

**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].

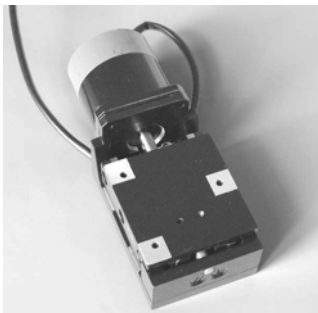


Рис. 1. Прецизійна лінійна направляюча типу Sb–01

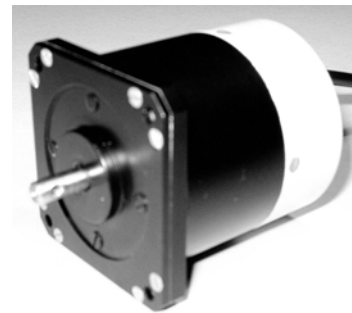


Рис. 2. П'єзоелектричний двигун типу РМ-20R

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 валу 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.

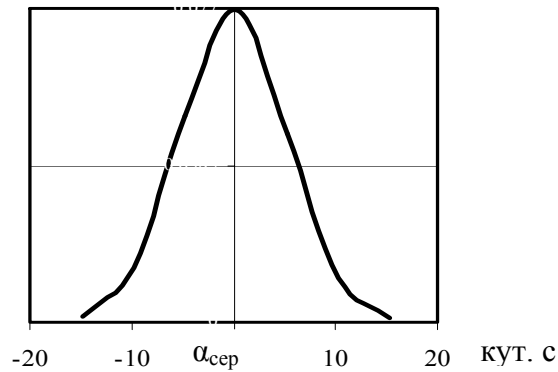


Рис. 3. Закон розподілу відхилень похибок позиціювання п'єзоелектричного двигуна від середнього значення при кутових швидкостях  $\omega$  в діапазоні 10 – 20 об./хв

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

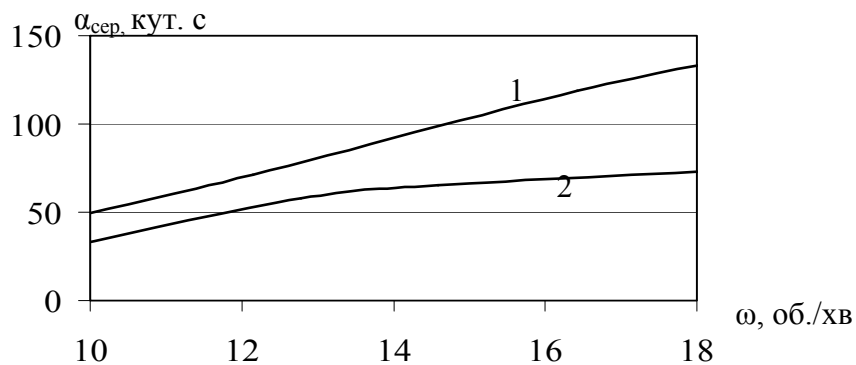


Рис. 4. Залежність середніх значень точності позиціювання п'єзоелектричного двигуна РМ-20R від кутових швидкостей обертання п'єзоелектричного двигуна: 1 – за годинниковою стрілкою; 2 – проти годинникової стрілки

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.

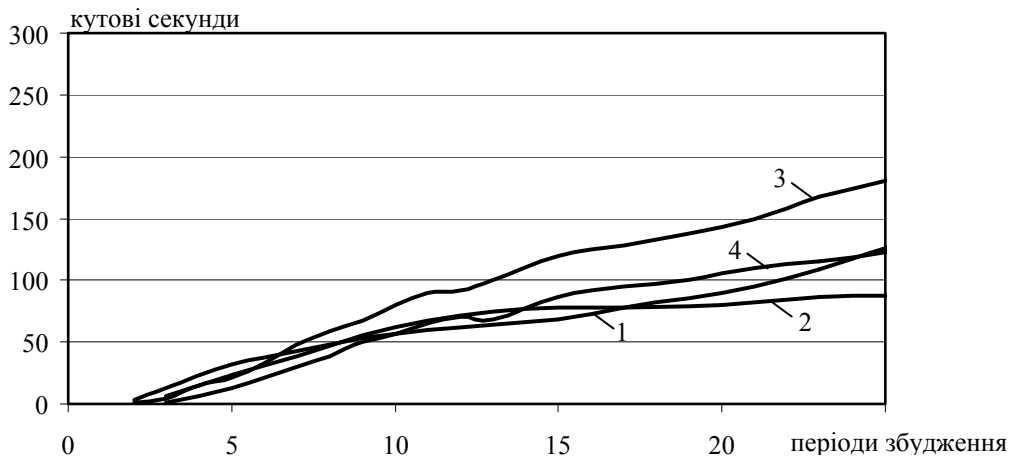


Рис. 5. Залежність тривалості кроку від періодів збудження п'єзоелектричного двигуна, де: 1 – РМ-20R за годинниковою стрілкою; 2 – РМ-20R проти годинникової стрілки; 3 – РМ-22R за годинниковою стрілкою; 4 – РМ-22R проти годинникової стрілки

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.

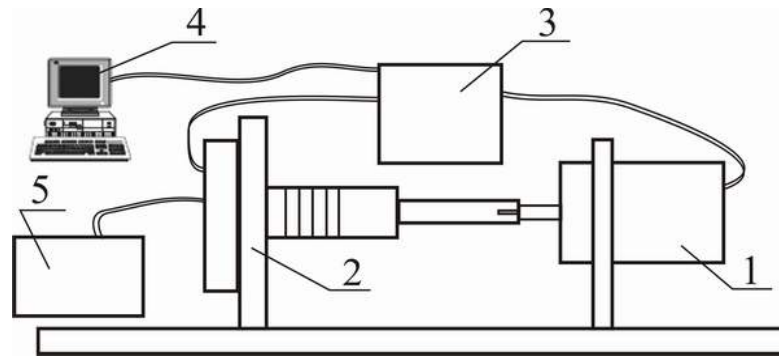


Рис. 6. Навантажувальний стенд для вимірювання частотних і навантажувальних характеристик п'єзоелектричного двигуна, де: 1 – п'єзоелектричний двигун; 2 – електромагнітна муфта з датчиком зворотного зв'язку; 3 – контролер; 4 – комп'ютер; 5 – джерело постійного струму.

