

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА  
ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 621.375

**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА  
В СИСТЕМАХ ПОЗИЦІЮВАННЯ**

*Бєлова А.В., Петренко С.Ф. Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

*В статті розглянуто характеристики позиціювання і точності, а також частотні та навантажувальні характеристики п'єзоелектричних двигунів, які використовуються в системах прецизійного позиціювання*

**Вступ. Постановка проблеми**

Розвиток новітніх технологій неможливий без таких технологій як лазерні, технології фотолітографії, медичні мікротехнології, які вимагають підвищення точності вимірювання різноманітних величин, мініатюризації виробництва, що передбачає виробництво мікродеталей та мікрокомпонентів, підвищення точності їх мікрообробки на верстатах різного типу. До задач точного приладобудування при цьому відноситься створення систем високопрецизійного позиціювання з малою інерційністю та відсутністю дрейфа для маніпулювання деталями, їх закріплення, а також позиціювання та утримування положення в просторі. При цьому особливі вимоги пред'являються до виконавчих елементів, оскільки саме вони мають безпосередній контакт з мікродеталями або об'єктами досліджень, а також до технічних характеристик приводів високоточних пристроїв, які використовуються в прецизійних системах позиціювання. Такі приводи повинні забезпечувати фіксацію кутового положення вала і мати високі динамічні характеристики часу розгону і гальмування [1]. В точному приладобудуванні широкого поширення набули п'єзоелектричні двигуни, на основі яких створюються жорсткі безлюфтові безредукторні направляючі [2].

**Метою роботи** є дослідження характеристик п'єзоелектричного двигуна в режимі позиціювання та визначення його точнісних та навантажувальних характеристик

**Основна частина**

В п'єзоелектричному двигуні поступальний або обертальний рух ротора здійснюється шляхом перетворення електричної енергії в механічну внаслідок зворотного п'єзоелектричного ефекту [3]. За принципом роботи п'єзоелектричні двигуни умовно можна розділити на дві групи. До першої відносяться двигуни хвильового типу, у яких в п'єзоелементі (статорі) збуджується біжуча хвиля, що і змушує ротор обертатися. За своїми функціональними можливостями вони

наближаються до швидкохідних електромагнітних двигунів малої і середньої потужності. До другої групи відносяться двигуни ударного типу, у яких в п'єзоелементі (резонаторі) формується стояча хвиля, і її характер коливань передається в штовхальники.

В системах прецизійного позиціонування використовуються двигуни ударного типу. В приводах ударного типу ударна взаємодія статора і ротора здійснюється в зоні контакту і під дією ударних імпульсів рухлива частина починає рухатись з заданою частотою.

За способом обертання п'єзоелектричні двигуни можна розділити на двигуни нереверсивного і реверсивного обертання. Нереверсивні двигуни – двигуни односпрямованого обертання, тобто вал двигуна може обертатися тільки в одному напрямку. Реверсивні двигуни складаються з двох незалежних двигунів односпрямованого обертання. Такі двигуни мають властивість обертати вал за годинниковою стрілкою і навпаки. Це забезпечується специфічністю конструкції, суть якої полягає в установці на одному валу двох фрикційно-розв'язаних приводів, кожний з яких працює тільки в одному напрямку. Керування двигуном відбувається роздільно по двох ланцюгах, кожний з яких відповідає розвороту вала за і проти годинникової стрілки.

На базі двигунів реверсивного обертання побудовані лінійні прецизійні направляючі типу Sb–01 з діапазоном переміщення 10 – 100 мм (рис. 1).

Дослідження параметрів позиціонування та точнісних характеристик п'єзоелектричного двигуна проводились на двигуні реверсивного обертання з датчиком зворотного зв'язку типу РМ-20R (рис. 2), робота якого базується на радіальних коливаннях кільцевого п'єзоелектричного резонатора [2].

