

А. Л. Передерко, к.т.н.

e-mail: pal88@ukr.net

Одеська державна академія технічного регулювання та якості,  
вул. Кузнечна, 15, м. Одеса, 65020, Україна

## КОРЕКЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ НА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

*У статті розглянуто можливість компенсації неінформативної складової у вимірюваному сигналі, отриманому за допомогою п'єзоелектричного акселерометра при вимірюванні вібраційного прискорення. Ця неінформативна складова у вимірюваному сигналі являє собою постійний рівень, який викликаний генерацією п'єзоелектричним елементом акселерометра додаткового заряду за відсутності дії на нього з блоку об'єкта вимірювань. Зазначений додатковий заряд генерується під впливом флуктуацій температури середовища. Ці температурні флуктуації вносять свою негативну складову в точність акселерометра, збільшуючи похибку результату вимірювань. Чим більшими є їх діапазон коливань по температурі та швидкість зміни температури в часі, тим отримуємо більший вплив на результати вимірювань. Оскільки зміни температури в часі порівняно з частотою вимірюваних вібрацій є процесами значно повільнішими і їх вплив на результат вимірювання є сталим в усьому динамічному діапазоні акселерометра, то вони являють собою адитивну складову похибки цих вимірювань. Для зменшення температурного впливу середовища запропоновано рішення щодо удосконалення п'єзоелектричного акселерометра шляхом введення в його конструкцію елемента компенсації. З метою зменшення впливу температурних флуктуацій середовища на результати вимірювання як елемент компенсації застосовано керований п'єзоелектричний елемент, який працює на зворотному п'єзоелефекті уздовж осі поляризації. Керування елементом компенсації здійснюється системою автоматичного регулювання, яка працює за принципом регулювання за відхиленням.*

**Ключові слова:** акселерометр, прискорення, п'єзоелемент, фазовий фільтр, система автоматичного регулювання.

**Вступ.** В технічних системах при вимірюванні механічних величин особливе місце займають вимірювання таких параметрів, як прискорення, швидкість, переміщення, вібрації. При проведенні вимірювання основною ланкою вимірювальної системи є первинний перетворювач – аналоговий прилад або пристрій, побудований на основі реалізації певних фізичних властивостей і здатний перетворювати вплив з боку вимірюваного параметра у прийнятний для обробки та реєстрації вид. Первинним перетворювачам притаманні вади, які не дають забезпечити необхідну лінійність, точність, стабільність у часі при вимірюванні. Це температурні впливи, вібраційні та електромагнітні завади, кліматичні впливи середовища [3].

П'єзоелектричні акселерометри є найпоширенішими нині приладами, які використовуються для вимірювання прискорень і вібрацій, що пояснюється, перш за все, простотою конструкції, широким частотним і динамічним діапазонами, міцністю, надійністю і стабільністю параметрів цих приладів. Роботи по їх вдосконаленню для підвищення точності та достовірності вимірювань є нагальними та актуальними.

Метою роботи є удосконалення конструкції п'єзоелектричного акселерометра для зменшення похибки, викликані температурним впливом середовища, при проведенні вимірювань вібраційного прискорення.

**Метою роботи** є удосконалення конструкції п'єзоелектричного акселерометра для зменшення похибки, викликані температурним впливом середовища, при проведенні вимірювань вібраційного прискорення.

**Основна частина.** П'єзоелектричні акселерометри, які працюють за принципом прямого п'єзоелефекту: при впливі зовнішньої сили на п'єзоелемент змінюються його геометричні розміри, внаслідок чого на спеціально нанесених електродах генерується заряд, пропорційний діючій силі. Таким чином датчики на базі п'єзоелементів не потребують додаткових джерел живлення, а відсутність рухомих частин забезпечує довговічність і стабільність їх роботи.

Однак п'єзоелектричним акселерометрам притаманні й негативні прояви, не пов'язані з діючим на п'єзоелемент вимірюваним параметром, такі як складові електричної індукції, які виникають під дією зміни темпера-

тури та генерують на вході підсилювача паразитні сигнали. Вони створюють адитивну похибку або похибку нуля п'єзоелектричних датчиків. Особливо ця похибка проявляє себе в умовах температури середовища, що швидко змінюється, при вимірюванні параметрів низькочастотних прискорень і вібрацій.

