

двигуні за цетанового числа палива 46 протікає плавно, двигун працює не жорстко, тобто не погіршуються властивості спалаху дизельного палива. Температура застигання такого палива є високою і прийнятною під час застосування для дизельних двигунів. Однак за своїми показниками, зокрема за масовою часткою сірки, дизельне паливо відноситься до IV групи, а це означає, що сполуки, які містять сірку, знижують хімічну стабільність палива, повноту згорання, надають неприємного запаху, забруднюють атмосферу та спричиняють корозію двигунів. За роботи двигуна на паливі з підвищеним вмістом сірки зростає зношувальність робочих деталей і збільшується кількість сажі і осадів. Застосування дизельного палива з фракційним складом 50 %, який википає за температури 192 °С, призводить до того, що знижується цетанове число, зменшується в'язкість палива, збільшується жорсткість роботи двигуна, збільшується кількість підготовленої до спалаху суміші. Своєю чергою, застосування дизельного палива з фракційним складом 90 %, який википає за температури 261 °С, може призвести до таких негативних наслідків: збільшення витрати палива, погіршення запуску двигуна, підвищення нагароутворення і закоксованості форсунок, підвищеного зношення деталей, збільшення задимленості випуску відпрацьованих газів. В'язкість і густина дизельного палива забезпечує нормальну подачу палива, його розпорощення у камері згорання та працездатність системи фільтрування дизельного двигуна.

Тому для оперативного оцінювання якості дизельного палива необхідно розробити ефективні методи експрес-контролю його основних показників якості.

1. ДСТУ 3868-99. Технічні умови. 2. Братичак М.М., Гринишин О.Б. *Технологія нафти та газу: Навч. посібник*. – Львів, 2002. 3. *Управління якістю. Сертифікація: Навч. посібник* / Р.В. Бичківський, П.Г. Столярчук, Л.І. Сопільник, О.О. Калинський. – К., 2005. 4. *Посвідчення про якість №137. Паливо дизельне 3-0,50-(-25) за ДСТУ 3868-99 за 22.02.05 р.* 5. ГОСТ 20287-91 “Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания”. 6. ГОСТ 19121-73 “Нефтепродукты. Метод определения содержания серы сжиганием в лампе”. 7. Папок К.К. *Дизельные топлива*. – М., 1957. 8. ГОСТ 3122-67 (СТ СЕВ 2877-81). “Топлива дизельные. Метод определения цетанового числа”. 9. ГОСТ 2177-82 (СТ СЭВ 758-77). “Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава”. 10. ГОСТ 33-82 (СТ СЭВ 1494-79). “Нефтепродукты. Метод определения кинематической и динамической вязкости”. 11. ГОСТ 3900-85. “Нефть и нефтепродукты. Метод определения плотности”.

УДК 621.313

П.М. Сопрунюк<sup>1</sup>, О.А. Войтов<sup>1</sup>, О.М. Васілевський<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

## ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Сопрунюк П.М., Войтов О.А., Васілевський О.М., 2006

**Проведено оцінювання основних динамічних метрологічних характеристик п'єзоелектричних електромеханічних перетворювачів та подано характеристики їх зміни.**

**The estimation of the basic dynamic metrological characteristics of piezoelectric electromechanical converters is made and it is presented their characteristics of change.**

**Вступ.** У прецизійних вимірювальних і слідкуючих системах, керованими величинами яких є кутові та лінійні переміщення, як виконавчі елементи використовуються електромеханічні перетворювачі (крокові, безперервного обертання, моментні тощо) різних типів. Найширше

розповсюджені крокові електромеханічні перетворювачі (ЕМП), які мають незначний момент на валу.

Сучасні технічні вимоги, які ставляться до високоточних систем, часто передбачають, що виконавчі елементи таких систем повинні мати кутове переміщення близько 0.01 рад за відносно великого моменту на валу (0,1 ... 1 Нм). При цьому такі системи повинні забезпечувати фіксацію кутового положення вала значним моментом і мати досить високі динамічні характеристики.

