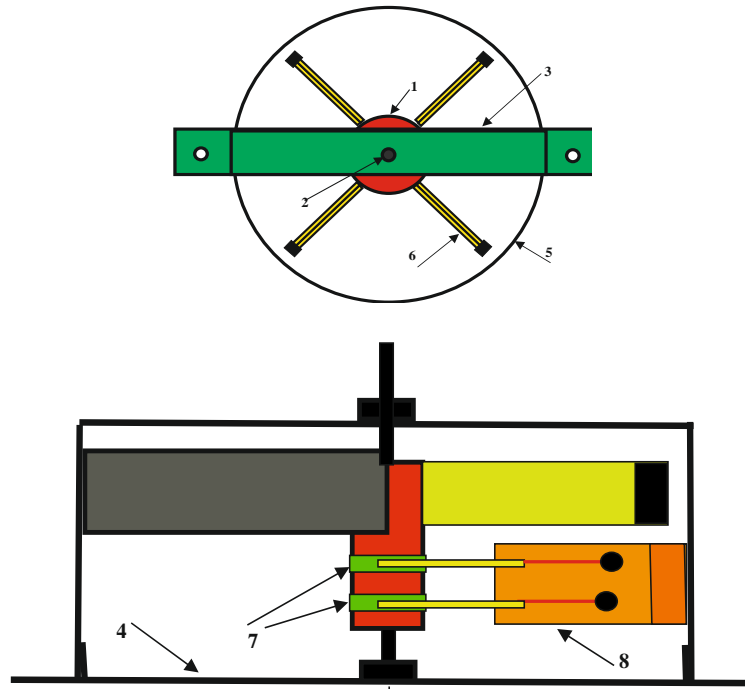
#### **Məsələnin qoyuluşu**

Addım mühərriklərin işinin əsasını aktiv elementlə - pyezoelektrik lövhə və hərəkətverici ilə - lent və ya rotorla - hərəkətverici ilə sürtünmə əlaqəsinin olmasıdır. Belə ki, istismar zamanı mühərrikin sürülən hissələrinin sürtünməsi, zamanla çıxış xarakteristikalarının dəyişməsinə səbəb olur və bu da onların xidmət müddətini məhdudlaşdırır. Bundan əlavə fırlanma tezliyinin yüksəlməsi zamanı fırlanma momentinin aşağı düşməsi (fırlanma momenti tezliklə tərs mütənəsidir), mühərrikin ani yüklənmədən sonra sürət yığılmasına zaman sərf olunması, iş rejimi dayanan zaman işçi vəziyyətini tam bərpa edə bilməməsi, buraxılmış addımların nəzarəti üçün əks-əlaqənin olması addım mühərriklərinin istifadəsində çətinliklər yaradır. Aparılan son tədqiqatın nəticələri zamanla ətalətli pyezoelektrik mühərriklərinin geniş tətbiqinə imkan verir. Buna əsas onların tarixi inkişafı, funksional prinsipləri və əlaqəli terminologiyasının olmasıdır [3, 4, 5, 12].

#### **Həll üsulları**

Təklif olunan ətalətli pyezoelektrik addım mühərriki (ƏPAM) öz konstruksiyasında sürtünmə yaradan hissələrə malik deyil və mühərrikin dəqiqliyi və istismar müddəti olduqca yüksəkdir.

Şəkil 1-də ƏPAM konstruksiyasının variantlarından biri göstərilmişdir.



Şəkil 1. ƏPAM konstruksiyası:

- 1 – rotorun gövdəsi; 2 – çıxış valı; 3 – əsas armatur; 4 – №2 bərkidici diyircək;  
 5 – qoruyucu halqa (baza armaturasının hissəsi); 6 – pyezokeramik nakladka;  
 7 – kollektor; 8 – kollektor fırçasının quruluşu

ƏPAM-ın konstruksiyası  $p$  cüt pyezokeramika lövhələrinin ölçüləri ilə təyin edilir.  $p$  kəmiyyəti rotorun gövdəsinin konstruksiyasının parametrlərinin və pyezokeramik lövhələrin ölçüləri ilə məhdudlaşdırılır.

ƏPAM-də qida mənbəyi mişarvari gərginliyi yaradır, bununla amplitud və takt tezliyini idarə etmək və nəticədə mühərrikin fırlanma tezliyini nizama salmaq olur.