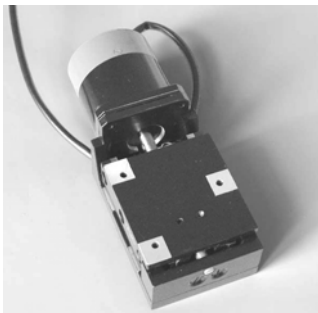


Рис. 1. Прецизійна лінійна направляюча типу Sb–01

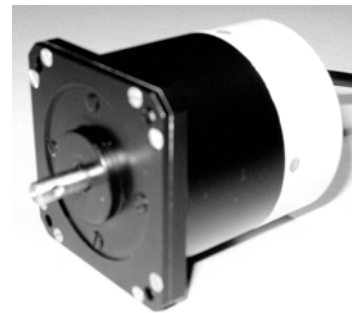


Рис. 2. П'єзоелектричний двигун типу РМ-20R

Для вимірювання параметрів позиціонування та точнісних характеристик п'єзоелектричного двигуна використовували експериментальну вимірювальну установку на основі автоколіматора з телевізійною камерою та комп'ютера [4].

Установка містить автоколіматор, який спряжено з телевізійною камерою, через яку зображення з автоколіматора подається на комп'ютер і виводиться на екран монітора. Отже, на екрані монітору спостерігали зображення сітки автоколіматора та колімаційного „хреста” автоколіматора. Керування двигуном, на валу якого закріплено плоскопаралельне дзеркало, виконується через датчик

зворотного зв'язку, контролер та комп'ютер. Оптичне поле автоколіматора містить мітки та колімаційний „хрест”, який відображує переміщення валу досліджуваного п'єзоелектричного двигуна. Як датчик зворотного зв'язку використовується стандартний растровий оптичний датчик серії MOZ – 30 компанії Megatron з кількістю міток на обороті 1000 [5]. Такий датчик є інкрементальним датчиком, що виробляє сигнал при зміні кутового положення валу відносно початкового положення. Вихідний сигнал представляє собою послідовність імпульсів прямокутної або синусоїдальної форми. Обробка сигналів такого датчика дає інформацію про поточне значення кута.

Стандартний растровий оптичний датчик серії MOZ–30 компанії Megatron має 1000 міток-штрихів, при цьому 4000 міток-відліків. Отже, відстань  $\Delta$  між ближніми мітками датчика дорівнює:

$$\Delta = \frac{360^\circ}{4000} = 0,09^\circ = 5,4' . \quad (1)$$

Це означає, що реальне положення вала п'єзоелектричного двигуна, яке задається датчиком може бути задане з певною похибкою в межах 5,4 кутових хвилин і при вимірюванні точнісних характеристик двигуна необхідно враховувати цей факт. Для вимірювання точності позиціонування п'єзоелектричного двигуна типу РМ-20R, йому задавали переміщення на один оберт при різних швидкостях роботи від 10 до 60 об./хв. і вимірювали кут, на який двигун відхилиться від заданого положення, за допомогою автоколіматора та комп'ютера. Тобто при великих швидкостях (більше 30 об./хв.) величина відхилення положення вала після виконання оберту від заданого положення перебільшує 5,4 кутових хвилин, тобто одну мітку датчика. При цьому відбувається перерегулювання всієї системи, тому працювати на таких швидкостях рекомендується тільки при умові, що ввімкнено режим уповільнення при підході до точки зупинки.

Для швидкостей обертання вала в межах від 10 до 20 обертів на хвилину величина відхилення положення вала від заданого положення змінюється в межах від 30 до 120 кутових секунд. На рис. 3 зображено закон відхилень похибок позиціонування п'єзоелектричного двигуна від середнього значення при кутових швидкостях  $\omega$  в діапазоні 10 – 20 об./хв.