**Аналіз стану досліджень та публікацій.** Відомі роботи [1, 2], в яких розглядалися питання дослідження динаміки п'єзоелектричних ЕМП. Але в них не проводилися дослідження основних динамічних метрологічних характеристик (МХ): перехідної та імпульсної характеристики, амплітудно-частотної (АЧХ) та фазочастотної характеристик (ФЧХ), відносної та абсолютної динамічних похибок.

**Мета роботи.** У зв'язку з відсутністю інформації про поведінку перерахованих вище характеристик для п'єзоелектричних ЕМП виникає необхідність у дослідженні та оцінюванні основних динамічних метрологічних характеристик.

**Оцінювання динамічних метрологічних характеристик.** Визначення технічного стану п'єзоелектричних ЕМП і характеру зміни їх параметрів є однією з головних задач під час діагностування. Для діагностуючих об'єктів під час побудови ЕМП характерною є наявність в більшості випадків математичних описів їх функціонування у вигляді диференціальних рівнянь з вхідними коефіцієнтами – постійними чи змінними. Моделювання такої системи рівнянь дає змогу встановити закономірності зміни характеристик діагностуючого об'єкта залежно від його стану, появи та рівня розвитку несправностей, і в такий спосіб виявити характеристики, що найбільш чутливі до появи такого типу несправностей.

П'єзоелектричні ЕМП, як правило, працюють в режимах розгону та гальмування, які описуються диференціальним рівнянням другого порядку:

$$J \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + k \frac{d\varphi(t)}{dt} + k_3 \varphi(t) = M_n \quad (1)$$

де  $J$  – сумарний момент інерції;  $k$  – коефіцієнт передачі за швидкістю;  $k_3$  – коефіцієнт, що враховує кутову жорсткість конструкції п'єзоелектричного ЕМП;  $\varphi$  – кут повороту вала;  $d\varphi/dt$  – кутова швидкість;  $d^2\varphi/dt^2$  – кутове прискорення;  $M_n$  – пусковий момент.

В результаті розв'язання рівняння (1) за нульових початкових умов, отримано вираз, який має вигляд

$$\varphi(t) = \frac{M_n}{k_3} + \frac{M_n \left( k - \sqrt{k^2 - 4Jk_3} \right) \cdot \exp \left( \frac{- \left[ k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3} \right] t}{2J} \right)}{2k_3 \sqrt{k^2 - 4Jk_3}} - \frac{M_n \left( k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3} \right) \cdot \exp \left( \frac{- k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t \right)}{2k_3 \sqrt{k^2 - 4Jk_3}} \quad (2)$$

Графічне подання розв'язку диференціального рівняння другого порядку (1) показано на рис. 1. Перехідна характеристика  $h(t)$  за нульових початкових умов має вигляд [3]

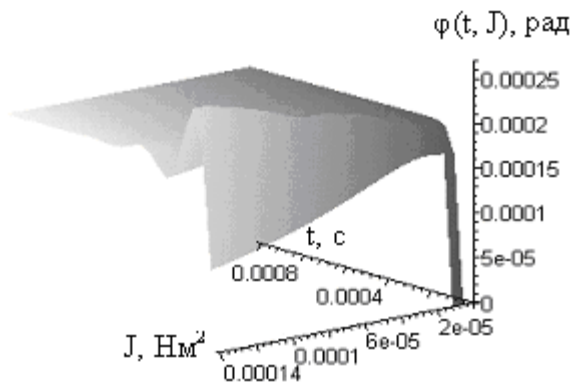
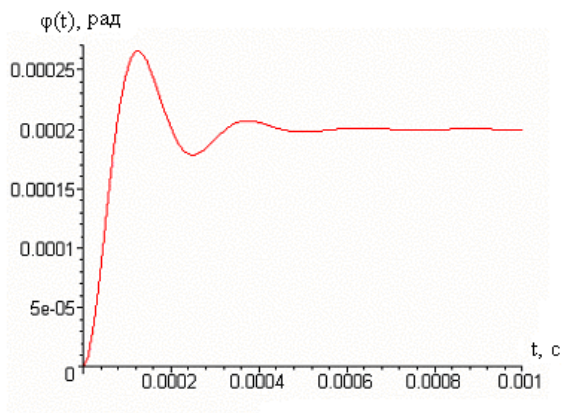
$$\frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + \frac{k}{J} \frac{d\varphi(t)}{dt} + \frac{k_3}{J} \varphi(t) = \frac{1}{J} h(t) \quad (3)$$