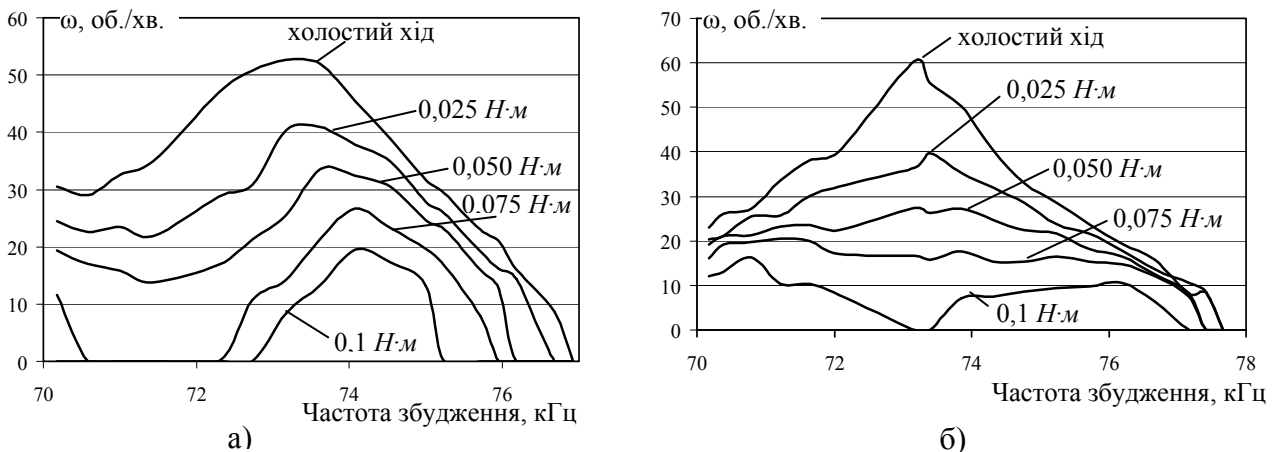


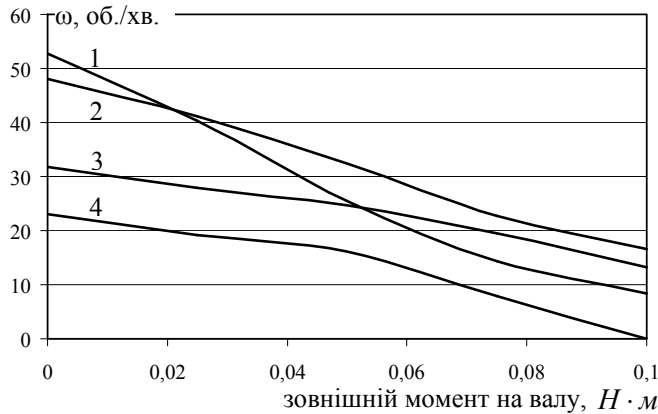
Рис. 7. Частотні характеристики п'єзоелектричного двигуна РМ-20R, де: а) за годинниковою стрілкою, б) проти годинникової стрілки

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.

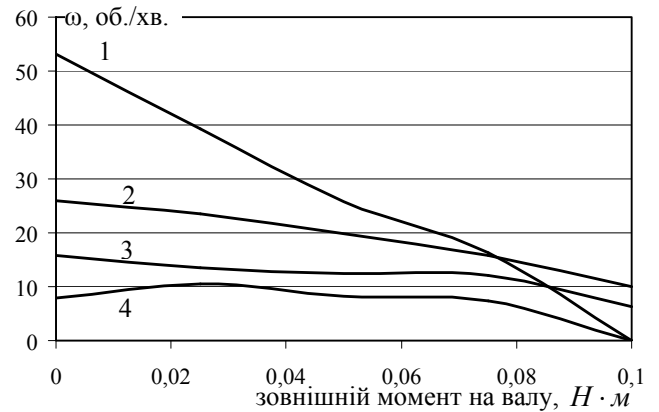
### Висновки

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



УДК 681.317

## СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕМПЕРАТУР

*Тихан М.О., Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна*

*Запропонований спосіб вимірювання тиску в умовах нестационарних температур, який дозволяє швидкодіюче коригування температурної похибки вимірювача тиску*

### **Вступ**

У багатьох сучасних галузях промисловості, вимірювання тиску доводиться здійснювати за умови нестационарних термовпливів. Така ситуація зустрічається при відпрацюванні силових і енергетичних установок, виробів аерокосмічного комплексу, наукових дослідженнях тощо. При цьому вихідні сигнали з датчиків часто є інформативними для швидкодіючих систем керування [1 - 3]. Тому вельми актуальною є проблема створення способів і пристроїв для вимірювання тиску за умов нестационарних термовпливів, причому таких, які б забезпечували швидкодіюче коригування температурної похибки датчика.

На сьогодні з метою зменшення температурної залежності результатів вимірювання тиску в умовах істотних термовпливів розроблена низка спеціальних заходів – так званих методів термокомпенсації [4 - 1 2].

Існуючі методи термокомпенсації можна об'єднати у дві групи: фізико-конструктивну, схемотехнічну. Перша група характерна тим, що зменшення дестабілізуючого впливу температури намагаються здійснити завдяки спеціально сконструйованим механічним перетворювачам вимірювача, або ж підбором спеціальних матеріалів конструктивних елементів, примусовим охолодженням внутрішньої порожнини вимірювача, а також розробленням тензорезисторів спеціального типу з низькою температурною залежністю. Друга група характерна тим, що термокомпенсацію здійснюють завдяки схемотехнічним рішенням у вторинному електричному вимірювальному колі вимірювача через введення термокомпенсуючих елементів, або ж введенням паралельного вимірювального ланцюга з термочутливими елементами і наступним коригуванням вихідного сигналу.

Проте, попри відомі дослідження, проблема створення способів і пристроїв для вимірювання тиску за умов нестационарних термовпливів, зокрема таких, які б забезпечували швидкодіюче коригування температурної похибки датчика є невирішеною.

### **Теоретичні засади та опис способу вимірювання тиску в умовах нестационарних температур**

Для вимірювання тиску в умовах нестационарних термовпливів довели свою перспективність тензометричні вимірювачі, побудовані на базі технологій точ-

ної механіки і електроніки. Очевидно, що саме ця тенденція до певного ступеня диктуватиме конструктивні рішення вимірювачів тиску.

У сучасній практиці проектування тензометричних вимірювачів тиску утвердилися певні тенденції щодо принципового рішення конструкції приладу. Ці тенденції, в головному, зумовлені фізико-технологічними аспектами, особливостями та можливостями конструкційних матеріалів та елементів, що використовуються.

Отже, принципова конструктивна схема тензометричного вимірювача тиску містить первинний сприймаючий елемент-мембрану у вигляді круглої пластини, що жорстко защемлена у масивному корпусі, а механо-електричні перетворювачі-тензорезистори утворюють спеціальними технологіями на мембрані (рис.1).

