

**КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 004.942: 621.3.537.228.1

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ
МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С ДОМЕННО-ДИССИПАТИВНИМИ
ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТАМИ В СХЕМАХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ВЕРХНИХ
ЧАСТОТ***Трембовецкая Р. В., Тычков В. В.**Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина**E-mail: rustsurr@mail.ru, tvvpanda@ukr.net*

В статье предложено эквивалентная схема преобразователя механических величин с пьезоэлементом в схеме активного фильтра верхних частот (ФВЧ) с многопетлевой обратной связью. Получен частотный коэффициент передачи преобразователей. Выполнено моделирование и исследование АЧХ пьезоэлектрических преобразователей с помощью компьютерного моделирования в пакете МС9. При этом биморфный пьезоэлемент согласно теории электромеханических аналогий представлен последовательно-параллельным колебательным RLC – контуром. Показано соответствие компьютерной и математической модели преобразователя реальному преобразователю, что подтверждается совпадением частоты и амплитуды характеристики. Полученные с помощью компьютерной модели АЧХ преобразователей соответствуют АЧХ, которые получены на основании математических моделей. Установлено, что нелинейность АЧХ и амплитудно-частотная погрешность преобразователей зависит от угла между вектором поляризации и вектором напряженности электрического поля выходного напряжения. Для преобразователей на основе модифицированных схем активных фильтров верхних частот при увеличении угла между вектором поляризации и вектором напряженности электрического поля выходного напряжения от 0 до 82° резонансный пик преобразователя амплитудно-частотная погрешность и уменьшается.

Ключевые слова: *пьезоэлектрический преобразователь, биморфный пьезоэлемент, доменно-диссипативный преобразователь, компьютерное моделирование, частотный коэффициент передачи, амплитудно-частотная характеристика.*

Введение

Пьезоэлектрические преобразователи широко используются для измерения механических величин (силы, давления, ускорения, массы, угловых скоростей, момента, деформации и т.д.) [1]. Пьезоэлектрические преобразователи достаточно широко применяются в медицинской технике, в частности, в ультразвуковых томографах, в урологии для создания мощных ультразвуковых полей, в физиотерапии для создания аэрозолей, в измерителях артериального давления, построенных по методу Короткова и т.п.

Биморфный пьезоэлемент (БПЭ) является одним из наиболее перспективных элементов, широко используемых в приборостроении и автоматике [1]. На его основе могут быть синтезированы различные преобразователи и механизмы.

Постановка задачи. Авторами в работе [1] показана возможность синтеза преобразователя механических величин с пьезоэлементами вклю-

ченными в цепи электрических фильтров. Схему преобразователя механических величин с пьезоэлементами в модифицированной схеме активного ФВЧ с многопетлевой обратной связью (ОС) [4]. Как было установлено, рабочая полоса частот и величина резонансного пика зависят от параметров элементов схемы и соотношения сопротивлений во входной цепи и цепи обратной связи. Т.е. изменением соотношения межэлектродных емкостей пьезоэлементов во входной цепи и цепи обратной связи можно управлять характеристикой преобразователя, уменьшая величину размаха резонансного пика и погрешность формы АЧХ.

Как было показано в работах [1, 3, 5] по исследованию доменно-диссипативных пьезоэлементов, располагая электроды на пьезоэлементе таким образом, чтобы вектор поля возбуждения или поля выходного сигнала создавал угол α с вектором поляризации (в пределах до 90°), можно достичь расширения рабочего диапазона частот пьезоэлектрических преобразователей. На основании этих исследований авторами в работах [3, 4]

показана возможность создания преобразователей механических величин с доменно-диссипативными пьезоэлементами, включенными в цепи электрических фильтров.

Целью денной работы является создание математической и компьютерной модели и анализ АЧХ преобразователей механических величин с доменно-диссипативными пьезоэлементами на основе модифицированных схем активных фильтров верхних частот с помощью системы моделирования и анализа электрических схем.

Результаты исследований

Как известно [2], АЧХ преобразователя с использованием традиционного биморфного пьезо-

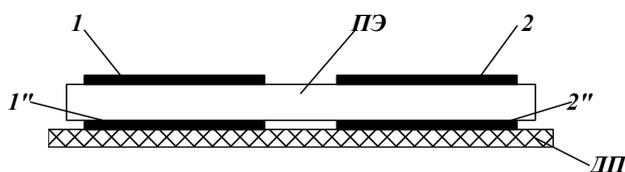


Рис. 1. Биморфный пьезопреобразователь: ПЭ - пьезоэлемент, ДП - диэлектрическая пластина [1, 5]

Каждый электрод на пьезоэлементе разделен на два полудиска, таким образом, на пьезоэлементе находится 4 электрода в виде полудисков, причем каждый электрод на нижней торцевой поверхности представляет собой проекцию электрода на верхней торцевой поверхности.