Розв'язавши рівняння (3), отримаємо аналітичну залежність для перехідної характеристики:

$$h(t) = \frac{K}{k_3} \left\{ 1 - \frac{\left( k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3} \right) \exp\left( \frac{-k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t \right)}{2\sqrt{k^2 - 4Jk_3}} - \left[ 1 - \frac{k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2\sqrt{k^2 - 4Jk_3}} \right] \exp\left( \frac{k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t \right) \right\}, \quad (4)$$

де  $K$  – коефіцієнт перетворення п'єзоелектричного ЕМП.

Графічне подання перехідної характеристики  $h(t)$ , яка описується рівнянням (4), показано на рис. 2.



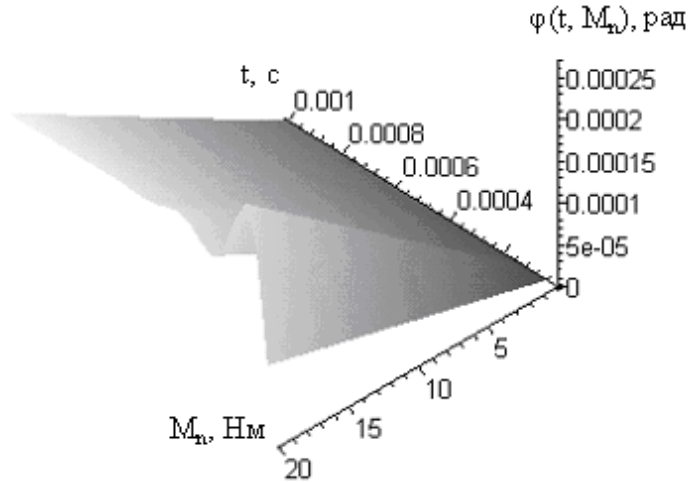


Рис. 1. Характеристики зміни кута повороту  $\varphi$ : за зміни у часі ( $M_n=20$  Нм,  $J=0.14 \cdot 10^{-3}$  Нм<sup>2</sup>) (а), залежно від часу і моменту інерції (б) та залежно від часу і пускового моменту (в)

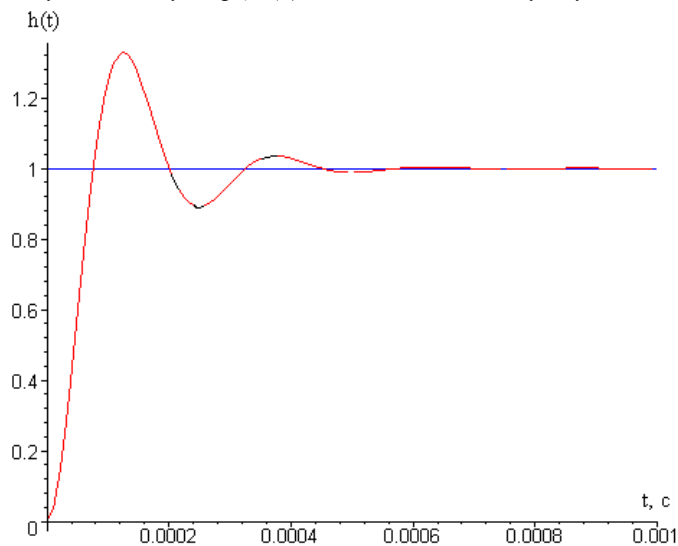


Рис. 2. Перехідна характеристика п'єзоелектричного ЕМП

Як бачимо з перехідної характеристики (рис. 2), тривалість перехідного процесу п'єзоелектричного ЕМП типу ДП-20 не перевищує 1 мс.