П'єзоелемент, змінюючи свої геометричні розміри під дією температурних коливань, за відсутності впливів з боку вимірюваного параметра, генерує на своїх електродах заряд [2]. Чим більше коефіцієнт лінійного розширення п'єзоелемента відрізняється від коефіцієнтів лінійного розширення інших елементів конструкції акселерометра (рис. 1), тим більше його доменна структура буде піддаватися механічній напрузі і генерувати додатковий заряд [1]. Цей заряд є нічим іншим, як адитивною складовою похибкою вимірювання п'єзоакселерометра, яка викликана флуктуацією температури середовища.

П'єзоелемент у конструкції п'єзоелектричного акселерометра (рис. 1) встановлений з попереднім напруженням (натягом)  $F_n$ , що забезпечується затягуванням болта 5 визначеним моментом. Тоді при дії на акселерометр прискорення  $a$  зі змінним напрямом на п'єзоелемент буде діяти сила

$$F = F_n \pm F_m, \quad (1)$$

де  $F_m = ma$  – сила, з якою діє на п'єзоелемент інерційна маса  $m$  під впливом прискорення  $a$ ;

$m$  – інерційна маса;

$a$  – прискорення.

Для знакозмінного прискорення (вібраційне прискорення тощо) вираз (1) можна записати у такому вигляді:

$$F = F_n + F_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість;

$t$  – час;

$\varphi$  – початкова фаза вимірювання.

Сила  $F$ , яка змінюється за описаним законом (2), викликає генерацію п'єзоелемента заряду  $Q$ , величина якого може бути визначена з рівняння для прямого п'єзоефекта:

$$Q = d_{ij}F, \quad (3)$$

де  $d_{ij}$  – п'єзомодуль п'єзоелемента.

В нашому випадку розглядається акселерометр, який діє по одній осі –  $Z$ , а п'єзоелемент поляризований в напрямі дії сили  $F$ , тому робочим є п'єзомодуль  $d_{33}$ .

Тоді, підставивши (2) в (3), отримаємо

$$Q = d_{33}(F_n + F_m \sin(\omega t + \varphi)). \quad (4)$$

При цьому в електричному ланцюгу п'єзоелемента – вхідний каскад підсилювача – з'явиться струм  $I$ , величина якого буде визначатися виразом

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(d_{33}F_m \sin(\omega t + \varphi))}{dt}. \quad (5)$$

Приведемо рівняння (4) до вигляду

$$Q = d_{33}F_n + d_{33}F_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (6)$$

Очевидно, що при зміні температури середовища буде здійснюватися температурний вплив на доменну структуру п'єзоелемента, що приведе до зміни його геометричних розмірів. Тобто при збільшенні температури сила попереднього напруження збільшиться пропорційно збільшенню лінійних розмірів, а саме висоти п'єзоелемента  $h_0$ , на величину  $\Delta F_n(h_0)$ :

$$F_n = (F_n + \Delta F_n(h_0)). \quad (7)$$

Враховуючи (7), запишемо (6) у такому вигляді:

$$Q = d_{33}F_n + d_{33} \Delta F_n(h_0) + d_{33}F_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

Введемо такі позначення:

$$Q_0 = d_{33}F_n; \quad Q_t = d_{33} \Delta F_n(h_0); \\ Q_a = d_{33}F_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Тоді (8) буде мати вигляд

$$Q = Q_0 + Q_t + Q_a, \quad (9)$$

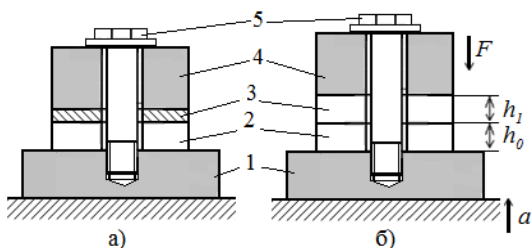
де  $Q_0$  – заряд від попереднього напруження пакета;

$Q_t$  – заряд, який залежить від температурного впливу;

$Q_a$  – заряд від дій сил, викликаних дією прискорення.

Деякою мірою нівелювати вплив температури на виникнення механічної напруги в п'єзоелементі можливо шляхом застосування в конструкції акселерометра елемента компенсації, зображеного на рис. 1, а. Елемент компенсації, конструктивно у вигляді шайби, розташований між п'єзоелементом та інерційною масою, які стягнуті в загальний пакет болтом 5. З метою зниження залежності зміни лінійних розмірів пакета від зміни температури цей елемент виконується з матеріалу, коефіціє-

єнт лінійного температурного розширення якого має протилежний знак, ніж у матеріалі п'єзоелемента.