Сопротивления и емкости между электродами (1-1'), (1-2') и (1-2) приведены в [1]. Подключение электродов (1-1') соответствует известному преобразователю, который представляет собой колебательную систему с высокой добротностью. Для традиционного преобразователя характерно наличие ярко выраженного пиков на амплитудно-частотной характеристике.

При подключении к электродам (1-2') получаем схему доменно-диссипативного преобразователя с углом α между вектором поляризации и вектором напряженности поля выходного сигнала, равным 82° . Из результатов экспериментальных исследований [1] видно – активное сопротивление преобразователя растет, емкость – уменьшается, при этом колебательное звено вырождается в апериодическую цепь.

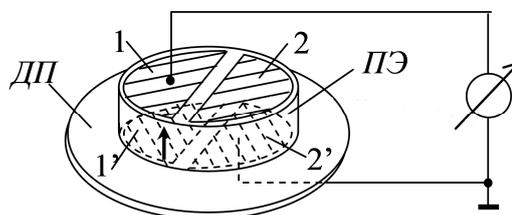
Наконец, при подключении к электродам (1-2) получаем схему доменно-диссипативного преобразователя с углом $\alpha=90^\circ$. Это дифференцирующее инерционное звено. АЧХ такого преобразователя практически линейная, а чувствительность – выросла [1, 2].

Рассмотрим, как изменится АЧХ при использовании доменно-диссипативных пьезоэлементов в преобразователе на основе модифицированной схемы активного фильтра верхних частот.

элемента имеет резонансные пики в рабочей полосе частот преобразователя.

Авторами предложены преобразователи механических величин с пьезоэлементами в схеме фильтра верхних частот [4]. В данном случае в качестве пьезоэлектрических элементов фильтра используются доменно-диссипативные пьезоэлементы [4, 5].

Используем известный доменно-диссипативный биморфный преобразователь [1], который состоит из пьезоэлемента из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 30 мм и толщиной 0,3 мм, и пластины из стеклотекстолита $\varnothing 37$ и толщиной 0,5 мм, склеенных между собой эпоксидным компаундом на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (рис. 1).



В схеме предложенного преобразователя (рис. 2), вместо традиционных биморфных пьезоэлементов используем доменно-диссипативные пьезоэлементы ZQ1, ZQ2, ZQ3 в схеме активного фильтра верхних частот [4].

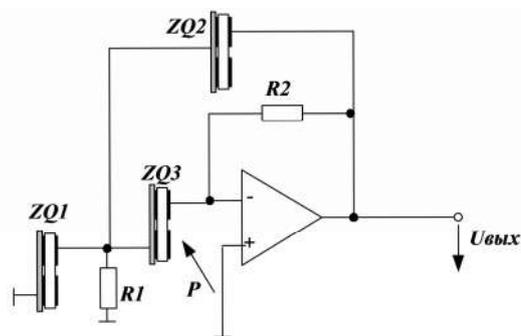


Рис. 2. Преобразователь механических величин с пьезоэлементами в модифицированной схеме активного фильтра верхних частот с многопетлевой ОС

При воздействии на пьезоэлементы механических величин (например, звукового давления P) на электродах пьезоэлементов возникает электрический заряд и электрическое напряжение, которое поступает на вход усилителя напряжения.

Для создания математической модели преобразователя, т.е. передаточной функции и АЧХ для преобразователя по схеме рис. 2, воспользуемся формулой частотного коэффициента передачи по напряжению [6, 7]:

$$K(p) = \frac{-Y1 \cdot Y3}{Y5 \cdot (Y1 + Y2 + Y3 + Y4) + Y3 \cdot Y4}, \quad (1)$$

где $Y1 \dots Y5$ - проводимости соответствующих цепей, причем $Y1 = \frac{1}{ZQ1}$, $Y3 = \frac{1}{ZQ3}$, $Y4 = \frac{1}{ZQ2}$.