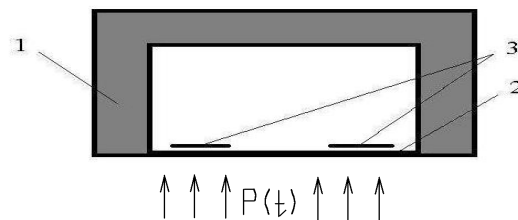


Рис. 1. Конструктивна схема типового тензометричного вимірювача тиску, де: 1-корпус, 2- мембрана, 3- тензорезистори

У багатьох дослідженнях впливу температури на процедуру вимірювання тиску [4-12] відзначається первинна роль термомеханічних процесів у мембрані на формування характеру і значення температурної похибки вимірювача тиску.

У роботі [13] на підставі дослідження термомеханічних процесів у мембрані було показано, що внаслідок впливу нестационарної температури у площині мембрани появляються додаткові стискуючі (чи розтягуючі) зусилля. Очевидно, що ці зусилля матимуть серйозний вплив на динаміку мембрани. У свою чергу саме температурна зміна динаміки мембрани і є складовою температурної похибки.

Отже, якщо мембрана жорстко защемлена по контуру і піддана дії тиску  $p(t)$  та термоудару, то в її площині виникають стискуючі (чи розтягуючі) зусилля  $N(t)$ . Тоді її динаміка описується рівнянням

$$c^4 \Delta \Delta u(r,t) \pm \frac{N(t)}{\gamma} \Delta u(r,t) + \frac{\partial^2 u(r,t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial u(r,t)}{\partial t} = \frac{p(t)}{\gamma} \quad (1)$$

де  $c^4 = \frac{D}{\gamma} = \frac{El^2}{12(1-\nu^2)\rho}$ ,  $E$  - модуль пружності,  $\rho$  і  $\gamma$  - густина і питома вага

одиниці площі мембрани,  $D$  -циліндрична жорсткість,  $\beta$  - коефіцієнт демпфування,  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона,  $R$  і  $l$  -радіус і товщина мембрани.

Розв'язок рівняння (1) запишеться

$$u(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\zeta_n}{\eta_n} \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin(\eta_n(t-\tau)) d\tau \quad (2)$$

де  $\eta_n = \sqrt{\xi_n^2 - \beta^2}$ ,  $\Phi_n(k_n \cdot r) = J_0(k_n \cdot r) \cdot I_0(\mu_n) + J_0(\mu_n) \cdot I_0(k_n \cdot r)$ ;

$\mu_n$ -корені рівняння  $J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n) + J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) = 0$

$$\xi_n^2 = c^4 \cdot \frac{\mu_n^4}{R^4} \pm \frac{N(t) \mu_n^2}{\gamma R^2}, \quad (3)$$

$$\zeta_n = \frac{J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n)}{\mu_n \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n)}$$

Покладаючи, що датчик підданий дії термоудару амплітудою  $\Delta T$ , величина  $N(t)$  для  $\xi_n^2$  визначається з формули

$$N_r(t) = \frac{-E\lambda_n}{1-\nu} \frac{1}{R} \int_0^R \int_0^l T(r, z, t) dz dr \quad (4)$$

де  $\lambda_n$  - коефіцієнт лінійного розширення матеріалу мембрани;  $T(r, z, t)$  - характер температурного поля у мембрані.

Відомо, що температурне поле в круглій пластинці (мембрані)  $T(r, z, t)$  при термоударі по зовнішній (контактній) поверхні і і при теплообміні на внутрішній і боковій поверхнях за законом Ньютона описується рівнянням [13]:

$$T(r, z, t) = T_n + T_{\text{дин}}(r, z, t) + T_{\text{уст}}(r, z) \quad (5)$$

де,  $T_n$  - початкова температура пластинки;

$$T_{\text{дин}}(r, z, t) = -\frac{4\Delta T \cdot h_2}{R} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Xi_1(z, \beta_m) \cdot e^{-\chi(\alpha_n^2 + \beta_m^2)t} \cdot \beta_m \cdot \Xi(r, \alpha_n)}{(\alpha_n^2 + \beta_m^2) \cdot \Xi_3(\beta_m)} \quad (6)$$

- перехідна, або динамічна складова;

$$T_{\text{уст}}(r, z) = \frac{2\Delta T \cdot h_2}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n \cdot ch(\alpha_n \cdot (l-z)) + h_1 \cdot sh(\alpha_n \cdot (l-z))}{\alpha_n \cdot ch(\alpha_n \cdot l) + h_1 \cdot sh(\alpha_n \cdot l)} \cdot \Xi(r, \alpha_n) \quad (7)$$

-усталена складова;

$h_1, h_2$  - нормовані коефіцієнти теплообміну на внутрішній і боковій поверхнях;

$\beta_m$  - корені рівняння  $ctg\beta_m l = -\frac{h_1}{\beta_m}$ ,  $\alpha_n$  корені рівняння

$$\alpha_n J_1(\alpha_n R) - h_2 J_0(\alpha_n R) = 0$$

$$\Xi(r, \alpha_n) = \frac{J_0(\alpha_n r)}{(h_2^2 + \alpha_n^2) \cdot J_0(\alpha_n R)}, \quad (8)$$

$$\Xi_1(z, \beta_m) = \beta_m \cdot \cos(\beta_m \cdot (l-z)) + h_1 \cdot \sin(\beta_m \cdot (l-z)), \quad (9)$$

$$\Xi_3(\beta_m) = \beta_m \cdot l \cdot \sin(\beta_m \cdot l) - (1 + h_1 l) \cdot \cos(\beta_m \cdot l), \quad (10)$$

Маючи ту чи іншу схему включення тензорезисторів і виходячи з (2) отримуємо вихідний сигнал датчика тиску

$$W(t) = k_e \cdot k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0 \cdot (t - \tau)) d\tau \quad (11)$$

$k$  - статичний коефіцієнт перетворення;  $k_e$  - коефіцієнт перетворення електричної схеми в яку включені тензорезистори.

Покладаючи у (2)  $p(\tau) = p_0 = const$ , отримуємо перехідну характеристику датчика

$$W(t) = p_0 \cdot k_e \cdot k \cdot \left[ \frac{\eta_n - e^{-\beta t} (\eta_0 \cdot \cos \eta_0 t + \beta \sin \eta_0 t)}{\eta_0^2 + \beta^2} \right], \quad (12)$$

Виходячи з (12), на рис.2 показана перехідна характеристика мембрани при нормальних умовах (тобто при  $N(t) = 0$ ), а на рис.3 показана перехідна характеристика мембрани при дії термоудару.