**Рисунок 1 – Конструкція п'єзоелектричного акселерометра:** 1 – підкладка, 2 – п'єзоелемент, 3 – елемент компенсації, 4 – інерційна маса  $m$ , 5 – болт,  $h_0$  – висота п'єзоелемента,  $h_1$  – висота елемента компенсації

Таким чином, при температурних змінах механічне напруження в пакеті залишається сталим. Це рішення має уявну простоту в реалізації, але на практиці дуже важко підібрати або створити композитний матеріал з необхідним значенням коефіцієнта лінійного температурного розширення для виготовлення такого елемента компенсації під необхідну марку п'єзокераміки.

Зважаючи на викладене вище, пропонується рішення по компенсації впливу температури на п'єзоелемент шляхом застосування в конструкції акселерометра елемента компенсації 3 (рис. 1, б). Елемент компенсації – це п'єзоелемент, що працює за принципом зворотного п'єзоефекту уздовж осі поляризації (мода  $d_{33}$ ). Елементом компенсації керує система автоматичного регулювання, зображена на рис. 2, яка працює за принципом управління за відхиленням. У початковому стані при нормальних значеннях температури ( $T = 18 \dots 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ) геометричні розміри, а саме висота п'єзоелемента і висота елемента компенсації, сумарно дорівнюють  $h$ :

$$h = h_0 + h_1. \quad (10)$$

Зміна температури середовища, яка діє на п'єзоелемент акселерометра, викликає зміну його геометричних розмірів на величину  $\Delta h_0(T)$  за рахунок виникнення сили  $F(T)$  як реакції конструкції акселерометра, що веде до появи додаткового заряду та постійної складової напруги на виході вимірювального тракту. Спостерігається так зване відхилення від нуля датчика при відсутності впливу з боку вимірюваного параметра [7, 8].

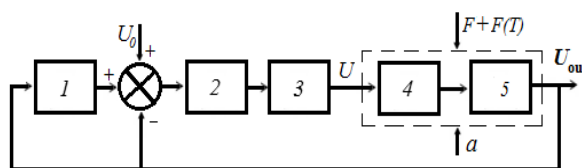
Для усунення цього ефекту система автоматичного регулювання, аналізуючи рівень постійної складової в комплексному сигналі, який надходить з п'єзоелемента, діє на елемент компенсації управління  $U$  (див. рис. 2), що призводить до зміни геометричного розміру елемента компенсації на величину  $\Delta h_1(U)$ . Таким чином, система управління виконує спостереження за виконанням умови

$$\Delta h_0(T) - \Delta h_1(U) = 0, \quad (11)$$

тоді

$$h = (h_0 + \Delta h_0(T)) + (h_1 - \Delta h_1(U)) \quad (12)$$

і виконується умова:  $h = const$ .



**Рисунок 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання**

Схема системи автоматичного регулювання, зображена на рис. 2, включає такі елементи:

1. Фазовий фільтр.
2. Інтегратор.
3. Підсилювач потужності.
4. П'єзоелемент-привід.
5. П'єзоелемент-датчик.

Розглянута схема здійснює регулювання за відхиленням, принцип якого полягає в наступному:

- на регулятор подається сигнал відхилення регульованої величини від заданого значення.

- регулятор за сигналом відхилення змінює регулюючу напругу  $U$  таким чином, щоб зменшити відхилення  $\Delta h_0(T)$ .

Необхідно відзначити, що зазначений регулятор змінює регулюючу дію незалежно від причини, що викликала помилку регулювання, і оцінює помилку за рівнем постійної складової в комплексному сигналі. Тому додатково введено корекцію по постійній складовій у вигляді  $U_0$ . Це постійна складова сигналу акселерометра при нормальних значеннях температури притаманна реакції п'єзоелемента на дію сили  $F_n$ .

Повністю помилка регулювання в цій системі принципово не усувається, тому що

регулюючий вплив формується тільки помилкою. Помилка буде тим ближче наблизитися до нульового значення, чим точніше буде реалізована схема порівняння.

Схема працює в такий спосіб: при підвищенні температури середовища змінюються геометричні розміри п'єзоелемента-датчика 5 (рис. 2), що веде до зростання значення постійної складової у вихідному сигналі. Вихідний сигнал надходить на один вхід суматора напряму, а на другий вхід суматора – через фазовий фільтр, який затримує його на  $180^\circ$ . Після суматора постійна складова потрапляє на інтегратор з часом інтегрування, порівняним зі швидкістю зміни температури. Підсилювач потужності 3 керує п'єзоелементом-приводом 4, прикладаючи до його електродів напругу  $U$ , полярність якої спрямована протилежно полярності поляризації. П'єзоелемент-привід, відпрацьовуючи керуючий вплив, зменшує свій розмір по висоті і наближається до виконання вимог рівняння (1).

