

UOT 625.374 (078)

İ.N. DƏVRIŞOVA, V.A. NEYMƏTOV

PYEZOELEKTRİK DÖNMƏ BUCAĞI VERİCİSİNİN DİNAMİKİ XARAKTERİSTİKALARININ NORMALLAŞDIRILMASI

Fırlanma hərəkəti haqqında informasiyanın ilkin mənbələrindən biri olan, pyezohəssas elementləri diferensial qoşulmuş pyezoelektrik çeviricinin (PEÇ) ötürmə funksiyasının (ÖF) ifadəsinin alınması, stabil dinamik həssaslığa malik, alçaq tezlik oblastunda geniş ölçmə diapazonunun təmin edilməsi məqsədi ilə xarakteristik tənliyin əmsallarının normallaşdırılması və ölçmə diapazonunu rezonans tezliyi ətrafındakı qeyri-stabil zonadan ayırmaq məqsədi ilə ikitərtibli süzgecin ÖF-nin parametrləri texniki optimuma və PEÇ-in sıfırlarının riyazi kompensasiyası prinsipi əsasında hesablanması və seçilməsi məsələləri həll edilmişdir.

Müəyyən edilmişdir ki, müəyyən şərtlər daxilində disk formasında olan pyezohəssas elementlərin həndəsi ölçülərinin vasitəsi ilə PEÇ-in xarakteristik tənliyinin əmsallarını normallaşdırmaq və ölçmə diapazonunu tənzimləmək mümkündür.

Açar sözlər. pyezoelektrik həssas element, diferensial qoşulma sxemi, dönmə bucağı, verici, dinamik həssaslıq, normallaşdırılmış əmsallar, texniki optimum, ötürmə funksiyası

1. Giriş. Texniki sistemlərdə hərəkətin parametrləri haqqında ilkin informasiya mənbələri olan vericilərin və çeviricilərin işləmə keyfiyyəti əldə edilən informasiyanın səhihlik səviyyəsini müəyyən edən amillərdən biridir. Müasir, hərəkətin parametrlərinin vericiləri yüksək dəqiqlik və cəldlik, yüksək həssaslıq və geniş ölçmə diapazonu kimi tələblərə cavab verməklə yanaşı, həmçinin, etibarlı və uzunömürlü olmalıdırlar. Belə müasir vericilərdən biri də diferensial pyezoelektrik vericiləri, yaxud çeviriciləridir (PEÇ) [1, 2].

Həssas elementləri diferensial sxemlə qoşulmuş pyezoelektrik vericilərin keyfiyyətli iş qabiliyyətini təmin etmək üçün müxtəlif konstruktiv, korreksiya və tənzimləmə üsullardan istifadə olunur [3-5].

Lakin, bu məqsədlə, məqsədəuyğun hesab ediləcək üsul və vasitələrin seçilməsi konkret olaraq, PEÇ-in konstruktiv tərtibatından, pyezoeffektin istiqamətindən, parametrləri ölçülən hərəkətin növündən və s. bu kimi amillərdən asılıdır. Bu mənada, konstruktiv olaraq, layihə edilən hər yeni PEÇ-in nəzəri tədqiqi və kompüter modellərinin qurulub, simulyasiyaların aparılması, alınmış nəticələrin təhlili layiləndirmənin vacib mərhələlərindən biridir.

Təqdim edilən məqələdə fırlanma hərəkəti haqqında informasiyanın ilkin mənbələrindən biri olan, pyezohəssas elementləri diferensial qoşulmuş PEÇ-in ötürmə funksiyasının ifadəsinin alınması, stabil dinamik həssaslığa malik geniş ölçmə diapazonunun təmin edilməsi məqsədi ilə xarakteristik tənliyin normallaşdırılması və ölçmə diapazonunu rezonans tezliyi ətrafındakı qeyri-stabil zonadan ayırmaq məqsədi ilə ikitərtibli süzgecin müəyyən edilməsi məsələsi həll edilmişdir.