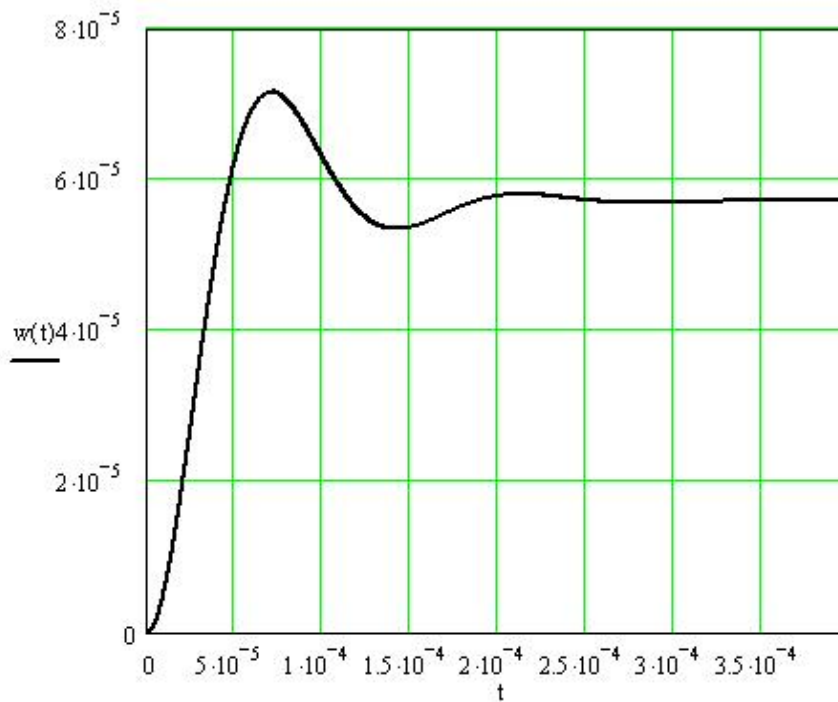


Рис.2. Перехідна характеристика мембрани при нормальних умовах

Отже, різниця між перехідною характеристикою датчика за умов термоудару і перехідною характеристикою за нормальних умов становить

$$\Delta(t, T^0) = W_2(t, T^0) - W(t) \quad (13)$$

Отримана різниця буде так званою перехідною характеристикою температурної похибки.

На рис.4 показана розрахована згідно (13) перехідна характеристика температурної похибки мембрани.

Диференціюючи (13) по  $t$  отримуємо

$$g(t, T^0) = \frac{\partial}{\partial t} \Delta(t, T^0) \quad (14)$$

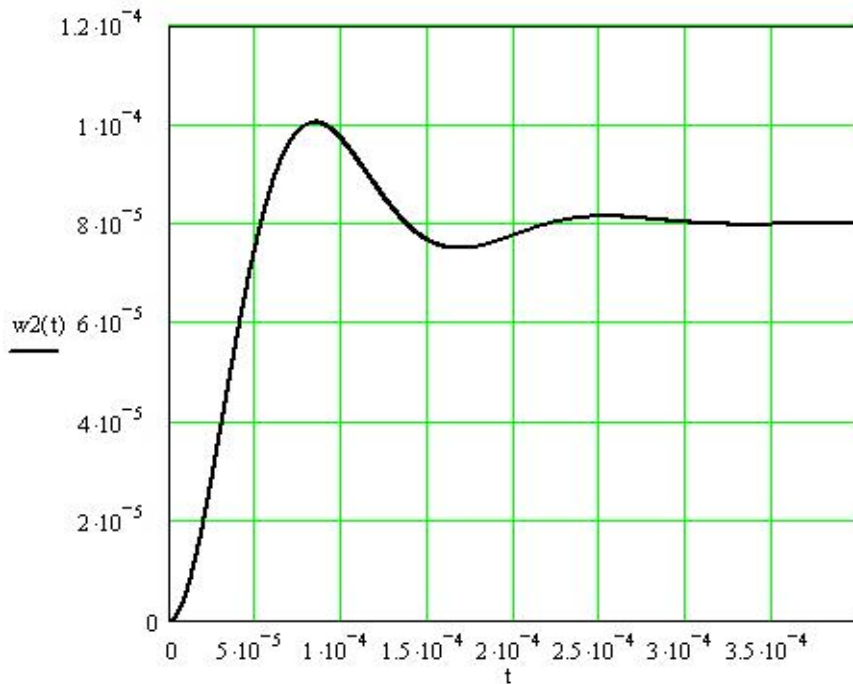


Рис.3. Перехідна характеристика мембрани при дії термоудару

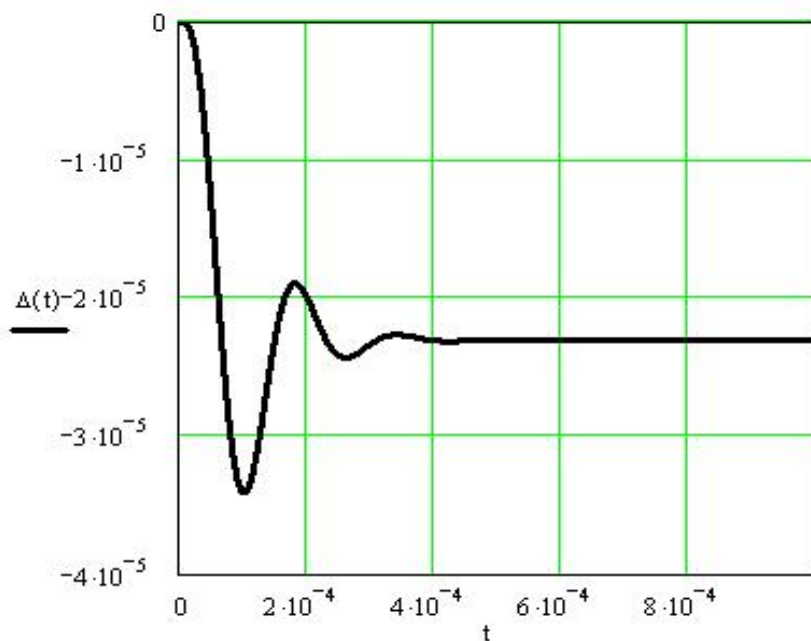


Рис.4. Перехідна характеристика температурної похибки мембрани

Формула (14) є імпульсною перехідною характеристикою температурної похибки (рис.5). У [13] показано, що характер температурного поля у мембрані, при всіх інших однакових умовах, залежить тільки від перепаду температури на зовнішній і внутрішній стороні мембрани. Тому, маючи імпульсну перехідну

характеристику температурної похибки і вимірюючи згадану різницю температури, можемо отримувати температурну похибку при будь-якому характері термовпливу

$$\Delta^0(t) = \int_0^t g(t, T^0) \Delta T(t) dt \quad (15)$$

Тому вираз, що описуватиме сигнал температурної похибки (при використанні радіально розташованих тензорезисторів) є таким

$$W^0(t, T^0) = k_e \cdot k \cdot \frac{2\Delta_0(t)}{R^2} \left( 3 \frac{r^2}{R^2} - 1 \right) \quad (16)$$

де  $r$  - координата розташування тензорезистора;  $k$  - статичний коефіцієнт перетворення;  $k_e$  - коефіцієнт перетворення електричної схеми, в яку включені тензорезистори.

