

М. П. Мусієнко, к. т. н, доц.

ДОСЛІДЖЕННЯ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ДВОМА ЛАНЦЮГАМИ ПРОСТОРОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО НЕГАТИВНОГО ЗВОРТНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Описано п'єзокерамічні перетворювачі з двома ланцюгами просторового електро механічного негативного зворотного зв'язку. Побудовано структурну схему та отримано передавальну функцію таких перетворювачів.

П'єзокерамічні перетворювачі (ПП) широко застосовуються для вимірювання різних фізичних величин (сили, тиску, параметрів вібрації, звукових полів та ін.) [1—3].

Введення просторового електро механічного негативного зворотного зв'язку (ПЕЗЗ) дозволяє підвищити точність та стабільність перетворювачів, розширити їх робочий частотний діапазон [4—6].

Електричні сигнали вводяться та знімаються з п'єзоелемента за допомогою металевих електродів, що розташовані на поверхні перетворювача (рис. 1). Проте, як видно з рис. 1, враховуючи обмежені розміри електродів, електричний сигнал зворотного зв'язку не може впливати на весь об'єм п'єзоелемента. Це знижує ефект від введення зворотного зв'язку і не дозволяє в ряді випадків досягти необхідних результатів.

Для компенсації вказаного недоліку запропоновано ввести додатковий канал просторового електро механічного негативного зворотного зв'язку.

В якості узгоджувальних підсилювачів у п'єзоперетворювачах можуть використовуватися як підсилювачі заряду, так і підсилювачі напруги, з виходу яких знімається корисний сигнал [1]. В додатковому каналі зворотного зв'язку також можуть використовуватися як підсилювачі заряду, так і напруги.

В даній роботі розглянемо п'єзоперетворювачі з двома колами ПЕЗЗ зображені на рис. 2.

Метою роботи є побудова структурної схеми та передавальних функцій таких перетворювачів. Варіанти схем ПП з двома колами ПЕЗЗ зображені на рис. 2.

П'єзоелемент поляризований так, як це показано на рис. 1. Електроди на відповідних гранях розділені на 4 частини, утворюючи 8 пар електродів. Для чотирьох пар електродів (1—1', 2—2', 3—3', 4—4') вектор поляризації \mathbf{P} направлений перпендикулярно цим електродам і підключення до них позначається на схемах перетворювачів (рис. 2) вертикальною стрілкою (\downarrow), при цьому перетворювач має властивості коливальних систем [1].

Для інших чотирьох пар електродів (5—5', 6—6', 7—7', 8—8') вектор поляризації \mathbf{P} направлений паралельно цим електродам. На схемах перетворювачів (рис. 2) підключення до цих електродів позначається горизонтальною стрілкою (\rightarrow). Таке підключення відповідає схемі доменно-дисипативного перетворювача [1, 7—9].

Слід зазначити, що на рис. 2 показані 16 варіантів перетворювачів, для яких вектор сили \mathbf{F} , що діє на п'єзоелемент, паралельний вектору поляризації \mathbf{P} . Прикладення вектора сили \mathbf{F} перпендикулярно вектору \mathbf{P} дає ще 16 варіантів перетворювачів з суттєво відмінними характеристиками. Таким чином, для даного випадку (перетворювачі з двома підсилювачами напруги) можливе створення 32(!) варіантів перетворювачів.

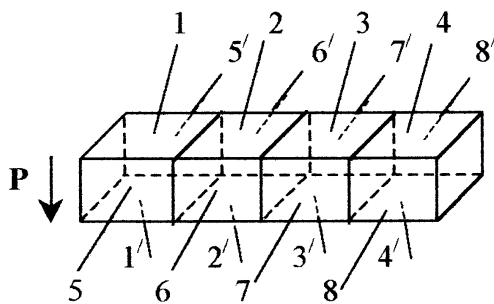


Рис. 1. П'єзокерамічний елемент:
1—1', 2—2', 3—3', 4—4' — основні електроди; 5—5', 6—6', 7—7', 8—8' — додаткові електроди