2. Məsələnin qoyuluşu. Tədqiq edilən PEÇ konstruktiv tərtibatına görə simmetriya (yaxud, bərkitmə) oxu ətrafında fırlana bilən çiyirlərdə, oxa paralel olaraq yerləşdirilmiş və kontakt ucları eksentrik səth boyunca diyirlənməklə, simmetriya oxuna perpendikulyar ox boyunca hərəkəti boyunca sıxılma və boşalma hərəkətləri icra edən pyezohəssas elementlərə malikdir (Şək.1).

Elektrik qoşulma sxemi körpü sxemidir və müvazinət halında pyezoelementlər rezonans nöqtəsinə uyğun vəziyyətdə olub, eyni materiala və həndəsi ölçülərə malik olduqları üçün elektromexaniki dövrələri tamamilə eyni kompleks müqavimit yaradırlar (Şək.2). Körpünün digər qollarının müqavimətləri pyezoelementin əvəz etmə sxeminin aktiv müqavimətinə bərabər götürülür (Şək.3).

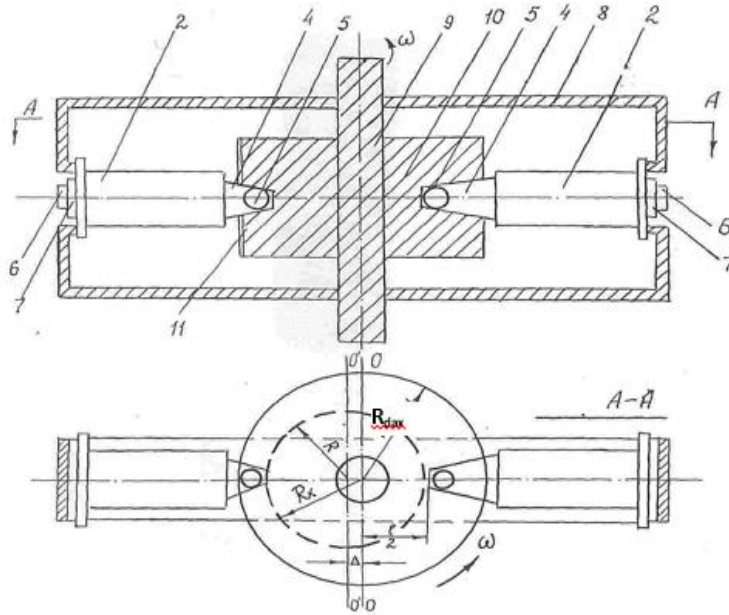
Şək. 3b-də göstərilən əvəz etmə sxemi üçün yazmaq olar ki:

$$Z = R_m + j(X_{Lm} - (X_{Cm} \pm X_{\Delta Cm})) = R_m + j(X_{Lm} - X_{Cm}) \pm jX_{\Delta Cm} \quad (2.1)$$

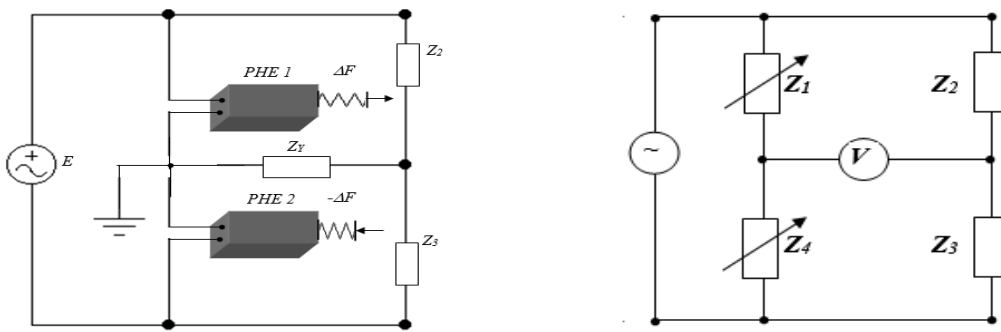
$$Z = R_m \pm jX_{\Delta Cm} \quad (2.2)$$