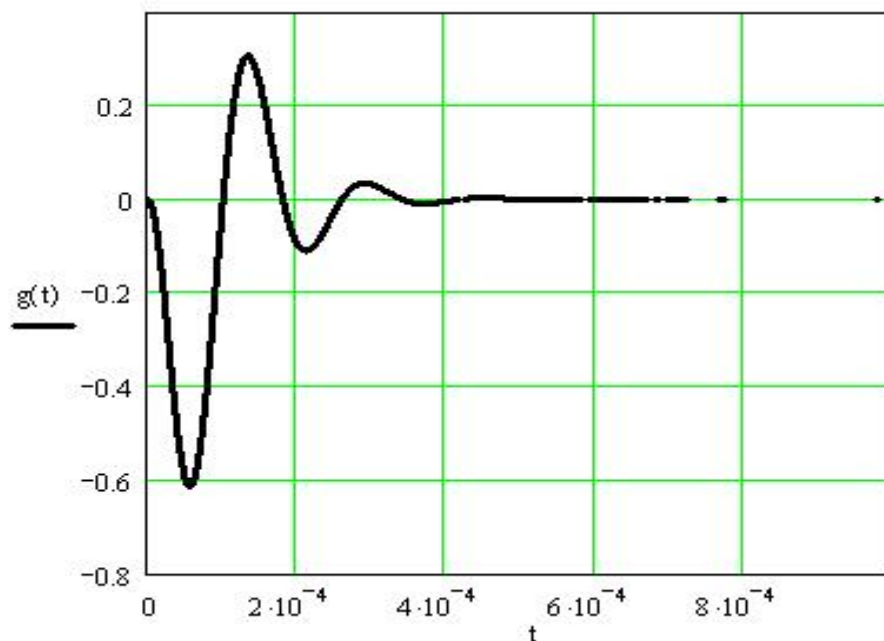


Рис.5. Імпульсна перехідна характеристика температурної похибки мембрани

Після цього можна здійснити корекцію вимірювального сигналу на значення температурної похибки.

Використовуючи обернену процедуру згідно статичної характеристики датчика отримуємо значення “паразитного” сигналу в розмірності вимірюваної величини

$$p^0(t, T^0) = f^{-1}(W^0(t, T^0)) \quad (17)$$

Саме на таке значення повинен корегуватися вихідний сигнал датчика

Для втілення запропонованого способу необхідно забезпечити вимірювання різниці температур з обох сторін мембрани. Отже, принципова схема вимірювача тиску в умовах нестационарних температур який реалізує запропо-

нований спосіб ґрунтується на сумісному вимірюванні тиску і температури і математичній обробці вимірювального сигналу. Така схема подана на рис.6.

Вимірювач містить корпус 4, мембрану 1, яка жорстко зацемлена у нижній частині корпусу 4, тензорезистори 2, які розташовані на мембрані 1 і термочутливі елементи 3, які розташовані на зовнішній і внутрішній площинах мембрани 1. При вимірюванні тиску середовища з нестационарною температурою термочутливі елементи 3 вимірюють різницю температур на зовнішній та внутрішній площинах мембрани і, далі, відповідно до цієї різниці здійснюється корекція вихідного сигналу вимірювача згідно залежності (17).

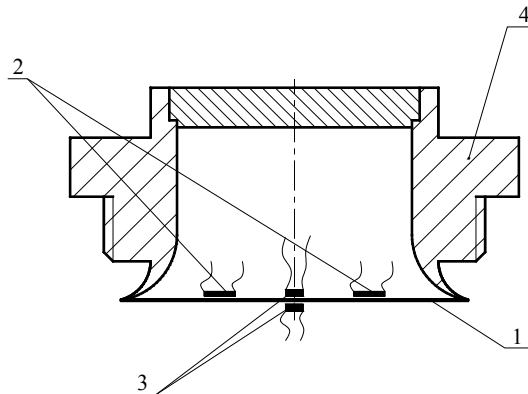


Рис.6. Принципова схема вимірювача тиску в умовах нестационарних температур з сумісним вимірюванням тиску і температури

### **Висновки**

При розробці способу вимірювання тиску в умовах нестационарних температур покладалося, що саме вплив температури на динаміку мембрани вимірювача тиску є первинною причиною температурної похибки. Проте зрозуміло, що в цілому також необхідно здійснювати заходи щодо термокомпенсації тензорезисторів.

Для реалізації способу необхідно отримувати перехідну характеристику температурної похибки вимірювача тиску. Таке передбачатиме наявність спеціальної і відповідним чином атестованої апаратури для створення термоудару, що саме по собі є серйозною технічною задачею.

Крім цього, пропонований вимірювач тиску для реалізації способу фактично представляє собою суміщений прилад, котрий вимірює дві величини - тиск і температуру з відповідною математичною обробкою сигналів. Очевидно, що таке потребуватиме відповідного метрологічного забезпечення процедури вимірювання і, звичайно, відповідної вторинної апаратури.

### **Література**

- 1.Маркелов И.Г. Комплекс датчиков давления для эксплуатации на объектах атомной энергетики. *Sensors & Systems*, 2000, № 11 – 12, с. 24 – 25.
- 2.Мокров Е.А. НИИ физических измерений. 45 лет в космическом приборостроении. Датчики и системы. № 9.2005. с.2-3.