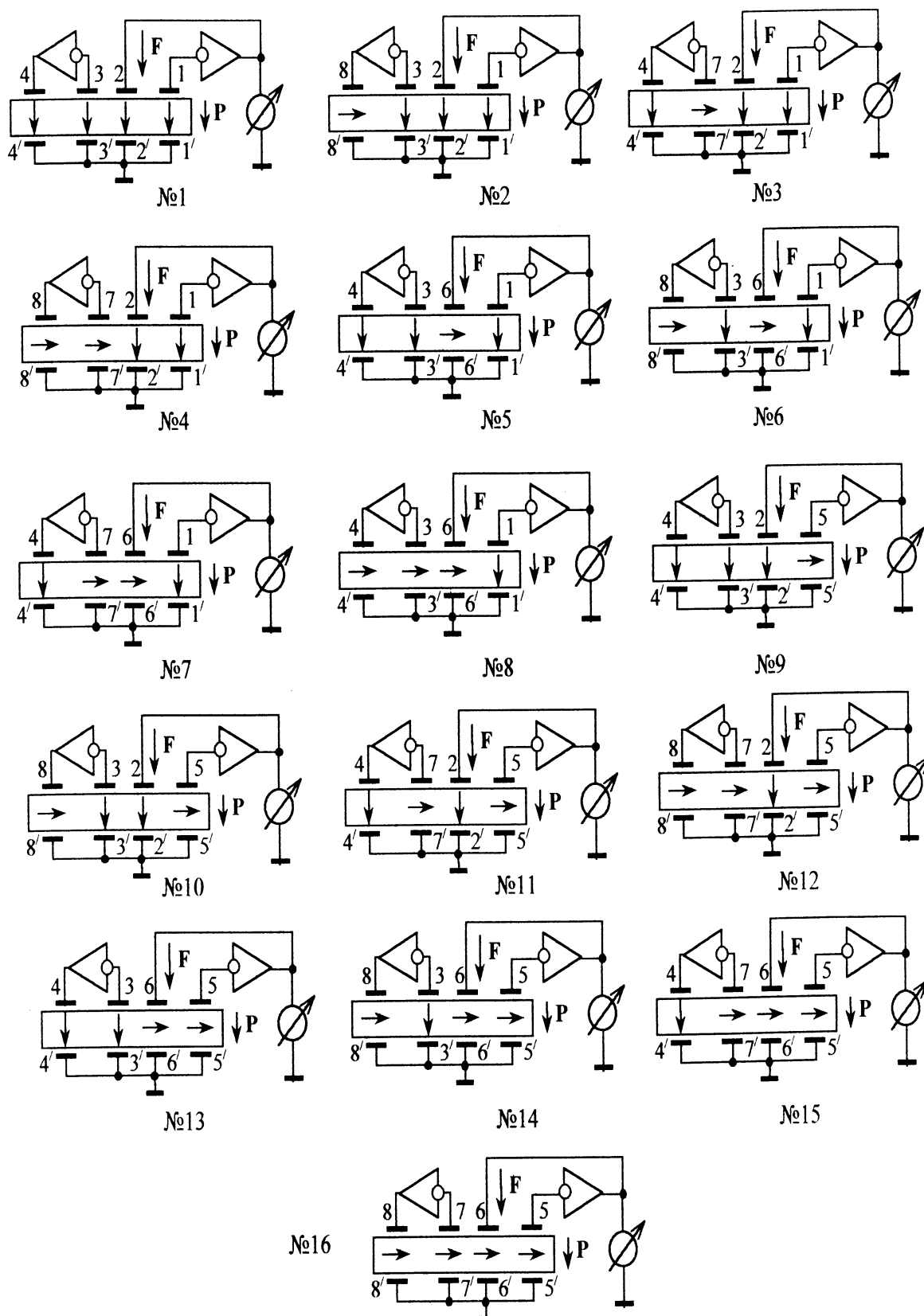


Рис. 2. Схеми п'єзоперетворювачів з двома колами ПЕЗЗ

Структурна схема перетворювачів показана на рис. 3 [10—12].

Ланки з коефіцієнтами передач k_1 та k_8 відповідають перетворенню сили F , що діє на

п'єзоелемент, в механічну напругу σ ; $\sigma = F/S$, де S — площа електрода п'єзоелемента. Таким чином, $k_1 = \sigma/F = 1/S$.