(2.2) ifadəsi ilə müəyyən həm də qəbul edilir ki, pyezohəssas element tutum xarakterlidir. Pyezohəssas elementlərin yerləşdiyi çiyinlərin müqavimətləri operator formasında:

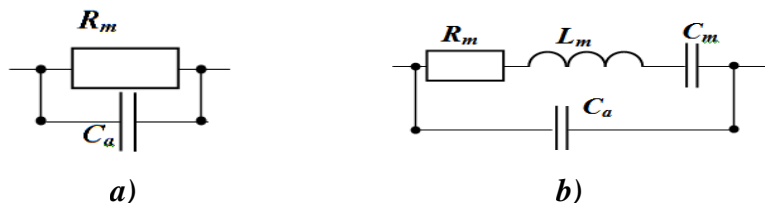
$$Z_1(s) = \frac{\frac{RC_{1s}+1}{C_{1s}} \frac{1}{C_k s}}{\frac{C_k(RC_{1s}+1)+C_1}{C_1 C_k s}} = \frac{RC_{1s} + 1}{s(C_k(RC_{1s} + 1) + C_1)} \quad (2.3)$$



Şək. 1. Daxili eksentriteti olan, dönmə bucağını ölçən diferensial PEÇ 1 – gövdə; 2 – pyezohəssas elementlərin yerləşdiyi silindrik formalar; 3 – eksentrik topuval sərt oturtması; 4 – ştokun konusvari ucluğu; 5 – eksentrik səth üzrə diyirlənən diyircək; 6 – ştokun yivli ucu; 7 – sıxıcı bolt; 8 – ön və arxa qapaqlar; 9 – bərkitmə (simmetriya) oxu; 10 – eksentrik topu; 11 – eksentrikin profili



Şək. 2. PEÇ-in elektrik körpü sxemləri: a) pyezohəssas elementlərin diferensial qoşulması; b) elektrik əvəzetmə sxemi



Şək. 3. Pyezohəssas elementlərin əvəzetmə sxemləri: a) rezonans halında; b) ümumi halda

$$Z_4(s) = \frac{RC_2s+1}{s(C_k(RC_2s+1)+C_2)} \quad (2.4)$$

$$Z_2(s) = Z_3(s) = R \quad (2.5)$$

(2.3)-(2.5) ifadələrində olan R müqaviməti üçün $R=R_m$ (Şək.3). $t=0$; $E(s)=0$; $U(s)=0$ başlanğıc şərtləri daxilində əvəz etmə sxeminin çıxış gərginliyi üçün yazmaq olar.

$$U(s) = \frac{Z_1(s)R - Z_2(s)R}{(Z_1(s) + R)(R + Z_3(s))} E(s) \quad (2.6)$$

Beləliklə, tədqiqatların məqsədi PEÇ-in:

$$W(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Z_1(s)R - Z_2(s)R}{(Z_1(s) + R)(R + Z_3(s))} \quad (2.7)$$

ifadəsi ilə müəyyən edilən ÖF-nın:

$$m_{0n}s^q + m_{1n}s^{q-1} + m_{2n}s^{q-2} + \dots + m_{q-2n}s^2 + m_{q-1n}s + 1 = 0 \quad (2.8)$$

xarakteristik tənliyinin f_0 – rezonans tezliyinn, ε – dempfer əmsalının məlum qiymətlərində normallaşdırılmış əmsalları üçün:

$$m_{in} = f_i(\rho, r, h) \quad i = 1, 2, \dots, q - 1 \quad (2.9)$$

funksional asılıqlarını və ölçmə diapazonunu rezonans tezliyindən ayıracaq süzğəzin ÖF-ı müəyyən etməkdir.