Як видно з рис. 3 розподіл точності позиціонування п'єзоелектричного двигуна при кутових швидкостях  $\omega$  в діапазоні 10 – 20 об./хв. наближається до нормального і відхилення від середнього значення складає  $\pm 10$  кут. с.

Розглянемо п'єзоелектричний двигун у складі лінійної прецизійної направляючої типу Sb–01, де обертальний рух вала двигуна перетворюється в поступальне переміщення рухливого столику направляючої за допомогою системи „гвинт – гайка”. Крок різі гвинта в такій направляючій дорівнює 0,5 мм. Тобто кутове відхилення вала двигуна від початкового положення після виконання оберту, наприклад, на 100 кутових секунд, призведе до лінійного переміщення направляючої, рівного 0,039 мкм.

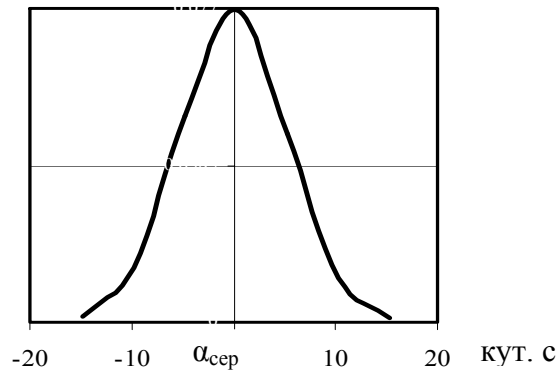


Рис. 3. Закон розподілу відхилень похибок позиціювання п'єзоелектричного двигуна від середнього значення при кутових швидкостях  $\omega$  в діапазоні 10 – 20 об./хв

На рис. 4 зображено залежність середніх значень точності позиціювання п'єзоелектричного двигуна РМ-20R від кутових швидкостей обертання п'єзоелектричного двигуна.

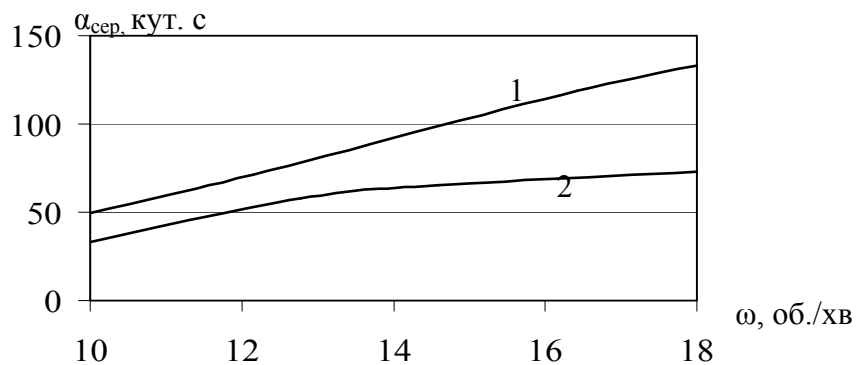


Рис. 4. Залежність середніх значень точності позиціювання п'єзоелектричного двигуна РМ-20R від кутових швидкостей обертання п'єзоелектричного двигуна: 1 – за годинниковою стрілкою; 2 – проти годинникової стрілки

Як видно з рис. 4, залежності мають майже лінійний характер. При цьому, точність позиціювання лінійної направляючої при обертанні двигуна проти годинникової стрілки вища, ніж за годинниковою стрілкою. Це пояснюється конструкцією та принципом роботи п'єзоелектричного двигуна, який є двигуном реверсивного обертання і складається з двох нереверсивних двигунів, один з яких нерухомий відносно корпусу, а інший – рухомий. Так, при обертанні двигуна проти годинникової стрілки, обертається тільки осцилятор, жорстко з'єднаний з валом, а при обертання за годинниковою стрілкою разом з осцилятором обертається і ротор, який і створює додатковий момент інерції, що і пояснює гірші характеристики двигуна при його обертанні за годинниковою стрілкою відносно характеристик при обертанні двигуна проти годинникової стрілки [2].