Тогда передаточную функцию можно записать:

$$K(p) = \frac{-R2 \cdot R1 \cdot ZQ2(p)}{K1(p) + K2(p) + K3(p) + K4(p) + K5(p)}, \quad (2)$$

где

$$K1(p) = R1 \cdot ZQ3(p) \cdot ZQ2(p),$$

$$K2(p) = ZQ1(p) \cdot ZQ2(p) \cdot ZQ3(p),$$

$$K(p) = \frac{a_0 + a_1 \frac{p}{\omega_p} + a_2 \frac{p^2}{\omega_p^2} + a_3 \frac{p^3}{\omega_p^3} + a_4 \frac{p^4}{\omega_p^4} + a_5 \frac{p^5}{\omega_p^5} + a_6 \frac{p^6}{\omega_p^6} + a_7 \frac{p^7}{\omega_p^7} + a_8 \frac{p^8}{\omega_p^8}}{b_0 + b_1 \frac{p}{\omega_p} + b_2 \frac{p^2}{\omega_p^2} + b_3 \frac{p^3}{\omega_p^3} + b_4 \frac{p^4}{\omega_p^4} + b_5 \frac{p^5}{\omega_p^5} + b_6 \frac{p^6}{\omega_p^6} + b_7 \frac{p^7}{\omega_p^7} + b_8 \frac{p^8}{\omega_p^8}}, \quad (3)$$

где a_0, a_1, \dots, a_8 - коэффициенты полинома числителя, зависящие от конструктивных параметров преобразователя и схемы его включения,

$$a_0 = -R1 \cdot R2 \cdot BB_0 \cdot A2_0;$$

$$a_1 = -R1 \cdot R2 \cdot (BB_1 \cdot A2_0 + BB_0 \cdot A2_1);$$

$$a_2 = -R1 \cdot R2 \cdot (BB_1 \cdot A2_1 + BB_2 \cdot A2_0 + BB_0 \cdot A2_2);$$

$$a_3 = -R1 \cdot R2 \cdot (BB_1 \cdot A2_2 + BB_2 \cdot A2_1 + BB_3 \cdot A2_0);$$

$$a_4 = -R1 \cdot R2 \cdot (BB_2 \cdot A2_2 + BB_3 \cdot A2_1 + BB_4 \cdot A2_0);$$

$$a_5 = -R1 \cdot R2 \cdot (BB_3 \cdot A2_2 + BB_4 \cdot A2_1 + BB_5 \cdot A2_0);$$

$$a_6 = -R1 \cdot R2 \cdot (BB_4 \cdot A2_2 + BB_5 \cdot A2_1 + BB_6 \cdot A2_0);$$

$$a_7 = -R1 \cdot R2 \cdot (BB_5 \cdot A2_2 + BB_6 \cdot A2_1);$$

$$a_8 = -R1 \cdot R2 \cdot BB_6 \cdot A2_2;$$

$$BB_0 = B1_0 \cdot B3_0; \quad BB_1 = B1_1 \cdot B3_0 + B1_0 \cdot B3_1;$$

$$BB_2 = B1_1 \cdot B3_1 + B1_2 \cdot B3_0 + B1_0 \cdot B3_2;$$

$$BB_3 = B1_1 \cdot B3_2 + B1_2 \cdot B3_1 + B1_3 \cdot B3_0 + B1_0 \cdot B3_3;$$

$$BB_4 = B1_1 \cdot B3_3 + B1_2 \cdot B3_2 + B1_3 \cdot B3_1;$$

$$BB_5 = B1_2 \cdot B3_3 + B1_3 \cdot B3_2;$$

$$BB_6 = B1_3 \cdot B3_3;$$

$$A2_0 = 1; \quad A2_1 = R2_M C2_M \omega_p; \quad A2_2 = \omega_p^2 C2_M L2_M;$$

$$B1_0 = 0; \quad B1_1 = \omega_p (C1_M + C1_3);$$

$$B1_2 = \omega_p^2 R1_M C1_M C1_3; \quad B1_3 = \omega_p^2 L1_M C1_M C1_3;$$

$$B3_0 = 0; \quad B3_1 = \omega_p (C3_M + C3_3);$$

$$B3_2 = \omega_p^2 R3_M C3_M C3_3;$$

$$B3_3 = \omega_p^2 L3_M C3_M C3_3;$$

где b_0, b_1, \dots, b_8 - коэффициенты полинома знаменателя, зависящие от конструктивных параметров преобразователя и схемы его включения,

$$b_0 = c_0 + d_0; \quad b_1 = c_1 + d_1; \quad b_2 = c_2 + d_2; \quad b_3 = c_3 + d_3;$$

$$b_4 = c_4 + d_4; \quad b_5 = c_5 + d_5;$$

$$b_6 = c_6 + d_6; \quad b_7 = c_7 + d_7;$$

$$K3(p) = R1 \cdot ZQ1(p) \cdot ZQ2(p),$$

$$K4(p) = R1 \cdot ZQ1(p) \cdot ZQ3(p)$$

$$K5(p) = R1 \cdot ZQ1(p) \cdot R2,$$

$ZQ1(p)$, $ZQ2(p)$, $ZQ3(p)$ - операторное сопротивление пьезоэлемента определяем с учетом динамических электрических параметров пьезоэлемента (сопротивление, индуктивность, емкость):

$$ZQ(p) = \frac{L_M C_M p^2 + R_M C_M p + 1}{L_M C_M C_3 p^3 + L_M C_M C_3 p^2 + (C_M + C_3) p}.$$