**Висновок.** Запропонований метод корекції генерації паразитного заряду, який виникає при змінах температури і є адитивною складовою похибки при вимірюванні прискорення, є актуальним. Він дає можливість підвищити точність вимірювань, виконуваних за допомогою п'єзоелектричних акселерометрів, і розширити їх сферу застосування стосовно вимог до температури середовища при проведенні вимірювань прискорень та вібрацій.

### Список літератури

1. Антоненко А. М., Кудзин А. Ю., Гавшин М. Г. Влияние доменной структуры на электромеханические свойства сегнетокерамики ЦТС и МНВТ. *Физика твердого тела*. Москва: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 1997. Т. 39. № 5.
2. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 1. Физика сегнетоэлектрической керамики / А. В. Гориш, В. П. Дудкевич, М. Ф. Куприянов и др. Москва: Изд. предпр. ред. журн. «Радиотехника», 1999. 368 с.
3. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. Москва: Техносфера, 2006. 632 с.
4. Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецов Н. Н. Датчики контроля и регулирования. Москва: Машиностроение, 1965. 914 с., ил.
5. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. Москва: Машиностроение, 1979. 480 с., ил.
6. Острём К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ; пер. с англ. Москва: Мир, 1987. 480 с., ил.
7. Dorf R., Bishop P. Современные системы управления; пер. с англ. Москва: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с., ил.
8. Ким Д. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 220 с., ил.

### References

1. Antonenko, A. M., Kudzin A. Yu., Gavshin M. G. (1997). Influence of domain structure on electromechanical properties of PZT and MNWT ferroelectric ceramics. *Fizika tverdogo tela*. Moscow: FTI im. A. F. Ioffe, vol. 39, No. 5 [in Russian].
2. Gorish, A. V., Dudkevich, V. P., Kupriyanov, M. F. et al. (1999). Piezoelectric instrument engineering, vol. 1. Physics of ferroelectric ceramics. Moscow: Izd. predpr. red. zhurn. "Radiotekhnika", 368 p. [in Russian].
3. Sharapov, V. M., Musienko, M. P., Sharapova E. V. (2006). Piezoelectric sensors. Moscow: Technosphere, 632 p. [in Russian].
4. Aheikin, D. I., Kostina, E. N., Kuznetsov, N. N. (1965). Sensors for control and regulation. Moscow: Mashinostroenie, 914 p., ill. [in Russian].
5. Osadchiy, E. P. (1979). Design of sensors for measuring mechanical quantities. In E. P. Osadchiy (Ed.). Moscow: Mashinostroenie, 480 p., ill. [in Russian].
6. Ostrom, K., Vittenmark, B. (1987). Control systems with computers. Moscow: Mir, 480 p., ill. [in Russian].
7. Dorf, R., Bishop, R. (2002). Modern management systems. Moscow: Laboratoriya Bazovyh Znanij, 832 p., ill. [in Russian].
8. Kim, D. (2003). The theory of automatic control, vol. 1. Linear systems. Moscow: FIZMATLIT, 220 p., ill. [in Russian].

A. L. Perederko, Ph.D.

e-mail: pal88@ukr.net

Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality,  
Kovalska str., 15, Odesa, 65020, Ukraine

### CORRECTION OF TEMPERATURE INFLUENCE ON A PIEZOELECTRIC ACCELEROMETER

*In the article the possibility of compensation of non-informative component in measured signal obtained with the help of a piezoelectric accelerometer in the measurement of vibration acceleration is considered. This non-informative component in measured signal represents a constant level, which is caused by the generation of additional charge by piezoelectric element of the accelerometer in the absence of action on it from the side of the measurement object. The indicated additional charge is generated under the influence of environment temperature fluctuations. These temperature fluctuations add their negative component to the precision of the accelerometer, increasing the error of the measurement result. The greater their range of fluctuations in temperature and the rate of change in temperature over time are, the greater impact on the measurement results is obtained. Since the changes in temperature over time, in comparison with the frequency of measured vibrations, are much slower processes and their impact on the measurement results is constant throughout the dynamic range of the accelerometer, they represent an additive component of the error of the measurements. To reduce the influence of environment temperature, a solution for the improvement of piezoelectric accelerometer by introducing an element of compensation into its construction is proposed. In order to reduce the influence of environment temperature fluctuations on the measurement results, a controlled piezoelectric element which operates on reverse piezoeffect along the polarization axis is used as a compensation element. The control by the compensation element is carried out by automatic regulation system, which operates on the basis of the deviation regulation principle.*

**Keywords:** accelerometer, acceleration, piezoelement, phase filter, automatic control system.