3. Мокров Е.А., Белозубов Е.М. Базовая системная модель нового поколения тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления для ракетной и авиационной техники. Датчики и системы. № 6.2005. с. 10-14.
4. Пашенко В.В. Компенсация аддитивной температурной погрешности тензодатчика с помощью дополнительного сигнала. Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза, Пенз. политехн. ин-т, 1981, вып. 1, с. 129 – 133.
5. Фильчиков В. А., Исаков С. А., Пашенко В. В., Маланин В. П. Нормирующие преобразователи тензорезисторных датчиков с коррекцией температурных погрешностей. Радиотехника, 1995, №10, с.32-34.
6. Богонин Б.В., Богонин М.Б. Способ термостабилизации дифференциального датчика и kostenного определения температуры окружающей среды. Датчики и системы № 2, 2004, с.22-24.
7. Левцов В.И., Королев А.И., Савостина Т.И., Якушев В.М. Схемная термокомпесация тензорезисторных преобразователей давления. Измерительная техника, №5, 1989, с. 22-24.
8. Тихоненков Е.В., Мишин В.А. Схемная минимизация аддитивной температурной погрешности тензорезисторных датчиков давления с мостовой измерительной цепью. Датчики и системы, № 3.2006. ст. 14-17.
9. Диденко В.И., Минин А.Г. Датчики температуры и давления со встроенным микропроцессором. Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления («Датчик-98»). Сборник материалов X научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Т.1, Москва-Гурзуф, 1998, с. 178-180.
10. Диденко В.И., Заргарьян К.Р. Комбинированный двухпроводный аналоговый датчик давления и температуры. Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления («Датчик-2004»). Материалы XVI международной научно-технической конференции. Москва-Судак, 2004, с.142-143.
11. Седых Н.К., Родин В.А., Седых Н.Н, Сумин В.И. Первичные преобразователи на монокристаллах кремния для измерения двух параметров. Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления («Датчик-2004»). Материалы XVI международной научно-технической конференции. Москва-Судак, 2004, с.195-196.
12. Козырев Г.И., Жучков А.И., Ефремов О.Н. Двухканальные тензометрические датчики с коррекцией температурной погрешности с помощью микропроцессоров. Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1988. – Вып. 8. – С. 90 – 95.
13. Тихан М.А. Тензометрические датчики переменного давления для систем автоматики с нестационарными термовлияниями. Автореф. диссер. на соискание ученой степени канд. техн. наук.-Пенза, 1995г., -18 с.

<p>Тихан М.А. <b>Способ измерения давления в условиях нестационарных температур.</b> Предложен способ измерения давления в условиях нестационарных температур, который дает возможность быстродействующую коррекцию температурной погрешности датчика давления.</p>	<p>Tykhan M.O. <b>The method of pressure measurement under nonstationary temperatures.</b> The method of pressure measurement under nonstationary temperatures, which give a possibility compensation of pressure sensors temperatures error in real time has been proposed.</p>
---	--

*Надійшла до редакції  
20 травня 2008 року*



УДК 681.586”31

## ВИБІР ХІМІЧНОГО СКЛАДУ МАТЕРІАЛУ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОЇ ФОЛЬГИ

*Погуляйко О.М., Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

*В роботі наведені вимоги до механічних та електричних параметрів тензорезистивної фольги. Описані експериментальні дослідження метрологічних властивостей фольгових тензорезисторів, чутливі елементи яких були виготовлені з різних сплавів. За результатами досліджень проведена оптимізація хімічного складу тензорезистивної фольги*

### **Вступ**

З усіх відомих видів тензорезисторів, що сьогодні найчастіше використовуються є наклеювані тензорезистори з чутливим елементом, який виготовлено з константової фольги. Це пояснюється тим, що вони технологічні (можна отримати практично будь-яку форму чутливого елемента), зручні у використанні, мають високі метрологічні характеристики та порівняно низьку поперечну чутливість та чутливість до впливу зовнішніх факторів (температура, тиск, вологість і т.д.).

З розширенням сфери застосування тензорезисторів і підвищенням вимог до їх метрологічних та експлуатаційних характеристик суттєво зросли вимоги до матеріалів, з яких вони виготовляються.

Так, окрім наявності тензоефекту матеріал тензометричної фольги (надалі фольги) повинен мати низьку властивостей, сукупність яких дозволяє використовувати тензоефект для перетворення деформацій.

### **Постановка задачі**

Основною вимогою, що висувається до матеріалу фольги, є те, щоб вплив робочої температури на тензочутливість і на опір тензорезистора був незначним. Це особливо важливо, оскільки відомо, що більшість металів, сплавів і напівпровідників мають велике значення температурного коефіцієнту опору (ТКО)  $\alpha$ , і приріст опору тензорезистора через вплив температури може в декілька разів перевищити приріст опору завдяки деформації.

Отже, фольга, що використовується для виготовлення термокомпенсованих фольгових тензорезисторів, повинна мати такі механічні та електричні параметри, щоб при наклеюванні на досліджуваний зразок, матеріал якого має певний коефіцієнт лінійного розширення, опір тензорезистора майже не змінювався зі зміною температури.

Температурний приріст опору наклеєного тензорезистора, залежить від температурних коефіцієнтів опору фольги і від різниці температурних коефіцієнтів розширення матеріалу тензорезистивної фольги і зразка, на який його встановлено. Отже, температурну характеристику опору можна записати у вигляді:

$$\xi_t = \int_{t_0}^t [\alpha_t + (\beta_{\partial z_t} - \beta_{\phi_t}) K_{nep}] dt,$$

де  $\alpha_t$  – поточне значення температурного коефіцієнту опору фольги;  $\beta_{\partial z_t}, \beta_{\phi_t}$  – поточне значення температурного коефіцієнту розширення матеріалу досліджуваного зразка та матеріалу фольги;  $K_{nep} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$ , – коефіцієнт перетворення деформації, або тензочутливість матеріалу фольги;  $t, t_0$  – початкова та кінцева температури [1].

У випадку невеликого діапазону температур, коли вважаємо, що величини  $\alpha_t, \beta_{\partial z_t}, \beta_{\phi_t}$  постійні, можна застосовувати спрощену формулу:

$$\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_t = \alpha(t - t_0) + (\beta_{\partial z} - \beta_{\phi}) K_{nep} (t - t_0),$$

де  $\alpha, \beta_{\partial z}, \beta_{\phi}$  – середні значення температурних коефіцієнтів опору і розширення у заданому діапазоні температур.

Отже, тензорезистор не буде змінювати свій опір при зміні температури, тобто буде повністю скомпенсований, якщо

$$\int_{t_0}^t \alpha_t dt = - \int_{t_0}^t (\beta_{\partial z_t} - \beta_{\phi_t}) K_{nep} dt$$

або якщо для спрощення брати середні значення коефіцієнтів:

$$\alpha = -(\beta_{\partial z} - \beta_{\phi}) K_{nep}$$

Таким чином, оптимізація температурної характеристики опору фольги, в заданому діапазоні температур, досягається зміною температурного коефіцієнту опору (ТКО), так, щоб він дорівнював різниці температурних коефіцієнтів розширення матеріалів досліджуваного зразка  $\beta_{\partial z}$  та фольги тензорезистора  $\beta_{\phi}$  помноженій на тензочутливість фольги  $K_{nep}$ .