3. Həll üsulları. (2.3)-(2.5) ifadələrini (2.7) ifadəsinin sürət məxrəcində nəzərə alsaq:

$$Z_1Z_3 - Z_2Z_4 = R \left(\frac{RC_{1s} + 1}{s(C_k(RC_{1s} + 1) + C_1)} - \frac{RC_{2s} + 1}{s(C_k(RC_{2s} + 1) + C_2)} \right) =$$

$$\frac{R}{s(C_k(RC_{1s} + 1) + C_1)(C_k(RC_{2s} + 1) + C_2)} (R^2C_1C_2C_k s^2 + (RC_2(C_1 + C_k) + RC_1C_k)s + (C_1 + C_k) - (R^2C_1C_2C_k s^2 + (RC_1(C_2 + C_k) + RC_2C_k)s + (C_2 + C_k)))$$

$$\frac{R}{s(C_k(RC_{1s} + 1) + C_1)(C_k(RC_{2s} + 1) + C_2)} (R^2C_1C_2C_k s^2 + (RC_2(C_1 + C_k) + RC_1C_k)s + (C_1 + C_k) - (R^2C_1C_2C_k s^2 + (RC_1(C_2 + C_k) + RC_2C_k)s + (C_2 + C_k)))$$

$$Z_1Z_3 - Z_2Z_4 = \frac{2RC_1C_2s + (C_1 - C_2)}{s(R^2C_1C_2C_k s^2 + (2RC_1C_2C_k + RC_k^2)(C_2 + C_k)s + (C_1 + C_k)(C_2 + C_k))} \quad (3.1)$$

$$(Z_1 + Z_4)(Z_2 + Z_3) = \left(\frac{RC_{1s} + 1}{s(C_k(RC_{1s} + 1) + C_1)} + R \right) \left(\frac{RC_{2s} + 1}{s(C_k(RC_{2s} + 1) + C_2)} + R \right) =$$

$$= \frac{1}{s^2(C_k(RC_{1s} + 1) + C_1)(C_k(RC_{2s} + 1) + C_2)} \left((R^2C_1C_k s^2 + (2RC_1 + RC_k)s + 1) (R^2C_2C_k s^2 + (2RC_2 + RC_k)s + 1) \right) \quad (3.2)$$

Müvafiq riyazi əvəzləmə və çevrilmələrdən sonra (2.7) ifadəsi:

$$W(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{(2RC_1C_2s + (C_1 - C_2))s}{(R^2C_1C_k s^2 + (2RC_1 + RC_k)s + 1)(R^2C_2C_k s^2 + (2RC_2 + RC_k)s + 1)} \quad (3.3)$$

kimi alınır. Yaxud:

$$W(s) = \frac{(b_0s + b_1s)}{a_0s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + 1} \quad (3.4)$$

(3.4) ifadəsində: $b_0 = 2RC_1C_2$; $b_1 = (C_1 - C_2)$; $a_0 = R^4C_1C_2C_k^2s^4$; $a_1 = 4R^3C_1C_2C_k + R^4C_1C_k + R^3C_2C_k^2$; $a_2 = 4RC_1C_2 + 3R^2C_1C_k + 3R^2C_2C_k + (RC_k)^2$; $a_3 = 2(RC_1 + RC_2 + RC_k)$

[6, 7] ədəbiyyatlarında texniki optimum şərtini normallaşdırılmış xarakteristik tənliyin əmsallarının hesablanması metodikası göstərilmişdir. Bu metodika iki, üç və dördtərtibli xarakteristik tənlikləri olan sistemlər üçün tətbiq edilmişdir. Lakin, bütün hallarda normallaşdırılmış xarakteristik tənlik tənzimləyicilərin (M və Mİ tənzimləyicilərinin) hesabına təmin edilmiş və burada riyazi kompensasiya üsullarından istifadə edilərək, ÖF-nın, böyük zaman sabitlərinə malik sıfırları kompensasiya edilmişdir. Yəni, ilkin ÖF çoxtərtibli aperiodik sistemi əks etdirməlidir:

$$W(s) = \frac{b_m \prod_{j=1}^m (s - z_j)}{a_k \prod_{i=1}^n (s - p_i)}$$

Lakin, (3.4) ifadəsi ümumi halda alınmış ifadədir, ona daxil olan parametrlərin konkret ədədi qiymətlərini bilmədən, $U(s)$ və $E(s)$ çoxhədlilərinin köklərinin həqiqi köklər olacağı məlum deyil. Digər tərəfdən, hərəkətin parametrlərini ölçən pyezoelektrik vericilər rezonans dövrəsinə malik olduqları üçün, tipik tezlik xarakteristikaları rezonans effektinə malik olurlar.