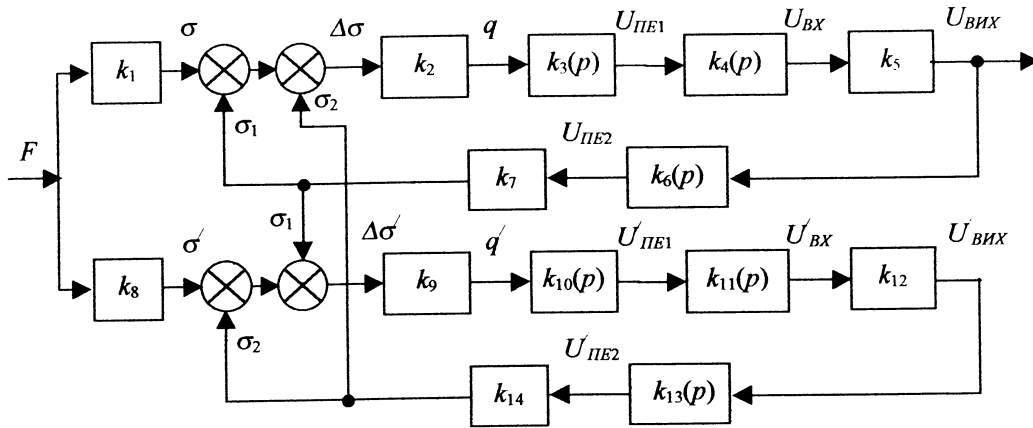


Рис. 3. Структурна схема п'єзоперетворювачів з двома колами ПЕЗЗ

Ланки k_2 та k_9 відповідають перетворенню механічної напруги в заряд q на електродах п'єзоелемента. Оскільки $q = d_{ij}\Delta\sigma S$, то $k_2 = q/\Delta\sigma = d_{ij}S$, де d_{ij} — п'єзомодуль.

Ланки $k_3(p)$ та $k_{10}(p)$ — перетворення заряду q в напругу на електродах п'єзоелемента $U_{ПЕ1}$. Передавальна функція такої ланки має вигляд [13]:

$$k_3(p) = \frac{U_{ПЕ1}}{q} = \frac{L_K C_K p^2 + R_{ПЕ} C_K p + 1}{L_K C_K C_{ПЕ} p^2 + R_{ПЕ} C_K C_{ПЕ} p + C_K + C_{ПЕ}}, \quad (1)$$

де $R_{ПЕ}$ — опір, $C_{ПЕ}$ — ємність п'єзоелемента, C_K, L_K — динамічні ємність та індуктивність п'єзоелемента, $p = j\omega$.

Ланки $k_4(p)$ та $k_{11}(p)$ відповідають процесу, що відбувається коли підключається навантаження до п'єзоелемента (передача напруги $U_{ПЕ1}$ в ланцюг — $U_{ВХ}$). Його передавальна функція відповідає передавальній функції видозміненої диференціувальної ланки [13]:

$$k_4(p) = \frac{U_{ВХ}}{U_{ПЕ1}} = \frac{\alpha L_K p^3 + \alpha R_{ПЕ} p^2 + R_{ВХ} p (C_{ПЕ} + C_K)}{\alpha L_K p^3 + (C_K L_K + \alpha R_{ПЕ}) p^2 + \beta p + 1}, \quad (2)$$

де $\alpha = C_{ПЕ} C_K R_{ВХ}$, $R_{ВХ}$ — вхідний опір підсилювача.

Ланки k_5 та k_{12} відповідають процесам підсилення підсилювачів напруги. Вони є інерційними ланками першого порядку. Проте, враховуючи роботу перетворювача у вузькому діапазоні (де існує лінійна залежність між входом та виходом — одна з необхідних вимог до будь-якої вимірювальної системи), передавальну функцію можна вважати лінійною та рівною коефіцієнту підсилення підсилювача напруги.

Процеси в ланках $k_8(p)$ та $k_{13}(p)$ зворотні процесам, яким відповідають ланки $k_4(p)$ та $k_{11}(p)$. Вони відбуваються при підведенні напруги від підсилювача напруги до електрода п'єзоелемента (передача напруги $U_{ВИХ}$ в напругу між електродами п'єзоелемента $U_{ПЕ2}$) [13]:

$$k_8(p) = \frac{U_{ПЕ2}}{U_{ВИХ}} = \frac{\alpha L_K p^3 + (C_K L_K + \alpha R_{ПЕ}) p^2 + \beta p + 1}{\alpha L_K p^3 + \alpha R_{ПЕ} p^2 + R_{ВИХ} p (C_{ПЕ} + C_K)}, \quad (3)$$

де $\alpha = C_{ПЕ} C_K R_{ВИХ}$, $R_{ВИХ}$ — вихідний опір підсилювача напруги.