Оскільки  $\alpha$  - це температурний коефіцієнт зміни питомого опору  $\rho$ , то для розгляду впливу температури на тензоефект питомий опір слід представити у вигляді двох складових

$$\rho = \rho_0 + \rho_i(t),$$

де  $\rho_0$  – залишковий опір, що не залежить від температури (визначається ступенем чистоти і напруженості матеріалу та вказує на розсіяння на домішках і дефектах, які спотворюють період кристалічної решітки);  $\rho_i(t)$  – ідеальний опір, який залежить від температури (визначається розсіянням за рахунок теплових коливань атомів решітки). Отже, вводячи домішки в чисті метали, ми спотворюємо кристалічну решітку і сковуємо вільні коливання атомів. При цьому збільшується залишковий опір і зменшується ступінь впливу ідеального опору  $\rho_i(t)$ , таким чином, зменшується вплив температури на тензочутливість.

В чистих металах  $\rho_0$  в основному визначається розсіянням за рахунок теплових коливань атомів решітки, тобто складовою  $\rho_i(t)$ , яка є залежною від температури. Тому, не дивлячись на більш високе, ніж у сплавів значення тензочувливості  $K_{пер}$ , чисті метали рідко застосовуються в тензометрії.

Введення домішок збільшує  $\rho_0$  і  $\rho$ . При цьому  $\alpha$  зменшується, так як  $\rho_0$  практично не залежить від температури. Тензоефект за рахунок  $\rho_0$  і  $\rho_i(t)$  має різний знак, збільшення  $\rho_0$  може призвести до помітного зменшення  $K_{пер}$ . Отже, необхідно підбирати такий хімічний склад матеріалу фольги, щоб тензочувливість була якомога більшою при мінімальному впливі температури на зміну опору [4].

Враховуючи останнє, найбільш використовуваним матеріалом для виготовлення тензометричної фольги є константан (Cu-Ni-Mn-Fe), який являє собою мідно-нікелевий сплав з домішками заліза Fe та марганцю Mn. Але задача встановлення залежності ТКО фольги з константанових сплавів від їх хімічних складів і досі не була вирішена. Слід відмітити, що інформації в цій галузі дуже мало, а існуючі окремі відомості [2; 3] носять відривчастий і зазвичай суперечливий характер, що не дозволяє використовувати їх в практичних цілях. Саме з цих причин в науково-дослідній лабораторії ТОВ «ВЕДА» (провідного виробника тензорезисторів в СНД) були проведені дослідження по встановленню залежності ТКО фольги зі сплавів системи Cu-Ni-Mn-Fe, від вмісту основних легуючих компонентів Mn і Fe.

### **Оптимізація хімічного складу фольги**

В якості вихідних об'єктів дослідження були обрані різні варіанти сплавів типу константан, в яких при постійному співвідношенні  $\%Cu/\%Ni = 1,5 (\approx 40\%Ni)$  встановлювалися приблизні границі варіювання для заліза 0...0,6% і марганцю 0...2,4%.

У першому наближенні залежність ТКО від хімічного складу досліджуваних сплавів можна апроксимувати рівнянням другого порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (1)$$

де  $y$  - температурний коефіцієнт опору (ТКО),  $1/^\circ C^0$ ;

$x_1$  - вміст заліза в сплаві, %;

$x_2$  - вміст марганцю в сплаві, %;

$b_0$  - натуральні коефіцієнти при змінних  $x_j$ .

Для побудови залежності типу (1) були використані симплекс-решітчасті плани організації експерименту, в яких для побудови заданого рівняння експериментальні точки розташовуються симетрично по симплексу на рівновіддалених рівнях:  $(x_1, x_2)_j = (0.3, 0); (0.6, 0); (1.2, 0); (1.2, 0.3); (0, 2.4); (0.3, 2.4)$ .

Однак, більшість експериментальних точок в симплекс-решітчастих планах розташовуються в основному на периферії симплекса, де вміст одного з компо-

ментів дорівнює нулю. Крім того, існують певні складності з реалізацією точного хімічного складу. Тому було прийнято рішення збільшити кількість плавок від 6 до 9 і проводити більшу кількість дослідів всередині симплексу с сумішами, що містять обидва легуючі компоненти.

Було зроблено 9 сплавів, з яких було прокатано фольги товщиною 0,005мм, після чого їх було термооброблено при 220<sup>0</sup>С, щоб зняти внутрішні напруження. З кожного варіанту хімічного складу фольги були виготовлені по 10 тензорезисторів, на яких по 10-ти вимірам були отримані середні значення ТКО ( $\bar{y}$ ) і середньоквадратичні відхилення ( $\Delta$ ). Значення варійованих факторів і результати вимірювань наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

№ п/п	$x_1$	$x_2$	$\bar{y}$	$\Delta$
	Fe, %	Mn, %	ТКО, 10 <sup>-6</sup> , °C <sup>-1</sup>	СКВ, 10 <sup>-6</sup> , °C <sup>-1</sup>
1	0,29	0,01	-71,2	0,68
2	0,63	0,03	-29,2	1,52
3	0,02	1,18	-47,6	0,38
4	0,32	1,21	15,4	0,53
5	0,03	2,41	-19,1	0,44
6	0,28	2,52	-52,4	1,01
7	0,34	1,35	-10,7	1,58
8	0,23	0,81	-47,0	0,47
9	0,39	1,54	9,2	0,33

Розрахунок оцінок невідомих коефіцієнтів  $b_j$  рівняння (1) проводився за методом найменших квадратів, з умови мінімуму суми квадратів відхилень  $Q_{зал}$  розрахункових  $\mathcal{F}$  і експериментальних  $\bar{y}$  значень ТКО:

$$Q_{зал} = \sum_{i=1}^N (\mathcal{F}_i - \bar{y}_i)^2.$$

Після проведення розрахунків залежність ТКО фольги від вмісту марганцю та заліза була отримана у наступному вигляді:

$$y = -79,63 + 158,65x_1 + 69,98x_2 - 23,02x_1x_2 + 9,35x_2^2.$$

Аналіз отриманої залежності показує, що в досліджуваному діапазоні зміни вмісту марганцю та заліза існує багато варіантів сплавів, що забезпечують той чи інший рівень ТКО. Сюди відносяться як чотирьохкомпонентні сплави системи Cu-Ni-Mn-Fe, що знаходяться всередині симплексної області, так і трьохкомпонентні сплави системи Cu-Ni-Mn або Cu-Ni-Fe, що знаходяться на границях симплексу.