Подставив операторное сопротивление пьезоэлемента в формулу передаточной функции и, выполнив математические преобразования и упрощения, получим:

$$c_0 = R1 \cdot B1_0 \cdot E_0 + A1_0 \cdot E_0;$$

$$c_1 = R1 \cdot (B1_1 \cdot E_0 + B1_0 \cdot E_1) + A1_0 \cdot E_1 + A1_1 \cdot E_0;$$

$$c_2 = R1 \cdot (B1_2 \cdot E_0 + B1_1 \cdot E_1 + B1_0 \cdot E_2) + A1_1 \cdot E_1 + A1_2 \cdot E_0 + A1_0 \cdot E_2;$$

$$c_3 = R1 \cdot (B1_3 \cdot E_0 + B1_1 \cdot E_2 + B1_2 \cdot E_1 + B1_0 \cdot E_3) + A1_1 \cdot E_2 + A1_0 \cdot E_3 + A1_2 \cdot E_1;$$

$$c_4 = R1 \cdot (B1_0 \cdot E_4 + B1_1 \cdot E_3 + B1_2 \cdot E_2 + B1_3 \cdot E_1) + A1_0 \cdot E_4 + A1_2 \cdot E_2 + A1_1 \cdot E_3;$$

$$c_5 = R1 \cdot (B1_1 \cdot E_4 + B1_2 \cdot E_3 + B1_3 \cdot E_2) + A1_2 \cdot E_3 + A1_1 \cdot E_4;$$

$$c_6 = R1 \cdot (B1_3 \cdot E_3 + B1_2 \cdot E_4) + A1_2 \cdot E_4;$$

$$c_7 = R1 \cdot B1_3 \cdot E_4;$$

$$E_0 = A3_0 \cdot A2_0; \quad E_1 = A3_1 \cdot A2_0 + A3_0 \cdot A2_1;$$

$$E_2 = A3_1 \cdot A2_1 + A3_2 \cdot A2_0 + A3_0 \cdot A2_2;$$

$$E_3 = A3_1 \cdot A2_2 + A3_2 \cdot A2_1; \quad E_4 = A3_2 \cdot A2_2;$$

$$A1_0 = 1; \quad A1_1 = R1_M C1_M \omega_p; \quad A1_2 = \omega_p^2 C1_M L1_M;$$

$$d_0 = A1_0 \cdot F_0; \quad d_1 = A1_1 \cdot F_0 + A1_0 \cdot F_1;$$

$$d_2 = A1_1 \cdot F_1 + A1_2 \cdot F_0 + A1_0 \cdot F_2;$$

$$d_3 = A1_1 \cdot F_2 + A1_2 \cdot F_1 + A1_0 \cdot F_3;$$

$$d_4 = A1_1 \cdot F_3 + A1_2 \cdot F_2 + A1_0 \cdot F_4;$$

$$d_5 = A1_1 \cdot F_4 + A1_2 \cdot F_3 + A1_0 \cdot F_5;$$

$$d_6 = A1_1 \cdot F_5 + A1_2 \cdot F_4 + A1_0 \cdot F_6;$$

$$d_7 = A1_1 \cdot F_6 + A1_2 \cdot F_5; \quad d_8 = A1_2 \cdot F_6;$$

$$F_0 = R2 \cdot B2_0 \cdot B3_0 + A2_0 \cdot B3_0 + A3_0 \cdot B2_0;$$

$$F_1 = R2 \cdot (B2_0 \cdot B3_1 + B2_1 \cdot B3_0) + A3_0 \cdot B2_1 + A2_1 \cdot B3_0 + A3_1 \cdot B2_0 + A2_0 \cdot B3_1;$$

$$F_2 = R2 \cdot (B2_0 \cdot B3_2 + B2_2 \cdot B3_0 + B2_1 \cdot B3_1) + A2_0 \cdot B3_2 + A3_2 \cdot B2_0 + A3_1 \cdot B2_1 + A2_1 \cdot B3_1 + A2_2 \cdot B3_0 + A3_0 \cdot B2_2;$$

