

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Loy, N. Barnes "Fast Shape-based Road Signs Detection for a Driver Assistance System," in Procs. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, Sept. 2004. pp. 70–75.
2. A. de la Escalera, J. M. Armignol, M. Mata, "Traffic sign recognition and analysis for intelligent vehicles," *Image and Vision Computing*, vol. 21, no. 3, Mar. 2003. pp. 247–258.
3. X. Gao, N. Shevtsova, K. Hong, S. Batty, L. Podladchikova, A. Golovan, D. Shaposhnikov, and V. Gusakova, "Vision Models Based Identification of Traffic Signs," in Procs. of Europ. Conf. on Color in Graphics Image and Vision, Poitiers, France, Apr. 2002. pp. 47–51.
4. H. Hoessler, C. Wöhler, F. Lindner, and U. Krefel, "Classifier training based on synthetically generated samples," in Procs. 5th Intl. Conf. on Computer Vision Systems, Bielefeld, Germany, Mar. 2007. pp. 47–51.
5. S. Lafuente-Arroyo, P. Gil-Jiménez, R. Maldonado-Bascón, F. López-Ferreras, S. Maldonado-Bascón Dpto. "Traffic sign shape classification evaluation I: SVM using Distance to Borders", de Teoría de la Señal y Comunicaciones Universidad de Alcalá de Henares. Madrid 2002.
6. A. Broggi, P. Cerri, P. Medici, P. Paolo, "Real Time Road Signs Recognition" *Porta VisLab – Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione Università degli Studi di Parma, ITALY Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Istanbul, Turkey, June 13-15, 2007. pp. 968–971.*

УДК 681.586

Колешико Л.А., Сунка В.Я.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ МИКРО-НАНОАКТЮАТОРЫ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Актюатор – это устройство, которое преобразовывает энергию в управляющее движение и является составной частью микроэлектромеханических систем (МЭМС). Применение актюаторов весьма широко – от микро – наносенсорике, робототехники, биомедицины, измерительно-управляющих устройств, автомобилестроения, космической и военной технике до различных дозирующих устройствах домашнего хозяйства и технологии развлечения. В настоящее время, заметно отставание в создании высокоточных и миниатюрных актюаторов линейного и ограниченного углового перемещения. В наибольшей мере указанным требованиям могут удовлетворять (ПА) и пьезомоторы (ПМ). Они имеют уникальную совокупность положительных свойств: высокая разрешающая способность, малые размеры, широкий диапазон рабочих частот, значительные выходные усилия, отсутствие внешнего электромагнитного поля, широкий температурный диапазон, достаточная надежность. Необходимое перемещение достигается за счет обратного пьезоэффекта при деформации пьезоэлемента при подаче на него электрического напряжения. Конструктивно пьезоактюатор выполняются в виде отдельных пьезопластин или составного блока: секционного монолитного, склеенного составного и составного упруго поджатого пьезопреобразователя. ПА обеспечивает перемещения до десятков и сотен микрометров с нанометрической точностью.

Недостаток используемых пьезоэлектрических актюаторов – существенное изменение выходных параметров (усилия, амплитуды или скорости механического перемещения) вследствие изменения резонансной частоты узкополосной механической ультразвуковой колебательной системы (УЗКС), основной конструктивной части актюатора, при воздействии дестабилизирующих факторов (температуры, усилия прижима, шероховатости контактирующих материалов, старения и т.д.). Повысить стабильность выходных параметров таких актюаторов возможно расширением полосы пропускания их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) [1,2] выходных механических параметров. Такие широкополосные микро – наноактюаторы – это новый класс МЭМС, которые имеют существенные преимущества по сравнению с узкополосными (резонансными) по стабильности микро- наномеханических параметров при изменении режимов эксплуатации МЭМС.

Для моделирования актюаторов и проведения расчетов электромеханических параметров широкополосных на системе связанных электрических и механических резонансных контуров (ЭМСК) и сравнения результатов расчета с экспериментом составим полную эквивалентную шестиполусную электрическую схему замещения актюатора, представленную на рис.1, где R_s – внутреннее сопротивление источника питания. Для выполнения расчетов с помощью матричного исчисления разделим эквивалентную схему замещения (рис. 1) на пять элементарных звеньев. Для каждого звена запишем обобщенные матричные выражения.