Залежність ТКО від вмісту заліза має практично лінійний характер при різному одночасному вмісті марганцю в сплаві, при цьому зі збільшенням вмісту марганцю інтенсивність цієї залежності дещо знижується. В той самий час за-

лежність ТКО від вмісту марганцю в сплаві в загальному випадку має дещо нелінійний характер, при чому зі збільшенням вмісту заліза нелінійність збільшується.

З отриманих результатів досліджень випливає, що зі збільшенням вмісту в сплаві як марганцю, так і заліза має місце приріст значень ТКО. В той самий час необхідно особливо відмітити, що інтенсивність впливу на ТКО вмісту заліза в сплаві в 3-4 рази вища у порівнянні з аналогічним впливом вмісту марганцю. Так, наприклад, різниця у вмісті заліза на 0,1% супроводжується суттєвою відмінністю в ТКО фольги  $(12...17) \cdot 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$ . Ця різниця по суті перевищує допуск по ТКО фольги, що належить до певного цільового призначення. В той самий час аналогічне відхилення у вмісті марганцю на 0,1% призводить до різниці в ТКО лише на величину  $(3...5) \cdot 10^{-6}, ^\circ C^{-1}$ .

Оскільки в реальних промислових умовах виплавки константанових сплавів можливе в тій чи іншій мірі неспівпадіння у вмісті заліза та марганцю, у порівнянні з заданими, і оскільки рівень впливу на ТКО концентрації марганцю суттєво нижчий, оптимальним варіантом було обране використання для тензорезистивної фольги сплавів системи Cu-Ni-Mn.

На рис.1 представлена отримана експериментальна залежність ТКО фольги від вмісту марганцю в трьохкомпонентних сплавах системи Cu-Ni-Mn ( $\%Cu/\%Ni = 1,5 (\approx 40\%Ni)$ ), в яких залізо присутнє в вигляді домішки у концентрації, що не перевищує 0,02...0,03%.

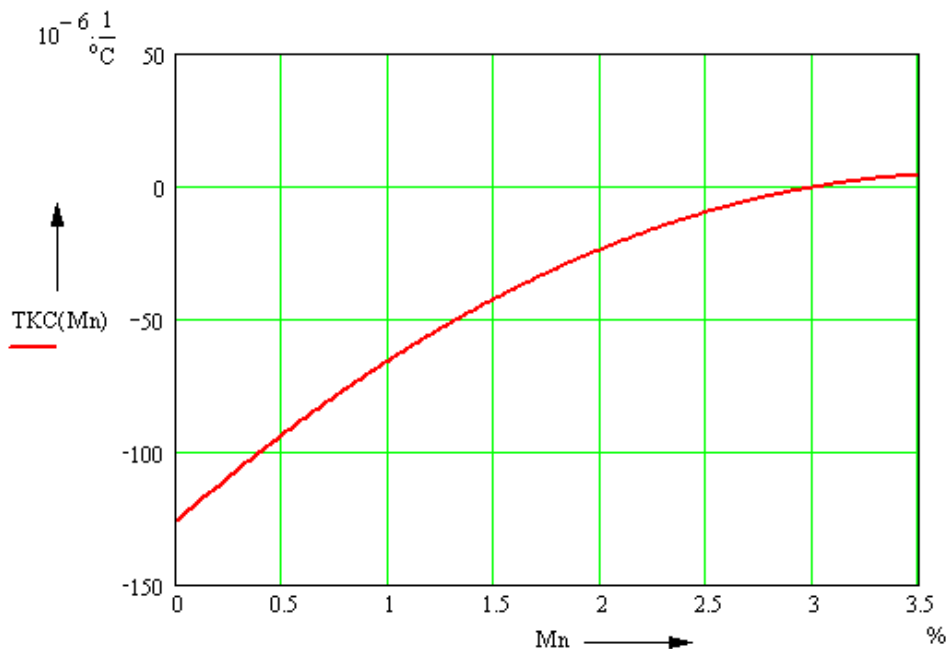


Рисунок.1 Залежність ТКО сплавів системи Cu-Ni-Mn від вмісту Mn.

### **Висновки**

Оскільки в реальних промислових умовах досить важко витримати точні пропорції сплаву, а вплив такого компоненту як залізо на ТКО є досить великим, то для отримання точного значення ТКО готової фольги більш доцільно використовувати трьохкомпонентний сплав, що містить залізо лише як незначний домішок.

За результатами досліджень (рис. 1) трьохкомпонентні сплави системи Cu-Ni-Mn можуть забезпечити будь-який необхідний рівень ТКО. При цьому регулювання ТКО в залежності від конкретного призначення фольги можна здійснювати лише змістом марганцю. Отже, область подальших досліджень можна звужити від чотирьохкомпонентної до трьохкомпонентної системи і регулювати ТКО константаною тензометричної фольги лише співвідношенням вмістів нікелю, міді та марганцю.

### **Література.**

1. Клокова Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.: ил.
2. Hoffman K. Zur Herstellung moderner Folien – Dehnungesmesstreifen und den dabei gegebenen Korrekturmöglichkeiten für Kriechen und Querempfindlichkeit//Messtechnische Briefe, 1986.
3. Молдавский О.Д. Электрошлаковый переплав тяжелых цветных металлов. М., Metallургия, 1980. – 200 с.
4. Тисенко Н.Г., Боркунский В.А. Микропроволока термокомпенсированных тензодатчиков. М., Машиностроение, 1968. – 148 с.

<p><b>Погуляйко А.Н. Выбор химического состава материала тензорезистивной фольги</b></p>	<p><b>Poguliaiko O.M. The choice of strain sensitive foil's chemical composition</b></p>
<p>В работе приводятся требования, к механическим и электрическим параметрам тензорезистивной фольги. Описаны экспериментальные исследования метрологических свойств фольговых тензорезисторов, чувствительные элементы которых были изготовлены из разных сплавов. По результатам исследований была проведена оптимизация химического состава тензорезистивной фольги.</p>	<p>In this paper the requirements for mechanic and electrical parameters of strain sensitive foil are considered. Experimental researches of metrological characteristics of foil strain gages sensitive element of which is produced of different alloys are described. The optimization of strain sensitive foil's chemical composition is provided due to the researcher's results.</p>

*Надійшла до редакції  
25 березня 2008 року*