Ona görə də tədqiq edilən PEÇ-in normallaşdırılmış xarakteristik tənliyə malik ÖF-nı aşağıdakı kimi müəyyən etmək məqsədəuyğun hesab edilmişdir.

Normallaşdırılmış ÖF aşağı tezlik diapazonunda stabil dinamik həssaslığa malik ikitərtibli xarakteristik tənlik və rezonans tezliyini ölçmə diapazonundan ayıran, texniki optimuma sazlanmış ikitərtibli süzgezin ÖF əsasında qəbul edilir:

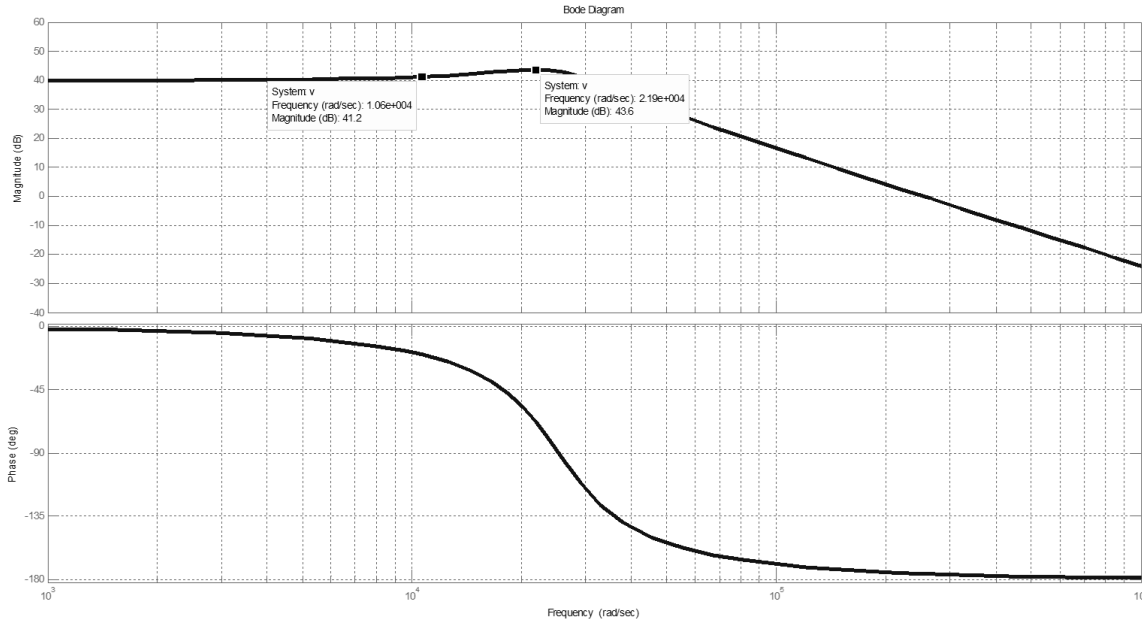
$$(2T^2s^2 + 2\varepsilon_r Ts + 1)(2T^2s^2 + 2\varepsilon_{to}Ts + 1) = 0 \quad (3.5)$$

$$4T^4s^4 + 4T^3s^3(\varepsilon_{ro} + \varepsilon_{to}) + 4T^2(1 + \varepsilon_r\varepsilon_{to})s^2 + 2T(\varepsilon_r + \varepsilon_{to})s + 1 = 0 \quad (3.6)$$