Розрахунок моменту інерції системи «п'єзоелектричний двигун-датчик-плоскопаралельне дзеркало» визначали за формулою:

$$\frac{J\omega^2}{2} = M\Delta\varphi, \quad (2)$$

де  $J$  – невідомий момент інерції;  $\omega$  – кутова швидкість п'єзоелектричного двигуна;  $M$  – момент самогальмування;  $\Delta\varphi$  – середнє значення позиціонування.

Отже, для різних значень кутових швидкостей п'єзоелектричного двигуна та відповідних значень позиціонування отримали середнє значення моменту інерції: для обертання двигуна за годинниковою стрілкою –  $J = 0,0418 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , проти годинникової стрілки –  $J = 0,0342 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Різниця цих моментів інерції відповідає моменту інерції ротора, який дорівнює  $J = 0,76 \cdot 10^{-5} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , що відповідає результатам розрахунку інерційного моменту ротора.

Вимірювання точнісних характеристик п'єзоелектричних двигунів проводили на автоколіматорній установці [4]. Під точнісною характеристикою двигуна розуміють залежність величини кутового кроку двигуна від тривалості імпульсу збудження. Величина кроку при кроковому режимі керування визначається тривалістю імпульсу живлення (тривалістю збудження). Отже, при зміні тривалості імпульсу живлення змінюється величина кутового кроку, а при зміні частоти слідування цих імпульсів – змінюється інтегральна швидкість руху вала. Для вимірювання точнісних характеристик п'єзоелектричному двигуну задавали кроковий режим руху, змінювали кількість імпульсів збудження і вимірювали величину кутового кроку. Залежність тривалості кроку від періодів збудження п'єзоелектричних двигунів типу РМ-20R та РМ-22R [2] зображені на рис. 5.

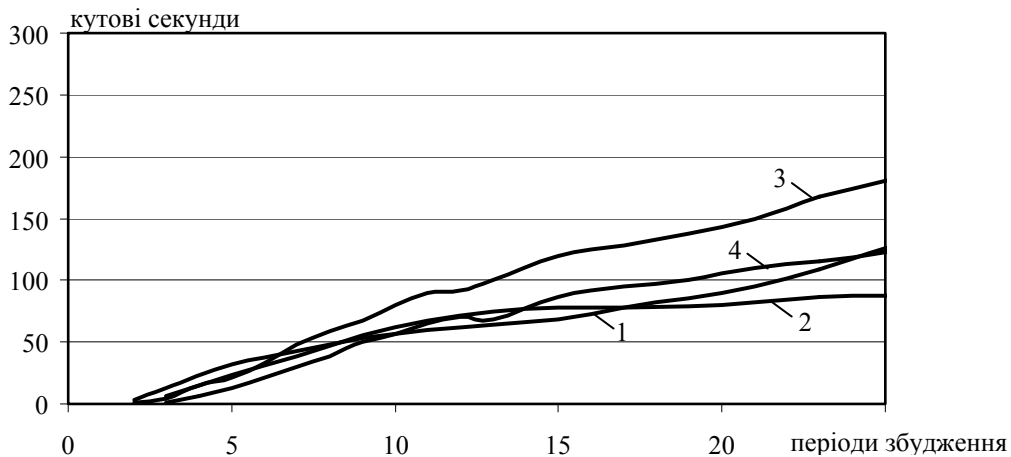


Рис. 5. Залежність тривалості кроку від періодів збудження п'єзоелектричного двигуна, де: 1 – РМ-20R за годинниковою стрілкою; 2 – РМ-20R проти годинникової стрілки; 3 – РМ-22R за годинниковою стрілкою; 4 – РМ-22R проти годинникової стрілки

Як видно з рис. 5 характер точнісних характеристик двигунів типів РМ-20R та РМ-22R наближається до лінійного. При цьому двигуни починають рухатись вже при подачі трьох періодів збудження. У діапазоні від 3 до 5 періодів збу-

дження вони мають мінімальний крок кутового переміщення, який наближається до 0,03 кутових хвилин, що відповідає 2 кутовим секундам.