$$F_3 = R_2 \cdot (B_{2_3} \cdot B_{3_0} + B_{2_1} \cdot B_{3_2} + B_{2_0} \cdot B_{3_3} + B_{2_2} \cdot B_{3_1}) + A_{3_0} \cdot B_{2_3} + A_{3_2} \cdot B_{2_1} + A_{2_2} \cdot B_{3_1} + A_{2_0} \cdot B_{3_3} + A_{2_1} \cdot B_{2_2} + A_{2_1} \cdot B_{3_2};$$

$$F_4 = R_2 \cdot (B_{2_2} \cdot B_{3_2} + B_{2_3} \cdot B_{3_1} + B_{2_1} \cdot B_{3_3}) + A_{3_1} \cdot B_{2_3} + A_{2_1} \cdot B_{3_3} + A_{3_2} \cdot B_{2_2} + A_{2_2} \cdot B_{3_2};$$

$$F_5 = R_2 \cdot (B_{2_3} \cdot B_{3_2} + B_{2_2} \cdot B_{3_3}) + A_{2_2} \cdot B_{3_3} + A_{3_2} \cdot B_{2_3}; \quad F_6 = R_2 \cdot B_{2_3} \cdot B_{3_3};$$

$$B_{2_0} = 0; \quad B_{2_1} = \omega_p (C_{2_M} + C_{2_3});$$

$$B_{2_2} = \omega_p^2 R_{2_M} C_{2_M} C_{2_3}; \quad B_{2_3} = \omega_p^2 L_{2_M} C_{2_M} C_{2_3}.$$

Амплитудно-частотная характеристика определяется модулем частотной передаточной функции $A(\omega) = |W(j\omega)|$. Для этого необходимо нор-

мировать комплексную переменную p . Положим: $P = \frac{p}{\omega_p}$, где P – нормированная комплексная переменная; ω_p – круговая частота квазирезонанса преобразователя.

Результаты компьютерного моделирования АЧХ пьезопреобразователя на основе активного фильтра верхних частот с использованием традиционного пьезоэлектрического элемента (ПЭ) и биморфного доменно-диссипативного ПЭ выполнены при следующих параметрах преобразователя (табл.1).

Таблица 1. Параметры преобразователя, при которых выполнялось компьютерное моделирование

угол	$\alpha = 0$ градусов	$\alpha = 20$ градусов	$\alpha = 40$ градусов	$\alpha = 82$ градусов
при $ZQ1=ZQ2=ZQ3$				
R_m , кОм	2,5	14	26	47,76
C_m , нФ	27	3,37	1,8	0,9
$R1$, кОм	140			
$R2$, кОм	70			

Как видно из результатов исследования АЧХ преобразователя с частотой среза 500 Гц (рис. 3), и с частотой среза 125 Гц (рис. 4), при увеличении угла между вектором поляризации и вектором напряженности электрического поля выходного напряжения от 0 до 40° резонансный пик преобразователя уменьшается в 2-10 раз.

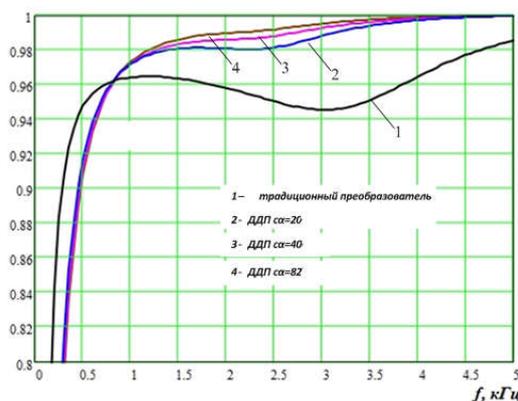


Рис. 3. АЧХ преобразователя механических величин с доменно-диссипативными пьезоэлементами в модифицированной схеме активного фильтра верхних частот с частотой среза 500 Гц

При этом амплитудно-частотная погрешность уменьшается в 1,3-3 раза.

Для преобразователя (рис. 4), в результате исследований было установлено, что резонансный пик уменьшается почти в 10 раз, если использовать все пьезоэлектрические элементы доменно-диссипативные.

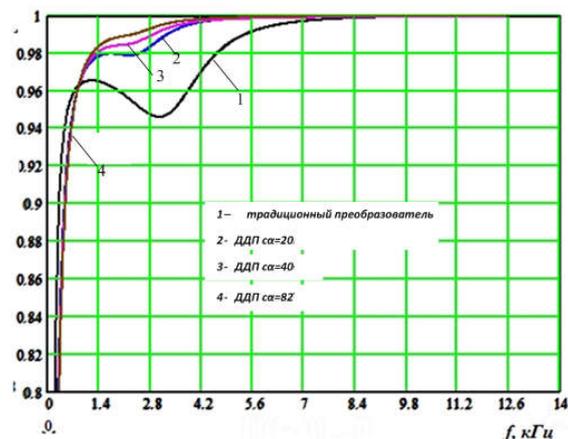


Рис. 4. АЧХ преобразователя механических величин с доменно-диссипативными пьезоэлементами в модифицированной схеме активного фильтра верхних частот с частотой среза 125 Гц

Если использовать только один доменно-диссипативный пьезоэлемент $ZQ3$, а два остальных $ZQ1, ZQ2$ традиционные пьезоэлементы, то резонансный пик уменьшается в 5 раз.