Burada $T=1/f_0$ – zaman sabiti; f_0 – rezonans tezliyi; ε_r və ε_{to} uyğun olaraq rezonansa və texniki optimuma sazlanmış sönmə əmsallarıdır. (3.6) ifadəsini bildirən xarakteristik tənliklə müəyyən edilən ÖF-a malik qurğuda keçid prosesinin rəqslili sönmə əmsalları ε_r və ε_{to} qiyməti ilə müəyyən edilir. Rezonans tezlikli xarakteristikalar üçün: $0.707/20 < \varepsilon_r < 0.707/2$, $\varepsilon_r = 0.005$, texniki optimuma sazlanmış hal üçün isə: $\varepsilon_{to} = 0.707$. Hesablamaların sadəliyi üçün rezonans tezliyini 10000 Hs qəbul edilmiş və ona görə də:

$$2.566 \cdot 10^{-19}s^4 + 1.148 \cdot 10^{-14}s^3 + 4.0141 \cdot 10^{-9}s^2 + 1.242 \cdot 10^{-5}s + 1 = 0 \quad (3.7)$$

Şək.4-də güclənməsi əmsalı $K=100$, xarakteristik tənliyi (3.7) ilə müəyyən edilən ÖF üçün loqarifmik amplitud-faz tezlik xarakteristikaları göstərilmişdir. Buradan müəyyən etmək olar ki, belə normallaşdırılmış xarakteristik tənliyə malik vericinin stabil dinamik həssaslığa malik işçi diapazonu təqribən 1600 Hs qədərdir.



Şək. 4. Normallaşdırılmış dördtərtibli xarakteristik tənliyi olan ((3.7) ifadəsi) ÖF-nın loqarifmik amplitud-faz tezlik xarakteristikaları

PEÇ-in xarakteristik tənliyini (3.6) halına gətirmək üçün (3.4) və (3.7) ifadələrinin eyni tərtibli əmsallarının bərabərliyindən:

$$\begin{cases} 4T^4 = R^4 C_1 C_2 C_k^2 \\ 4T^3(\varepsilon_r + \varepsilon_{to}) = 4R^3 C_1 C_2 C_k + R^3 C_1 C_k + R^3 C_2 C_k^2 \\ 4T^3(1 + \varepsilon_r \varepsilon_{to}) = 4RC_1 C_2 + 3R^2 C_1 C_k + 3R^2 C_2 C_k + (R C_k)^2 \\ 2T(\varepsilon_r + \varepsilon_{to}) = 2(RC_1 + RC_2 + RC_k) \end{cases} \quad (3.8)$$

sistemi alınır. Ədədi qiymətlərlə isə:

$$\begin{cases} 2.566e-019 s^4 + 1.148e-014 s^3 + 1.017e-009 s^2 + 1.017e-009 s + 1 \\ 2.566 \cdot 10^{-19} = R^4 C_1 C_2 C_k^2 \\ 1.148 \cdot 10^{-14} = 4R^3 C_1 C_2 C_k + R^3 C_1 C_k + R^3 C_2 C_k^2 \\ 1.017 \cdot 10^{-9} = 4RC_1 C_2 + 3R^2 C_1 C_k + 3R^2 C_2 C_k + (RC_k)^2 \\ 1.242 \cdot 10^{-5} = 2(RC_1 + RC_2 + RC_k) \end{cases} \quad (3.9)$$

tənliklər sistemini həll etmək lazımdır.

MATLABSymbolic proqramının *solve* opertarundan istifadə edilməklə (3.10) sistem həll edilmiş, alınmış ədədi həllər çoxluğundan müsbət işarılı, həqiqi həllər seçilmişdir: $R=6699$ Om; $C_1=1930$ nF; $C_2=1116$ nF; $C_k=4.2171$ mk F.

[8, s.128] ədəbiyyatından şək.3-də göstərilən əvəzetmə sxemlərinin parametrlərinin hesablanması üçün riyazi ifadələr məlumdur:

$$C = \frac{8\pi r^2 (d_{13})^2}{(\pi\pi)^2 (S_{33}^E)^2 h}; \quad R = \rho \frac{(\pi r)^2 (S_{33}^E)^2}{8n\pi^2 (d_{13})^2} h_0; \quad C_k = (\varepsilon_{11})^5 \pi r^2 \frac{1}{h} \quad (3.10)$$

Burada: r, h – pyezohəssas elementin uyğun olaraq, qalınlığı və radiusu; ρ – saxlığı; n – mod sıra sayı; S_{33}^E – elastiki yumşaqılıq əmsalı; d_{13} – pyezomoduldur .