Отже, при роботі двигуна в кроковому режимі в лінійній направляючій типу Sb-01 за умови відсутності люфтів в системі можна досягти переміщення рівного 0,77 нм. При кількості періодів збудження величина кутового кроку двигунів збільшується за лінійним законом, при цьому для обертання вала двигунів за годинниковою стрілкою величини кутових кроків двигунів різних типів сягають більших величин ніж у випадку обертання проти годинникової стрілки. І тільки на відрізку в діапазоні від 3 до 10 періодів збудження величини кутових кроків майже рівні для різних випадків обертання двигунів.

При роботі двигунів в системах позиціонування на валу двигуна можуть виникати зовнішні навантаження, наприклад, рухливий столик направляючої створює додатковий зовнішній момент на валу двигуна. Тому для стабільної роботи необхідно визначити діапазон частот збудження п'єзоелементу, в якому двигун найменше чутливий до зміни зовнішніх моментів, тобто діапазон, в якому швидкість обертання двигуна постійна при різних значеннях зовнішніх моментів. Для цього необхідно визначити навантажувальні характеристики п'єзоелектричного двигуна – залежність швидкості обертання двигуна від зовнішнього моменту на валу при різних частотах збудження п'єзоелементу. Для реверсивного двигуна перевіряються навантажувальні характеристики в двох напрямках – за годинниковою стрілкою і проти.

Для отримання навантажувальних характеристик п'єзоелектричного двигуна використовували навантажувальний стенд КЗ-21 на основі електромагнітної муфти БПМ-68, зображений на рис. 6.

Принцип роботи установки полягає в наступному. Вал електромагнітної муфти з датчиком зворотного зв'язку 2 та вал п'єзоелектричного двигуна 1 суміщаються. За допомогою джерела постійного струму 5 на електромагнітну муфту 2, через датчик зворотного зв'язку подається струм, який в свою чергу викликає зміну моменту на валу муфти. Змінюємо таким чином зовнішній момент на валу п'єзоелектричного двигуна.

При цьому за допомогою комп'ютера 4 та контролера 3 п'єзоелектричний двигун збуджується певним діапазоном частот, а на екрані монітора комп'ютера 4 фіксуються залежності швидкості обертання п'єзоелектричного двигуна від частоти збудження його п'єзоелементу, тобто частотні характеристики, які представлені на рис. 7 для різних значеннях зовнішнього моменту на валу: 0 Н·м (холостий хід), 0,025 Н·м; 0,050 Н·м; 0,075 Н·м; 0,1 Н·м. При цьому за допомогою комп'ютера 4 та контролера 3 п'єзоелектричний двигун збуджується певним діапазоном частот, а на екрані монітора комп'ютера 4 фіксуються залежності швидкості обертання п'єзоелектричного двигуна від частоти збудження його п'єзоелементу, тобто частотні характеристики, які представлені на рис. 7 для різних значеннях зовнішнього моменту на валу: 0 Н·м (холостий хід), 0,025 Н·м; 0,050 Н·м; 0,075 Н·м; 0,1 Н·м.

Використовуючи частотні характеристики п'єзоелектричного двигуна, отримали навантажувальні характеристики, зображені на рис. 8.