Pyezokeramik lövhələrinin işçi və əks gedişi zamanı ətalət üçün hərəkət qüvvəsinin fərq generasiyası ƏPAM-ın fiziki əsasıdır. Bimorf pyezokeramika lövhələrini  $U_i$  idarə gərginliyinin verilməsi zamanı onlar ətalət nakladka birlikdə əyilir və  $t_1$  zamanı ərzində qüvvə impulsunu yaradırlar [6, 7, 8]. Bunun nəticəsində  $F_0 = m_0 * a_1$  ətalət qüvvələri yaranır, nəticədə, uyğun olaraq  $M_1$  – momenti yaranır.  $a_1$  qiyməti  $a_1 = \frac{d^2 \Delta}{dt^2}$  ifadə ilə təyin edilir, burada  $\Delta$  –  $t_1$  zamanı ərzində pyezoelektrik lövhəsinin əyilməsinin ölçüsü;  $m_0$  – gətirilmiş kütlədir (bir neçə bimorf lövhə + bir neçə taxma).

Boş (əks) gediş (bimorf lövhənin başlanğıc vəziyyətə qayıdışı)  $t_2$  zamanı ərzində olur. Bu halda  $t_2 \gg t_1$  olmalıdır. Bunun nəticəsində, təcil  $a_2 \ll a_1$  uyğun olur. Buradan  $F_1 \gg F_2$ . Beləliklə, yekun ətalət qüvvəsi  $\Delta F = F_1 - F_2$  və uyğun olan fırlanma momenti  $\Delta M = \Delta F * R$  bərabərdir. Burada  $R$  – mühərrikin rotorunun radiusudur. Bu halda valdakı ümumi moment aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$M = p * \Delta M \quad (1)$$

Yuxarıda qeyd olunanlara əsasən,  $U_i$  idarə gərginliyinin hər dövrü üçün rotor müəyyən  $\varphi$  bucağı qədər çevrilir, yəni müəyyən edilmiş "addım" atır.  $\varphi$  bucağın ölçüsü valda yüklənmə momentindən  $M_y$ , amplitudanın ölçülərindən və idarə signalın impulslarının tezliyindən asılıdır. Beləliklə, mühərrikin valının fırlanma sürəti  $M_y$ -dən asılı olur.

Boş (əks) gediş vaxtı  $n_{xx}$  qiyməti  $M_{xx}$  momenti ilə müəyyən olunur, hansı ki, öz növbəsində çıxış valının diyircəklərdə sürtünmənin momentinin ölçüsündən (diyircəkin itki momenti  $M_{pi}$ ) və BL hərəkətinin aerodinamik müqavimət momentinin ( $M_{am}$ ) cəmindən asılıdır:

$$M_{xx} = M_{pi} + M_{am} \quad (2)$$

$M_{\theta} \geq M_{\max} - M_{xx}$  olan halda mühərrikin rotoru əyləc rejimindədir. Burada  $M_{\max}$  – mühərrikin valındakı maksimum momentidir. Mexaniki nöqtəyi-nəzərdən mühərrikin düyünü "pyezokeramik lövhə - nakladka" titrəyişli elementdir və aşağıdakı ifadə ilə müəyyən olunur Burada:  $F_{\theta}$  – ətalət qüvvə;  $F_{DS}$  – daxili sürtünmə qüvvəsi;  $F_S$  – BL-nin sətli  $k$  qüvvəsi;  $F_E$  – BL elektrik sahəsinin qüvvəsidir [9]:

$$F_{\theta} + F_{DS} + F_S = F_E \quad (3)$$

və ya

$$m_0 * \frac{d^2\Delta}{dt^2} + b * \frac{d\Delta}{dt} + K * \Delta = F_E, \quad (4)$$

burada  $m_0 = m_k + m_1$ ;  $m_k$  – bimorf pyezokeramik lövhənin kütləsi;  $m_1$  – taxmaların ətalətli kütləsi;  $b$  – amortizasiya əmsalı - pyezokeramik materialın daxili sürtünməsidir (məsələn, PZT-19 pyezoelektrik keramiki üçün bu əmsal 0.07-0.09 təşkil edir) [8].