Одним из способов исследования АЧХ пьезоэлектрических преобразователей, является применение компьютерного моделирования с использованием современных пакетов прикладных программ.

В пакете программы МС9 исследовалась эквивалентная схема преобразователя механических величин с доменно-диссипативным пьезоэлементом в схеме активного ФВЧ с многопетлевой обратной связью.

При этом биморфный пьезоэлемент согласно теории электромеханических аналогий представлен последовательно-параллельным колебательным RLC – контуром. Эквивалентная схема преобразователя представлена на рис. 5, а результат компьютерного схмотехнического моделирования АЧХ при разных углах между вектором напряженности электрического поля и вектором выходного сигнала на рис. 6, 7.

Соответствие модели преобразователя реальному устройству (биморфный пьезоэлектрический элемент из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 27 мм, толщиной 0,2 мм с металлической пластиной диаметром 30 мм и толщиной 0,2 мм из стали 40X) и математической модели подтверждается совпадением частоты и амплитуды характеристики.

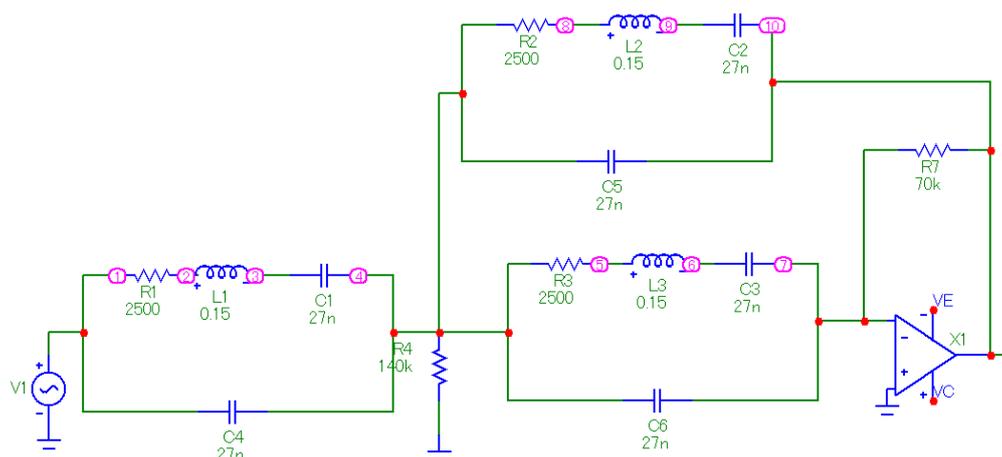


Рис. 5. Эквивалентная схема преобразователя механических величин с пьезоэлементом в схеме ФВЧ с многопетлевой ОС

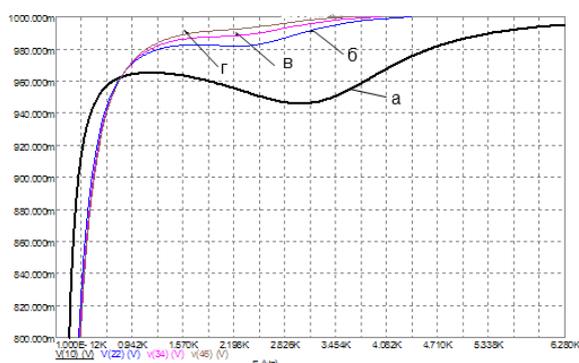


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования АЧХ преобразователя с частотой среза 500 Гц при: а) $\alpha = 0^\circ$; б) $\alpha = 20^\circ$; в) $\alpha = 40^\circ$; г) $\alpha = 82^\circ$

Выводы

1. С помощью системы моделирования и анализа электрических схем получены модели преобразователей механических величин.

2. Полученные АЧХ преобразователей соответствуют АЧХ, которые получены на основании математических моделей.

3. Нелинейность АЧХ и амплитудно-частотная погрешность преобразователей зависит от угла между вектором поляризации и вектором напряженности электрического поля выходного напряжения.