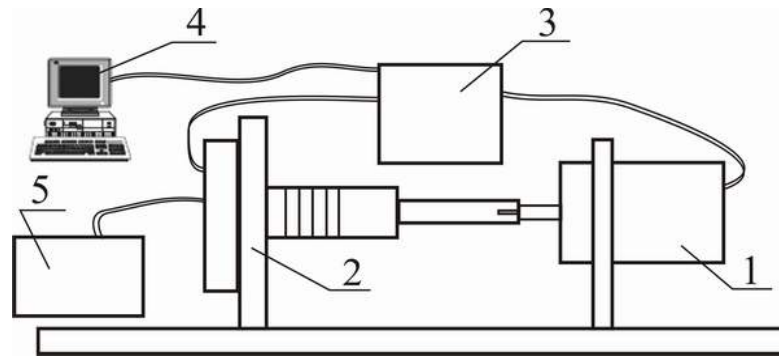


Рис. 6. Навантажувальний стенд для вимірювання частотних і навантажувальних характеристик п'єзоелектричного двигуна, де: 1 – п'єзоелектричний двигун; 2 – електромагнітна муфта з датчиком зворотного зв'язку; 3 – контролер; 4 – комп'ютер; 5 – джерело постійного струму.

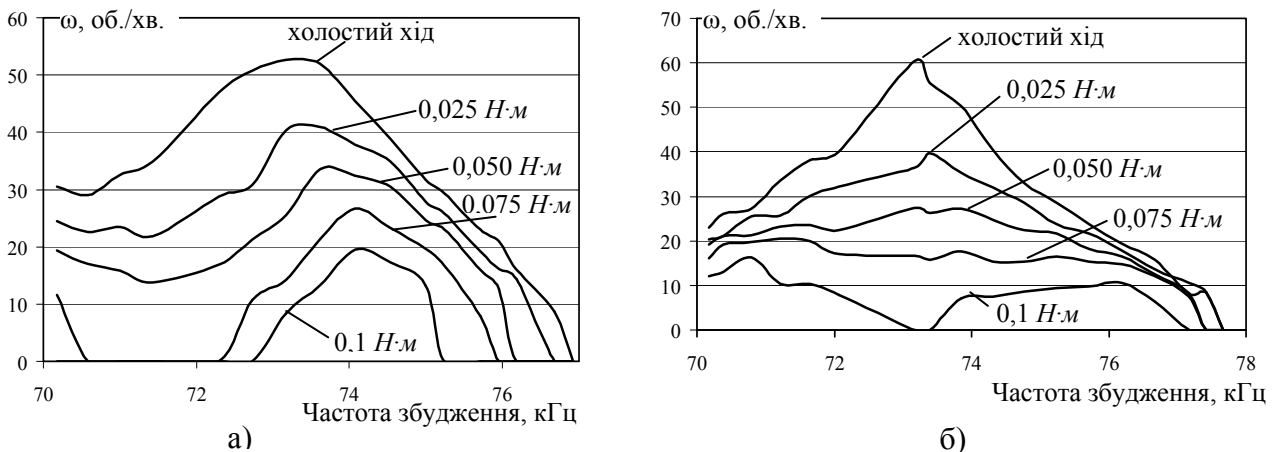


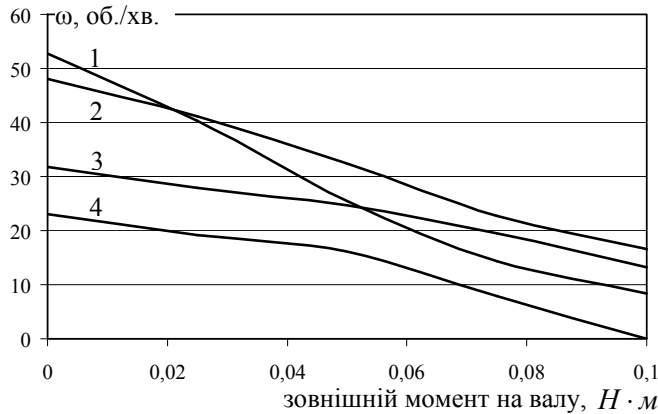
Рис. 7. Частотні характеристики п'єзоелектричного двигуна РМ-20R, де: а) за годинниковою стрілкою, б) проти годинникової стрілки

Як видно з навантажувальних характеристик (рис. 7, 8), при обертанні за годинниковою стрілкою в діапазоні частот від 74 до 75 кГц, а проти годинникової стрілки в діапазоні частот від 75 до 76 кГц швидкість обертання п'єзоелектричного двигуна майже не залежить від зовнішнього моменту на його валу, тобто саме в цьому діапазоні частот п'єзоелектричний двигун не чутливий до зовнішнього навантаження.