$$\Delta C = K * U_i \quad (5)$$

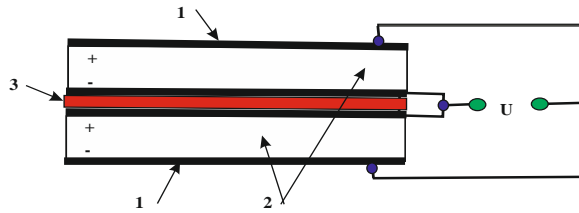
Bimorf lövhənin  $\Delta$  statik rejimində əyilməsini təşkil edən, onun lövhələrinin qabarit ölçüləri  $l_1, l_2, l_3$  və fiziki parametrlər  $\epsilon, E_p, E_{PU}$  tətbiq olunan  $U_i$  idarə gərginliyindən asılıdır [6].  $K$  – mütənəsiblik əmsalı;  $l_1, l_2, l_3$  – bimorf lövhənin birinin uzunluğu, eni, qalınlığı, m;  $\epsilon$  – pyezokeramikanın nisbi dielektrik keçiciliyi;  $E_p$  – pyezokeramikanın polyarlaşmasının elektrik sahəsinin gərginliyi, v/m;  $E_{PU}$  – pyezokeramikanın Puasson əmsalı,  $n/m^2$ ;  $B$  – bimorf lövhənin anizotrop luq əmsalıdır [4].  $K_{op}$  – düzbucaqlı lövhənin elektromexaniki əmsalı növbəti ifadə ilə tapılır:

$$K_{op} = \frac{2,2 * 10^{-2} * \epsilon^2 * E_p * l_1^2}{l_3 * E_{PU}} \quad (6)$$

Yuxarıda göstərilən ifadələrə əsasən Huk qanunu çərçivəsində BL  $\Delta$  əyilməsi  $U_i$  gərginliyinin amplitudasından asılıdır.

Məlum olduğu kimi [4], bimorf lövhə epoksid yapışqanı vasitəsi ilə birləşdirilmiş və ya tez əriyən ( $t \leq 100^{\circ}C$ ) lehimlə lehimlənən iki pyezokeramik lövhədən ibarətdir. Pyezokeramikanın markasından asılı olaraq 130-150<sup>0</sup>C temperatura qədər öz pyezoelektrik xüsusiyyətlərini saxlayır. Bimorf lövhələrin materialı seçilmiş PZT uyğun olaraq istilik və mexaniki xüsusiyyətlərə malik olur [9, 10, 11, 13].

ƏPAM təşkil edən pyezokeramik bimorf lövhə aşağıdakı şəkildə göstərilmişdir (şəkil 2).



Şəkil 2. Birləşdirici tikişin orta dielektrik elektrodları:  
1- lövhənin elektrodları (gümüş örtük); 2- pyezokeramika; 3 - birləşdirici tikiş.

İdarə impulsu mişarvari olduqda

$$U_i = K_u * t, \quad (7)$$

burada  $U_{i\max} = K_u * t_1$

$\Delta$  dinamik qiymətləndirmək üçün  $K_j$  və  $F_E$  ifadəsində əvəzetmə aparsaq,  $F_1 = F_E$

$$F_E = \frac{2 * F_0 * l_3}{l_1} \quad (8)$$

$$F_0 = 2,2 * 10^{-12} * S_0 * \epsilon^2 * E_p * E_{PU} \quad (9)$$

$S_0$  və  $E_{OP}$  qiymətinin (9) ifadəsində yazaq

$$F_0 = 2,2 * 10^{-12} * \epsilon^2 * E_p * l_2 * U_i. \quad (10)$$

Burada  $S_0 = l_2 * l_3$ .

$F_E$  üçün ifadəyə  $F_0$  qiymətini yazaq:

$$F_E = \frac{4,4 \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon^2 \cdot E_P \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot U_i}{l_1} \quad (11)$$

Əvəzetmə zamanı  $K_E = 4,4 \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon^2 \cdot E_P \cdot \frac{l_2 \cdot l_3}{l_1} U_i = K_i \cdot t$  alırıq:

$$F_E = K_E \cdot K_i \cdot t = K_u \cdot t, \quad (12)$$

$$K_U = K_E \cdot K_i; \quad (13)$$

Burada  $[K_U] - [n/s]$ . [4] əsasən  $F_y = E_y \cdot S_E \cdot \frac{\Delta}{l_1}$  müəyyən edirik:

$$K_j = \frac{F_y}{\Delta} = E_y \cdot S_E \cdot \frac{\Delta}{l_1} = E_y \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \frac{1}{l_1} = E_y \cdot l_2. \quad (14)$$

Burada  $E_y$  - Yunq moduludur.