Ланки $k_7(p)$ та $k_{14}(p)$ — перетворення напруг $U_{ПЕ2}$ та $U'_{ПЕ2}$ в механічні напруги σ_1 та σ_2 . Оскільки $\sigma = E d_{ij} U_{ПЕ2} / l$, то $k_7 = \sigma / U_{ПЕ2} = E d_{ij} / l$, де E — модуль Юнга, l — відстань між електродами.

Загальна передавальна функція має вигляд:

$$K(p) = k_2 k_3(p) k_4(p) k_5 \frac{k_1 + k_9 k_{10}(p) k_{11}(p) k_{12} k_{13}(p) k_{14} (k_1 - k_8)}{1 + k_9 k_{10}(p) k_{11}(p) k_{12} k_{13}(p) k_{14} + k_2 k_3(p) k_4(p) k_5 k_6(p) k_7}. \quad (4)$$

Значення параметрів для визначення ланок та загальної передавальної функції для різних варіантів схем перетворювачів подані в таблиці. В цій таблиці значенням $R_{i-i'}$, $C_{i-i'}$ відповідають значення опору і ємності між електродами $i-i'$. При цьому було враховано, що площі електродів, вхідні та вихідні опори та коефіцієнти підсилення підсилювачів напруги, а також відстані між парами електродів $i-i'$ рівні між собою.

Входи підсилювачів за варіантами схем № 1, 2, 5, 6, 11, 12, 15, 16 підключені до електродів з однаковим напрямком поляризації. Для таких перетворювачів структурна схема має простіший вигляд і показана на рис. 4.

Таблиця

Значення параметрів для розрахунку передавальних функцій

Ланка	Параметр	№ варіанта схеми перетворювача за рис. 2															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
k_2	d_{ij}	d_{31}								d_{11}							
$k_3(p)$	$R_{ПЕ}$	$R_{1-1'}$								$R_{5-5'}$							
$k_4(p)$	$C_{ПЕ}$	$C_{1-1'}$								$C_{5-5'}$							
$k_6(p)$	$R_{ПЕ}$	$R_{2-2'}$				$R_{6-6'}$				$R_{2-2'}$				$R_{6-6'}$			
	$C_{ПЕ}$	$C_{2-2'}$				$C_{6-6'}$				$C_{2-2'}$				$C_{6-6'}$			
k_7	d_{ij}	d_{31}		d_{31}		d_{11}		d_{11}		d_{31}		d_{31}		d_{11}		d_{11}	
k_9				d_{11}		d_{31}				d_{11}		d_{31}					
$k_{10}(p)$	$R_{ПЕ}$	$R_{3-3'}$		$R_{7-7'}$		$R_{3-3'}$		$R_{7-7'}$		$R_{3-3'}$		$R_{7-7'}$		$R_{3-3'}$		$R_{7-7'}$	
$k_{11}(p)$	$C_{ПЕ}$	$C_{3-3'}$		$C_{7-7'}$		$C_{3-3'}$		$C_{7-7'}$		$C_{3-3'}$		$C_{7-7'}$		$C_{3-3'}$		$C_{7-7'}$	
$k_{13}(p)$	$R_{ПЕ}$	$R_{4-4'}$	$R_{4-4'}$	$R_{4-4'}$	$R_{4-4'}$	$R_{4-4'}$	$R_{4-4'}$	$R_{4-4'}$	$R_{4-4'}$								
	$C_{ПЕ}$	$C_{4-4'}$	$C_{4-4'}$	$C_{4-4'}$	$C_{4-4'}$	$C_{4-4'}$	$C_{4-4'}$	$C_{4-4'}$	$C_{4-4'}$								
k_{14}	d_{ij}	d_{31}	d_{31}	d_{31}	d_{31}	d_{31}	d_{31}	d_{31}	d_{31}								