Отже, для стабільної роботи та підвищення точності позиціонування прецизійних систем п'єзоелектричний двигун необхідно збуджувати частотами в діапазоні 74 – 76 кГц.

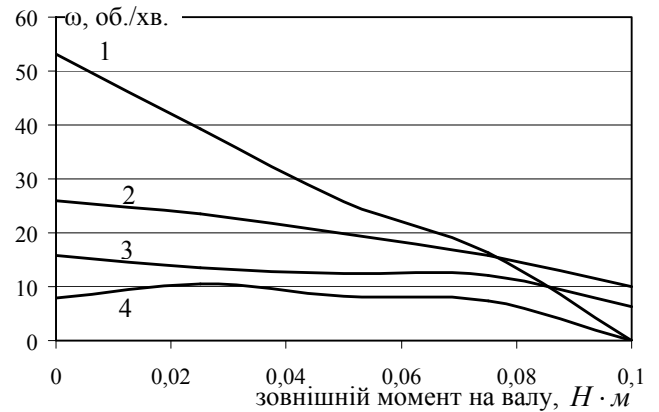
### Висновки

Отримано результати експериментальних досліджень по динамічним параметрам п'єзоелектричних двигунів, по кроковому режимі руху, а також по точності позиціонування залежно від швидкості обертання п'єзоелектричних двигунів.



1 – 73 кГц; 2 – 74 кГц;  
3 – 75 кГц; 4 – 76 кГц

а)



1 – 74 кГц; 2 – 75 кГц;  
3 – 76 кГц; 4 – 77 кГц

б)

Рис. 8. Навантажувальні характеристики п'єзоелектричного двигуна РМ-20R, де: а) за годинниковою стрілкою, б) проти годинникової стрілки

Отримані результати експериментальних досліджень навантажувальних характеристик залежно від частоти збудження п'єзоелектричного двигуна показали, що при використанні п'єзоелектричних двигунів в системах прецизійного позиціонування потрібно враховувати напрямок руху двигуна з врахуванням його інерційних властивостей. Використання п'єзоелектричних двигунів в системах прецизійного позиціонування дозволить створити високоточні безлюфтові та безредукторні системи виконавчих органів для сучасних лазерних технологій, фотолітографії, медичних мікротехнологій.

#### Література

1. Микрообработка: потенциал и перспективы // Оборудование №9 (105), сентябрь 2005, <http://archive.expert.ru/oborud/>.
2. Пьезоэлектрические двигатели, <http://piezomotor.com.ua/>.
3. Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. Киев «Корнійчук», 2002. – С. 96.
4. Белова А. В. Вимірювання кутових переміщень лінійних прецизійних направляючих // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування -2007. - № 34. - С. 90-95.
5. Optoelektronische Inkrementalgeber, Serie MOZ, MOZ30, <http://www.megatron.de/export/>.

Белова А.В., Петренко С.Ф. **Исследование характеристик пьезоэлектрического двигателя в системах позиционирования.**  
В статье рассмотрены характеристики позиционирования и точности, а также частотные и нагрузочные характеристики пьезоэлектрических двигателей, которые используются в системах прецизионного позиционирования.

Belova A.V., Petrenko S.F. **Research of piezoelectric motor characteristics for positioning systems.**  
Characteristics of the positioning, accuracy, frequency and loading of piezoelectric motor which are used in systems of precision positioning are considered.

Надійшла до редакції  
25 березня 2008 року