İfadələri (13) qoyuruq, (11) tənliyə (2), alırıq:

$$m_0 \cdot \frac{d^2 \Delta}{dt^2} + b \cdot \frac{d \Delta}{dt} + K_j \cdot \Delta = K_y \cdot t \quad (15)$$

Bu diferensial tənliyin həlli ümumi diferensial tənliyin və fərdi həllin cəmlərindən ibarətdir. Əgər işçi gediş zamanına keçid prosesi kimi baxsaq  $\Delta = f(t)$  funksiyası operator formasında növbəti ifadə ilə müəyyən olunacaq:

$$\Delta = \frac{K_1 \cdot t}{(T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1)} \quad (16)$$

burada

$$K_1 = \frac{K_u}{K_j}; T_2^2 = \frac{m_0}{K_j}; T_1 = \frac{b}{K_j}.$$

Dinamik rejimdə BL qida mənbəyinin balansını növbəti ifadədə əks olunur:

$$F_a + F_{ss} + F_s = F_E, \quad (17)$$

burada  $F_a$  – ətalət qüvvəsi;  $F_{ss}$  – sərt sürtünmə qüvvəsi;  $F_s$  – BL sərtlik qüvvəsi;  $F_E$  – BL elektrik sahəsinin qüvvəsidir.

### Nəticə

Təklif edilən mühərrik yüksək effektivlik, sadə konstruksiya, yüksək sürətə və idarə olunan addıma görə əvvəlkilərdən xeyli fərqlənir. Mühərrikin addımını mikrokontroller tərəfindən idarə olunur.

### Ədəbiyyat

1. Рентюк В. Управление шаговым двигателем. // Радиоаматор (Radioamator). – 2010, №10.
2. Джагулов Р.Г., Якубов Р.А., Гурбанов Т.Б. Электростатистический шаговый двигатель. // Авторское свидетельство № 430459, БИ №20. – 1974.
3. Лавриненко В.В., Карташов И.А., Вишневицкий В.С. Пьезоэлектрические двигатели. – М.: Энергия, 1980.
4. Петренко С.Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. – Киев: Корнейчук, 2002. – 100 с.
5. Мамедов Р.К., Ягулов Р.А. Пьезоэлектрические шаговые двигатели. – Баку: Элм, 2014. – 185 с.
6. Джагулов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. – Л.: Машиностроение, 1986.
7. Кузнецов С.И., Рогозин К.И. Справочник по физике. – Томск: ТПУ, 2012.
8. Шарапов В., Мусиенко М., Шарапова Е. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006.

9. Александров В.А. Разработка и исследование пьезоэлектрических компонентов Преобразователи и механизмы. / Дисс. канд. физ.-математ. наук. – Ижевск, 2006. – 149 с.
10. Тихонов А.О. Улучшение динамических характеристик метехатронных модулей с пьезоэлектрическими двигателями. / Дисс. канд. техн. наук. – М., 2004. – 178 с.
11. Бобсов А.А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. // СПб: Университет ИТМО. – 2017. – 134 с.
12. Matthias Hunstig Piezoelectric Inertia Motors: A Critical Review of History, Concepts, Design, Applications, and Perspectives. – Actuators 2017, 6, 7. – 35 p.
13. Yao Zhanga , Ming Lia, Shanzhi Tanga and etc. Analysis of an x-ray mirror made from piezoelectric bimorph. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 860. – 2017. – Pp.13-18.

### **Резюме**

**Абдулова А.Г.**

### **Повышение быстродействия работы инерционных пьезоэлектрических шаговых двигателей**

Пьезоэлектрические шаговые двигатели широко используются для создания небольших дискретных перемещений. Они работают по обратному пьезоэффекту и за счет электрического напряжения создают перемещения, величиной от нанометров до микрометров в рамках минимальных погрешностей. Предложенные пьезоэлектрические шаговые двигатели могут быть широко использованы с более высокими частотами вращения двигателя благодаря их простоте, высокой надежности и большому времени работы по сравнению с другими двигателями.

*Ключевые слова:* инерция, пьезоэлектрик, шаговый двигатель, биморфная пластинка, скорость работы.

### **Summary**

**Abdulova A.G.**

### **Improving the performance of work of inertial piezoelectric step engines**

Piezoelectric step motors are widely used to create small discrete movements. They work on the reverse piezoelectric effect and, due to the electric voltage, create displacements, ranging in size from nanometers to micrometers as a result of the deformation of the piezoelectric element. The proposed multi-purpose piezoelectric stepper motors can be widely used with higher engine speeds due to their simplicity, high reliability and long running time compared to other engines.

*Key words:* inertia, piezoelectric, stepper motor, bimorph plate, speed of operation.