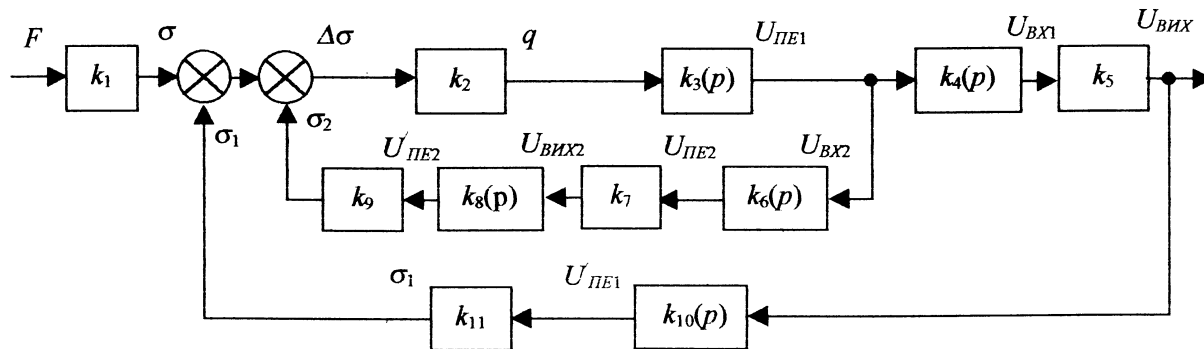


Рис. 4. Структурна схема п'єзоперетворювачів з двома колами ПЕЗЗ для варіантів схем № 1, 2, 5, 6, 11, 12, 15, 16 за рис. 2

Загальна передавальна функція для схеми рис. 4 має вигляд

$$K(p) = \frac{k_1 k_2 k_3(p) k_4(p) k_5}{1 + k_2 k_3(p) [k_6(p) k_7 k_8(p) k_9 + k_4(p) k_5 k_{10}(p) k_{11}]} \quad (5)$$

Як показали експерименти, розроблені варіанти перетворювачів мають вищу точність та стабільність параметрів, ніж перетворювачі з одним ланцюгом зворотного зв'язку.

Таким чином, в роботі описано п'єзоперетворювачі з двома колами просторового електромеханічного негативного зворотного зв'язку, побудовано і описано структурну схему цих перетворювачів, визначено передавальну функцію.

За результатами досліджень оформлено 32 заявки на патенти України.

У подальших дослідженнях доцільно вивчити варіанти перетворювачів з використанням у ко-

лах зворотних зв'язків підсилювачів заряду.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пьезоэлектрические преобразователи: Справочное пособие / Шарапов В. М. Минаев И. Г., Бондаренко Ю. Ю., Кисиль Т. Ю., Мусиенко М. П., Роттэ С. В., Чудаева И. Б. // Под ред. В. М. Шарапова. — Черкассы: ЧГТУ, 2004. — 435 с.
2. Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Спр. — спб.: Политехника, 1994. — 608с.
3. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольные пьезоэлектрические преобразователи. — Вильнюс: Минтис, 1975. — 258 с.
4. Sharapov V., Musienko M. & others. The Electromechanical Feed-Back in Piezoceramic Sensors and Transducers // 1998 IEEE International Ultrasonics Symposium. — Sendai (Japan), 1998.
5. Шарапов В. М., Лега Ю. Г., Мусиенко М. П. Электромеханическая обратная связь в пьезоэлектрических преобразователях // Вісник ЧГТУ. — 2000. — № 1. — С. 63—69.
6. Шарапов В. М., Мусиенко М. П. и др. Обратная связь в пьезоэлектрических преобразователях механических величин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1999. — № 2. — С. 64—67.
7. Шарапов В. М., Мусиенко М. П. и др. Исследование доменно-диссипативных пьезокерамических преобразователей // Вісник Черкаського державного технологічного університету. — № 2. — 2003.
8. Шарапов В. М., Мусиенко М. П. Широкоуглові доменно-диссипативні п'єзокерамічні перетворювачі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — № 6. — 2003. — С. 127—131.
9. Шарапов В. М., Балковская Ю. Ю., Мусиенко М. П. Расширение рабочего диапазона частот пьезокерамических преобразователей с обратной связью // Вісник Черкаського державного технологічного університету. — № 2. — 2002. — С. 80—83.
10. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Мусиенко М. П. Теория автоматического управления. — Черкассы: ЧГТУ, 2005. — 200 с.
11. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы: Учебное пособие для вузов. — М.: Машиностроение, 1977.
12. Островский Л. А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. — Л.: Энергия, 1971.
13. Мусиенко М. П. Полиморфные пьезокерамические преобразователи с пространственной электромеханической отрицательной обратной связью: Дис... канд. техн. наук: 05.13.05. — Одесса, ОГПУ, 2001. — 178 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 31.01.05
Рекомендована до друку 15.02.05

Мусиенко Максим Павлович — доцент кафедри приладобудування.
Черкаський державний технологічний університет.