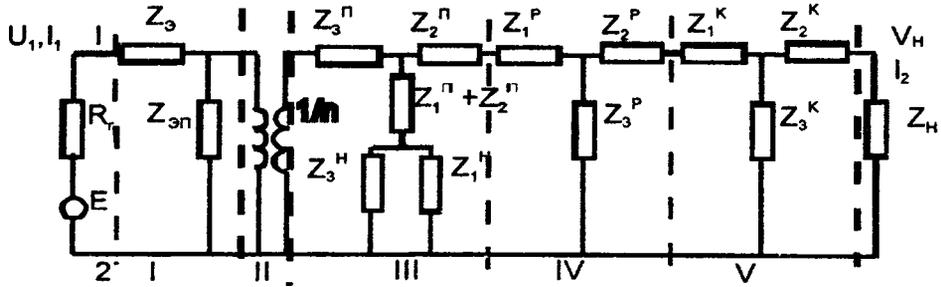


Рис. 1

1. Звено электрических сосредоточенных параметров

$$A_I = \begin{bmatrix} 1 + Z_3 / Z_{ЭП} & Z_3 \\ 1 / Z_{ЭП} & 1 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

где Z_3 - импеданс последовательно соединяемого с УЗКС реактивного элемента, знак реактивности которого противоположен знаку статической реактивности “заторможенного” преобразователя УЗКС. Для УЗКС с пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) $Z_3 = j\omega L_k + R$, а для УЗКС с магнитострикционным преобразователем (МСП) $Z_3 = (1/j\omega C_k) + R$; $Z_{ЭП}$ – импеданс статической реактивности “заторможенного” преобразователя, при этом для УЗКС с ПЭП $Z_{ЭП} = (1/j\omega C_3) + R$, а для УЗКС МСП $Z_{ЭП} = j\omega L_3 + R$. Здесь величина R - активные потери в реактивных электрических элементах первого звена.

2. Коэффициент электромеханической связи второго звена записывается матрицей

$$A_{II} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ n & n \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где n – коэффициент электромеханической трансформации. Например, для УЗКС с ПЭП величина $n = d_{33} E_{ю} \cdot S \cdot d$, где d_{33} – пьезомодуль, $E_{ю}$ – модуль Юнга, S – площадь и d – толщина пьезоэлемента.

3. Пьезоэлектрический преобразователь с отражающей (демпфирующей) накладкой. На рис. 1 приняты обозначения: Z_i^N и Z_i^H – импедансы, соответственно пьезоэлектрического преобразователя и отражающей накладки $i = 1, 2$ и 3. Матрица звена равна

$$A_{III} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_3^H}{Z_o} & Z_3^H + Z_2^H + \frac{Z_3^H \cdot Z_2^H}{Z_o} \\ \frac{1}{Z_o} & 1 + \frac{Z_2^H}{Z_o} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где $Z_o = Z_1^H + Z_2^H + (Z_3^H \cdot Z_1^H) / (Z_3^H + Z_1^H)$.

4. Матрица излучающей (рабочей) накладки запишется выражением

$$A_{IV} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1^P}{Z_3^P} & Z_1^P + Z_2^P + \frac{Z_1^P \cdot Z_2^P}{Z_1^P + Z_2^P} \\ 1 + Z_3^P & 1 + \frac{Z_2^P}{Z_{3P}^P} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где Z_i^P – импеданс рабочего инструмента. Если пьезоэлементы, отражающая и рабочая накладки выполнены цилиндрическими, то без учета потерь их импедансы записываются выражениями [7-9]

$$Z_1^Q = Z_2^Q = j p_o \cdot c_o \cdot S_o \cdot \operatorname{tg}(k_o \cdot d_o / 2), \quad Z_3^Q = -j (p_o \cdot c_o \cdot S_o / (\sin k_o \cdot d_o)), \quad (5), (6)$$

где p_o, c_o, S_o, d_o – плотность, скорость звука, площадь поперечного сечения и толщина d (длина) соответствующего элемента, k_o – волновое число, $Q = \Pi, H, P$.