[9, s.280-281] sorğu ədəbiyyatından: $\rho=2686$ kg/m³; $r=0.004$ m; $n=1$; $S_{33}^E=12,77 \cdot 10^{-12}$ m²/N; $d_{13}=2,31 \cdot 10^{-12}$ K/V qiymətləri seçilmiş və (3.10) tənlikləri h və r -ə görə həll edilmiş və alınan

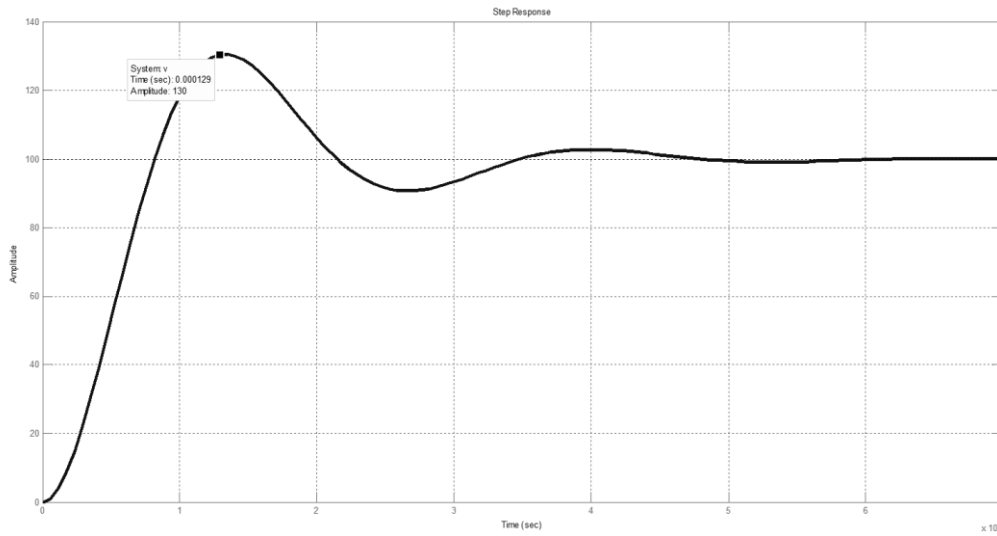
həllər çoxluğundan müsbət işarəli həqiqi qiymətlər seçilmişdir: $r=0.00421m$, $h_1=0.002131 m$; $h_2=0.002122 m$.

Beləliklə, fiziki xassələrinə görə seçilmiş pyzoelektrik materialdan hazırlanan həssas elementlər silindirik formada olmalı, radiusu təqribən $r=4.21 mm$; qalınlığı $h=2.131 mm$. Ölçmə prosesində sıxılmadan alınan deformasiya: $\Delta h=0.002131- 0.002122 = 0. 000009 m$. Bu zaman stabil dinamik həssaslıqlı ölçmə diapazonu: $f_{\text{ö}}= 1600 Hz$

Süzgəcin ÖF:

$$W(s)_s = \frac{K}{S(2RC_1C_2S) + (C_1 - C_2)(2T^2s^2 + 2\varepsilon_{t0}Ts + 1)}$$

Keçid prosesinin qrafiki Şək.5-də göstərilmişdir.