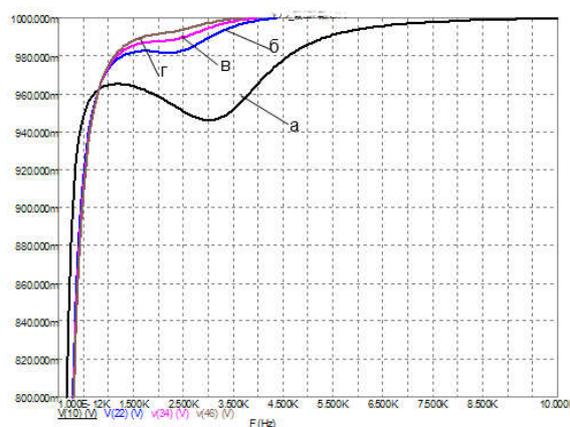


Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования АЧХ преобразователя с частотой среза 125 Гц при: а) $\alpha = 0^\circ$; б) $\alpha = 20^\circ$; в) $\alpha = 40^\circ$; г) $\alpha = 82^\circ$

4. Для преобразователей на основе модифицированных схем фильтров верхних частот при увеличении угла между вектором поляризации и вектором напряженности электрического поля выходного напряжения от 0 до 40° резонансный пик преобразователя уменьшается в 5-15 раз. При этом амплитудно-частотная погрешность уменьшается в 1,2-3 раз.

Для преобразователя на основе модифицированной схемы фильтра верхних частот с многопетлевой ОС рабочий частотный диапазон и нелинейность АЧХ зависят от сопротивления R2 и соот-

ношення межелектродних ємкостей $C_{\text{ПЕЗ}}$ во входній цепі і $C_{\text{ПЕ2}}$ в цепі зворотньої зв'язки. При збільшенні опору R_2 в n раз частота срезу преобразователя зменшується в n раз. При збільшенні межелектродної ємкості $C_{\text{ПЕЗ}}$ в n раз амплітудно-частотна погрешність зменшується в $(0,45-0,7)n$ раз, а нелінійність АЧХ зменшується в $(1,2-2)n$ раз. При цьому межелектродні ємкості $C_{\text{ПЕ1}} = C_{\text{ПЕ2}}$, і $R_1 = 2R_2$.

Литература

1. Пьезоэлектрические преобразователи (Справочное пособие) / Шарапов В. М. Мусиенко М. П., Шаропова Е. В. // Под ред. В. М. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
2. Шарапов В. М. Линеаризация амплитудно-частотной характеристики пьезоэлектрических преобразователей с мономорфным или биморфным чувствительным элементом / В. М. Шарапов, Ю. Ю. Балковская, М. П. Мусиенко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – №1. – С. 41 – 45.
3. Sharapov V. M. Application of domenno-dissipativnih pezoeramicheskikh transformers in the charts of the electric filters / V. M. Sharapov, R. V. Trembovetskaya, V. I. Shavaleva, N. V. Raevskiy // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – №3 спецвипуск. – С. 69 – 71.
4. Шарапов В. М. Преобразователь механических величин с пьезоэлементами в модифицированной схеме активного фильтра верхних частот с многопетлевой обратной связью / В. М. Шарапов, А. Н. Гуржий, Р. В. Трёмбовецкая // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2006. – № 3 – С. 95 – 97.
5. Sharapov V. M. Domain dissipative bimorph piezoelectric sensors in the modified charts of the Electric filters of the lower frequencies / V. M. Sharapov, R. V. Trembovetskaya // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2006. – спецвипуск. – С. 274 – 277.
6. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебн. Для вузов по спец. «Радиотехника» - М.: Высш.шк., 1988 – 448 с.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1983.

УДК 004.942: 621.3.537.228.1

Р. В. Трёмбовецька, В. В. Тычков

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН З ДОМЕННО-ДИССИПАТИВНИМИ П'ЄЗОЕЛЕМЕНТАМИ В СХЕМАХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ВЕРХНІХ ЧАСТОТ

У статті запропонована еквівалентна схема перетворювача механічних величин з п'єзоелементом в схемі активного фільтра верхніх частот з багатопетлевим зворотнім зв'язком. Отримано частотний коефіцієнт передачі перетворювачів. Виконано моделювання та дослідження АЧХ п'єзоелектричних перетворювачів за допомогою комп'ютерного моделювання в пакеті MS9. При цьому биморфний п'єзоелемент відповідно до теорії електромеханічних аналогій представлений послідовно-паралельним коливальним RLC - контуром. Показано відповідність комп'ютерної та математичної моделі перетворювача реальному перетворювачу, що підтверджується збігом частоти і амплітуди характеристики. Отримані за допомогою комп'ютерної моделі АЧХ перетворювачів відповідають АЧХ, які отримані на підставі математичних моделей. Встановлено, що нелінійність АЧХ і амплітудно-частотна похибка перетворювачів залежить від кута між вектором поляризації і вектором напруженості електричного поля вихідної напруги. Для перетворювачів на основі модифікованих схем активних фільтрів верхніх частот при збільшенні кута між вектором поляризації і вектором напруженості електричного поля вихідного напруги від 0 до 82° резонансний пік перетворювача та амплітудно-частотна похибка зменшується.