Імпульсну характеристику  $\delta(t)$  п'єзоелектричного ЕМП визначимо підстановкою функції Дірака замість вхідного сигналу у рівняння (1) [3]:

$$\frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + \frac{k}{J} \frac{d\varphi(t)}{dt} + \frac{k_3}{J} \varphi(t) = \frac{\delta(t)}{J}, \quad (5)$$

розв'язком рівняння (5) є аналітична залежність імпульсної характеристики, яка має вигляд

$$\delta(t) = \frac{K}{\sqrt{k^2 - 4Jk_3}} \left( \exp\left[\frac{-k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t\right] - \exp\left[\frac{-k - \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t\right] \right) \quad (6)$$

Графічне подання імпульсної характеристики показано на рис. 3.

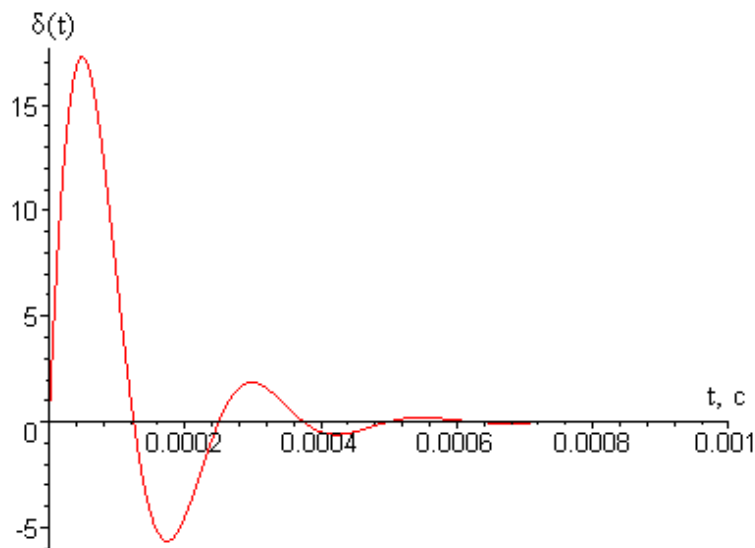


Рис. 3. Імпульсна характеристика

Для практичних розрахунків динамічних властивостей п'єзоелектричних ЕМП доцільно розглянути окремий випадок передатної функції за умови, коли  $s = j\omega$ . У цьому випадку перетворення Лапласа замінюється перетворенням Фур'є, а передатна функція  $L(s)$  виражається сукупністю амплітудно- і фазочастотних характеристик.  $L(j\omega)$  – амплітудно-фазова характеристика, яка дає уявлення про частотні властивості ЕМП [4]. Комплексна частотна функція п'єзоелектричних ЕМП має вигляд

$$L(j\omega) = \frac{KM_n J}{-J^2 \omega^2 + jk_3 \omega + k_3 J} = \frac{KM_n (k_3 - J\omega^2)}{J^2 \omega^4 - 2J\omega^2 k_3 + \omega^2 k^2 + k_3^2} - j \frac{KM_n \omega k}{J^2 \omega^4 - 2J\omega^2 k_3 + \omega^2 k^2 + k_3^2}$$

$$|G(\omega)| = \frac{KM_n}{\sqrt{J^2 \omega^4 - 2J\omega^2 k_3 + \omega^2 k^2 + k_3^2}} = \frac{KM_n}{\sqrt{16\pi^4 J^2 f^4 - 8\pi^2 J f^2 k_3 + 4\pi^2 f^2 k^2 + k_3^2}}$$
(7)

Перейшовши до частотної області та відокремивши дійсну та уявну частини, отримаємо вирази для амплітудно-частотної характеристики

$$A(\omega) = K \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} = \frac{KM_n}{\sqrt{J^2 \omega^4 - 2J\omega^2 k_3 + \omega^2 k^2 + k_3^2}}$$

$$= \frac{KM_n}{\sqrt{16\pi^4 J^2 f^4 - 8\pi^2 J f^2 k_3 + 4\pi^2 f^2 k^2 + k_3^2}}$$
(8)

та фазочастотної характеристики:

$$\Phi(\omega) = \arctan\left(\frac{b(\omega)}{a(\omega)}\right) = -\arctan\left(\frac{\omega k}{k_3 - J\omega^2}\right) = -\arctan\left(\frac{2k\pi f}{k_3 - 4J\pi^2 f^2}\right),$$
(9)

де  $a(\omega)$  і  $b(\omega)$  – відповідно дійсна та уявна частина передатної функції.