Şək. 5. Normallaşdırılmış dördtərtibli xarakteristik tənliyi olan ((3.7) ifadəsi) ÖF-nın keçid prosesinin qrafiki

4. Nəticə. Beləliklə, təqdim edilən məqələdə fırlanma hərəkəti haqqında informasiyanın ilkin mənbələrindən biri olan, pyzohəssas elementləri diferensial qoşulmuş PEÇ-in ötürmə funksiyasının ifadəsinin alınmış, stabil dinamik həssaslığa malik alçaq tezlik oblastında geniş ölçmə diapazonunun təmin edilməsi məqsədi ilə xarakteristik tənliyin əmsalları normallaşdırılmış və ölçmə diapazonunu rezonans tezliyi ətrafındakı qeyri-stabil zonadan ayırmaq nəqsədi ilə ikitərtibli süzgəcin ÖF-nın parametrləri texniki optimuma və PEÇ-in sıfırlarının riyazi kompensasiyası prinsipi əsasında hesablanmış və seçilmişdir.

Müəyyən edilmişdir ki, müəyyən şərtlər daxilində disk formasında olan pyzohəssas elementlərin həndəsi ölçülərinin vasitəsi ilə PEÇ-in xarakteristik tənliyinin əmsallarını normallaşdırmaq və ölçmə diapazonunu tənzimləmək mümkündür.

Ədəbiyyat

1. http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_04/stat_46.htm
2. <http://www.vibrtest.ru/?yclid=1684107667059509639>
3. Янчик В.В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: Учеб. Пособие. – Ростов-на-Дону, 2008.
4. Д.П. Лукьянов, В.Я. Распопов, Ю.В. Филатов. Микромеханические навигационные приборы. Учеб. Пособие / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2008, стр. 48
5. Брюль и Кьер. Пьезоэлектрические акселерометры и преусилители. Справочное пособие. 1978.
6. http://life-prog.ru/2_96801_nastroyki-na-tehnicheskij-to-i-simmetrichnij-s-optimum.html
7. http://model.exponenta.ru/epivod/glv_070.htm

8. И. Зеленка. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкции, применение. Пер. с чешск. М., Мир, 1990. 548 с.
9. Под редакцией И.П. Голямина. Ультразвук. Энциклопедия. «Советская энциклопедия М., 1979. 400с.

I.N. Davrishova, V.A. Neymatov

Normalization of dynamic characteristics of piezoelectric angle transducer

The authors deal with the problems related to the determination of the transfer function (TF) of the piezoelectric sensors (PES) with a differential connection of piezoelectric transducers (PET), with the normalization of the coefficients of the characteristic equation to ensure a stable velocity in a wide range of measurement in the low-frequency region, with adjustment to the technical optimum of second-order filter parameters, ensuring the separation of the measuring range of the unstable area around the resonant frequency and the mathematical compensation of TF zeros.

It has been found that, within the specific conditions, using the geometric dimensions of the disc-shaped PET, TF with normalized coefficients can be obtained for PESs and the measuring range with stable dynamic response can be adjusted.

Keywords: piezoelectric sensors, differential connection, angle transducer, dynamic sensitivity, normalizing factors, technical optimum, transfer function

УДК 625.374 (078)

И.Н. Давришова, В.А. Нейматов

Нормализация динамических характеристик пьезоэлектрического датчика угла поворота

Решены задачи, связанные с определением передаточной функции (ПФ) пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) с дифференциальным соединением пьезочувствительных элементов (ПЧЭ), с нормализацией коэффициентов характеристического уравнения с целью обеспечения стабильной динамической чувствительности в широком диапазоне измерения в низкочастотной области, с настройкой на технический оптимум параметров фильтра второго порядка, обеспечивающий разделение диапазона измерения от нестабильной зоны вокруг резонансной частоты и математическую компенсацию нулей ПФ.

Выявлено, что в пределах конкретных условий, используя геометрические размеры дискообразного ПЧЭ, можно получить ПФ для ПЭП с нормализованными коэффициентами и регулировать диапазон измерения с стабильной динамической чувствительностью.

Ключевые слова: пьезочувствительный элемент, дифференциальное соединение, датчик угла поворота, динамическая чувствительность, нормализованные коэффициенты, технический оптимум, передаточная функция.

Azərbaycan Texniki Universiteti
Azərbaycan Hava Yolları

Təqdim olunub 25.05.2016