Ключові слова: п'єзоелектричний перетворювач, биморфний п'єзоелемент, доменно-дисипативний перетворювач, комп'ютерне моделювання, частотний коефіцієнт передачі, амплітудно-частотна характеристика.

R. V. Trembovetskaya, V. V. Tychkov

Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

THE MECHANICAL QUANTITIES TRANSDUCERS EVOLUTION WITH THE DOMAIN-DISSIPATIVE PIEZOELECTRIC CELLS IN THE CHARTS OF THE ACTIVE HIGH-PASS FILTER

The article suggested the equivalent circuit of the inverter mechanical values with piezoelement in the scheme of the active high-pass filter with multi-loop feedback. The frequency converters transmission ratio is received. The modeling and study of the frequency response of piezoelectric transducers using computer modeling in MS9 package where performed. This bimorph according to the theory of electromechanical analogies presented by series-parallel oscillating RLC - circuit. The correspondence of computer and mathematical model of the converter real converter,

which is confirmed by the coincidence of the frequency and characteristics of the amplitude. The information generated by a computer model of the frequency response transducers match the frequency response, and based on mathematical models. It was established that the non-linearity of frequency and amplitude-frequency error transducers depends on the angle between the polarization vector and the vector of the electric field of the output voltage. For drives on the basis of the modified active filter circuits treble with an increase in the angle between the polarization vector and the vector of the electric field of the output voltage from 0 to 82° resonant peak of the converter and the amplitude-frequency error is reduced.

Keywords: piezoelectric transducer, bimorph piezoelement, domain-dissipative transducer, computer simulation, the transmission ratio frequency, frequency response.

*Надійшла до редакції
24 жовтня 2016 року*

*Рецензовано
07 листопада 2016 року*

© Трембовецкая Р. В., Тычков В. В., 2016

УДК 620.179.14

КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ, НАНЕСЕНИХ НА МЕТАЛЕВУ ОСНОВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ

Подольян О. О., Андрієнко О. І., Атаманенко В. В., Шалоумов Є. В.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
E-mail: Podoljan@i.ua*

У даній статті розглядається можливість визначення товщини лакофарбових покриттів об'єктів використовуючи електромагнітно-акустичний (ЕМА) метод. За допомогою математичного моделювання досліджено вплив товщини лакофарбового покриття, нанесеного на металеву основу, на акустичні параметри ЕМА перетворювача. Експериментально отримані залежності, що показують вплив товщини лакофарбового покриття на створюваний акустичний тиск. Максимальний акустичний тиск створюється при відсутності лакофарбового покриття. Зі збільшенням товщини покриття тиск різко падає. Показано добру збіжність між отриманими теоретичними та експериментальними результатами.

Ключові слова: ЕМА, перетворювач, лакофарбове покриття, товщина, акустичний тиск, неруйнівний контроль.

Вступ

Серед досліджень, пов'язаних зі створенням апаратури неруйнівного контролю, особливе місце займають пошуки безконтактних методів збудження і реєстрації ультразвуку в твердих тілах [1]. Успіхи в зазначеному напрямку досягнуто за рахунок застосування електромагнітно-акустичного (ЕМА) методу збудження і прийому ультразвукових коливань.

В даний час ЕМА метод не застосовується для контролю товщини лакофарбових покриттів нанесених на металеву основу, що істотно обмежує області його використання. Разом з тим, широко використовуються ЕМА дефектоскопи, для контролю якості самої основи. Задача контролю товщини лакофарбового покриття за допомогою ЕМА перетворювачів може бути вирішена тільки в

результаті спільного дослідження випромінювання, формування магнітного поля [2, 3] і формування зондувальних імпульсів [4]. Рішення поставленої задачі дослідження випромінювання дозволить проводити комплексний контроль виробу спільно з нанесеним на нього покриттям, що підвищить ефективність ультразвукової дефектоскопії по достовірності і швидкості проведення робіт.

Постановка задачі

Метою роботи є аналіз залежності між товщиною лакофарбових покриттів металевих виробів акустичним тиском, створюваним в ньому під час контролю з використанням ЕМА перетворювачів.