Характеристики зміни теоретичної та експериментальної амплітудно- та фазочастотної характеристик показано на рис. 4. Як бачимо із рис. 4, резонанс теоретично побудованих АЧХ і ФЧХ

відбувається на частоті 420 Гц, а побудовані на основі експериментальних досліджень АЧХ і ФЧХ п'єзоелектричного ЕМП типу ДП-20 мають резонансну частоту 370 Гц.

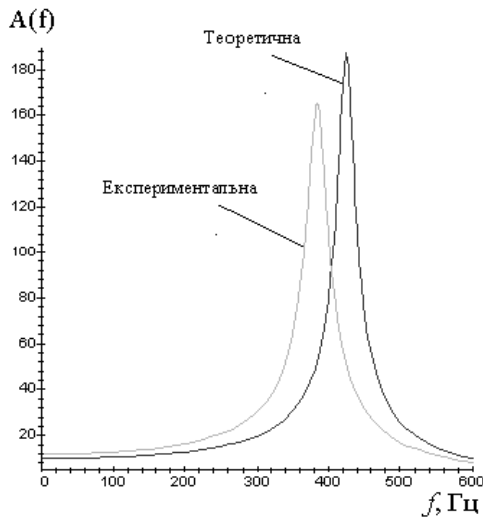
Характерною особливістю амплітудно-частотної характеристики п'єзоелектричних ЕМП є те, що в області низьких частот АЧХ апроксимується лінійною залежністю (рис. 4, а), тобто п'єзоелектричні ЕМП є високостабільними на низьких частотах обертання вала. Як зрозуміло з рис. 4, б, фазочастотна характеристика в області низьких частот також є лінійною.

Для оцінки динамічної похибки, що виникає в ЕМП, введемо поняття відносної похибки, яку визначимо через отриману передатну функцію (7). Тоді зображення відносної динамічної похибки запишемо у вигляді [4]

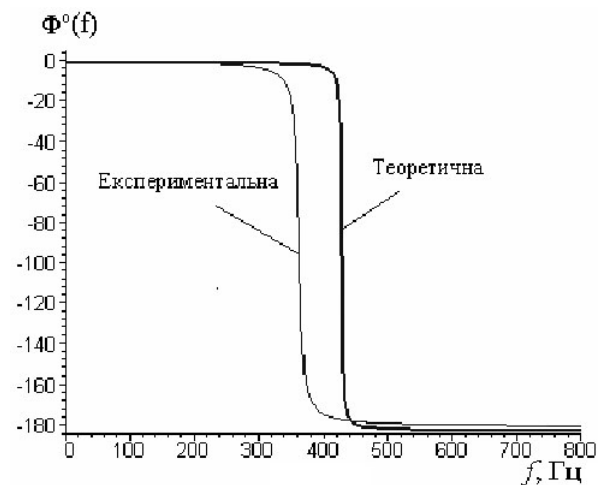
$$\delta_{\delta}(j\omega) = \frac{L(j\omega)}{L(0)} - 1 \quad (10)$$

Зображення абсолютної динамічної похибки визначимо з виразу

$$\Delta_{\delta}(j\omega) = \delta_{\delta}(j\omega)\varphi(j\omega); \Delta_{\delta}(t) = L^{-1}\{\delta_{\delta}(j\omega)\varphi(j\omega)\} \quad (11)$$



а



б

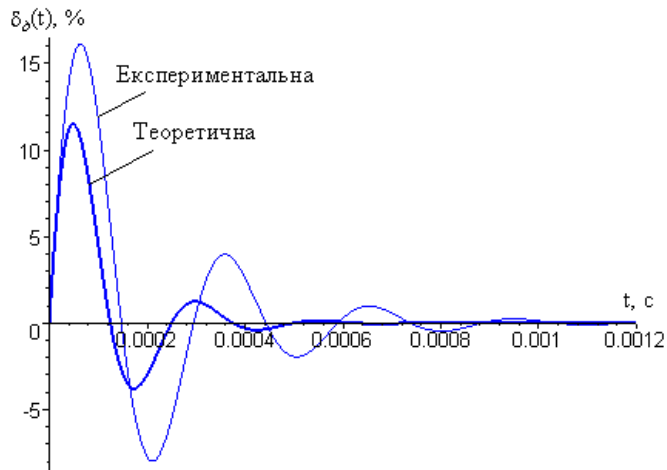
Рис. 4. Амплітудна (а) та фазова (б) характеристики  
п'єзоелектричного ЕМП

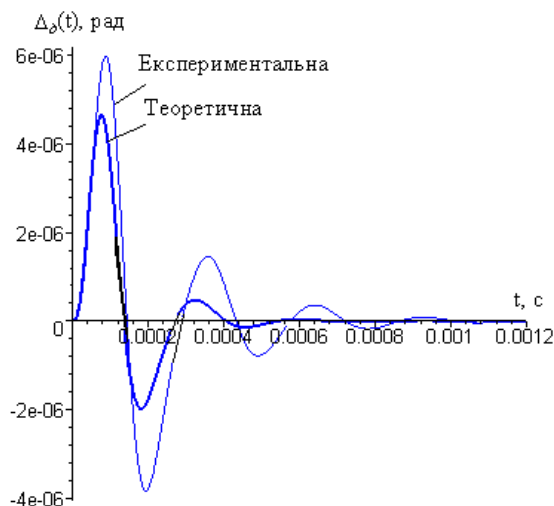
При підстановці передатної функції (7) у формулу (10) і, провівши зворотне перетворення Лапласа останнього рівняння, отримаємо аналітичну залежність відносної динамічної похибки, яка для п'єзоелектричних ЕМП має такий вигляд:

$$\delta_D(t) = \frac{k_3 \left( \exp \left[ \frac{k - \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t \right] - \exp \left[ \frac{k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t \right] \right) \cos \left( \frac{\sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t \right)}{\sqrt{k^2 - 4Jk_3} J} \text{Dir}(t)$$

$$\delta_\varphi = \frac{k_3 \exp \left[ \frac{k - \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t \right] \exp \left[ \frac{k + \sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t \right] \cos \left( \frac{\sqrt{k^2 - 4Jk_3}}{2J} t \right)}{\sqrt{k^2 - 4Jk_3} J} \text{Dir}(t)$$
(12)

Графічне подання характеристик зміни абсолютної та відносної динамічних похибок показано на рис. 5.





а)

б)

Рис. 5. Характеристики зміни відносної (а) та абсолютної (б) динамічних похибок

Аналіз отриманих характеристик зміни динамічних похибок показує, що запропонований математичний апарат з високою точністю відтворює фізичні процеси п'єзоелектричного ЕМП.

**Висновки.** В результаті дослідження динамічних МХ п'єзоелектричних ЕМП встановлено, що тривалість перехідного процесу не перевищує 1 мс, АЧХ і ФЧХ має високу стабільність в області низьких частот. Як показали експериментальні дослідження, зміна фази та резонанс п'єзоелектричного ЕМП типу ДП-20 відбуваються на частоті приблизно такій, що дорівнює 370 Гц, а максимальна відносна динамічна похибка не перевищує 16 %. Порівняно невеликі тривалості перехідних процесів свідчать про те, що цей тип ЕМП характеризується малими інерційними властивостями. За допомогою отриманих аналітичних залежностей можна проводити кількісне оцінювання динамічних метрологічних характеристик п'єзоелектричних ЕМП різних типів.

1. Лавриненко В.В., Карташев И.А. Пьезоэлектрические двигатели. – М., 1972. 2. Джагунов Р.Г., Ефроев А.А. Пьезоэлектрические элементы в приборостроении и автоматике. – Л., 1986. 3. Поджаренко В.О., Васілевський О.М. Аналіз динамічних метрологічних характеристик вимірювального перетворювача вібрації: Наукові праці IV Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка – 2004”. – Харків, 2004. – Т.2. – С. 130–132. 4. Поджаренко В.О., Васілевський О.М., Івахова Л.І. Аналіз похибок вимірювального каналу вібрації // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – Ч.1, Т.1. – № 4. – С. 118–122.

УДК 62-492.2