5. Для концентратора – рабочего инструмента, служащего для увеличения амплитуды механических колебаний, матрица записывается выражением

$$A_V = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1^K}{Z_3^K} & Z_1^K + Z_2^K + \frac{Z_1^K \cdot Z_2^K}{Z_3^K} \\ \frac{1}{Z_3^K} & 1 + \frac{Z_2^K}{Z_3^K} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где Z_i^K – составляющие (импедансы) Γ – образной электрической схемы замещения концентратора. Конкретные выражения для Z_1^K, Z_2^K и Z_3^K концентраторов конического, экспоненциального и катеноидального и др. можно найти в [9].

Суммарная обобщенная матрица всей эквивалентной электрической схемы замещения УЗКС с системой ЭМСК равна произведению матриц отдельных звеньев

$$A_{\Sigma} = [A_I] \cdot [A_{II}] \cdot [A_{III}] \cdot [A_{IV}] \cdot [A_V] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Запишем выражения для расчета параметров широкополосных УЗКС на системе ЭМСК: – входной электрический импеданс Z_{oo} между входными точками 1-2 УЗКС (рис. 1)

$$Z_{oo} = (A_{11} Z_H + A_{12}) / (A_{21} Z_H + A_{22}), \quad (9)$$

где Z_H – сопротивление нагрузки на торец концентратора УЗКС; – коэффициент электромеханической трансформации

$$K_{ЭТ} = (V_H / I_1) \sim (I_2 / I_1) = A_{21} \cdot Z_H + A_{22}, \quad (10)$$

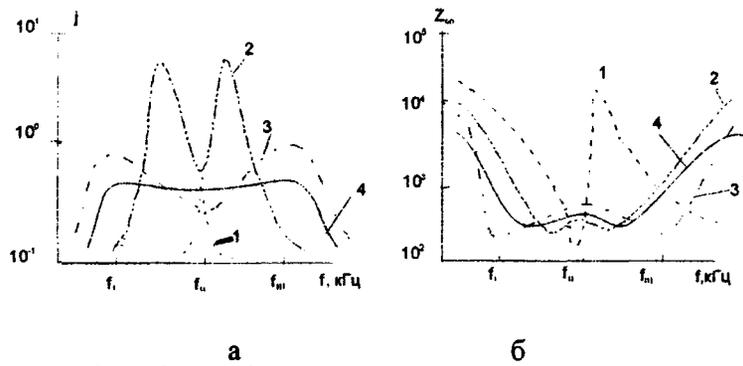
где V_H – скорость механических колебаний в нагрузке, I_1, I_2 , – входной и выходной ток УЗКС системы;

– коэффициент электромеханического преобразования

$$K_{ЭП} = (V_H / U_1) \sim (I_2 / U_1) = A_{11} \cdot Z_H + A_{12}, \quad (11)$$

где U_1 – электрическое напряжение на входе УЗКС (рис. 1).

В выражениях (10) и (11) в соответствии с первой системой электромеханических аналогий выходной ток I_2 пропорционален скорости механических колебаний торца рабочего инструмента.



1,2,3,4 – $L_k = 0, 10^{-4}, 4 \cdot 10^{-3}, 0,5 \cdot 10^{-3}$ Гн; 1- узкополосный и 2 – 4 – широкополосный актюатор

Рис.2. Частотные зависимости относительного коэффициента преобразования $j(a)$ и входного импеданса Z_{oo} (б)

На рис. 2 приведены типичные АЧХ, рассчитанного по выражениям (10) и (11) нормированного значения коэффициента $j = K_{ЭП} / K_{ОО}$ электромеханического преобразователя (а) относительно ненагруженного пьезоэлемента, при этом $K_{ОО} = 2e / l_o$, и входного электрического импеданса (б). Здесь e – пьезоэлектрическая константа, и l_o – толщина пьезоэлектрической пластины. Расчеты выполнены для широкополосной УЗКС с статической емкостью $C_s = 6500$ пФ, величиной последовательно включенной индуктивности L_k при ее добротности $Q_l = 50$. Значение индуктивности изменялось от $L_k = 10^{-6}$ Гн до $L_{ко} = 1/[4\pi^2 f_p^2 C_s] \sim 10^{-3}$ Гн, где $f_p \sim f_{II}$ – частота резонанса максимума механических колебаний узкополосной УЗКС. Для выравнивания АЧХ относительного коэффициента передачи j с целью получения симметричной АЧХ при каждом значении компенсирующей индуктивности L_k параллельно емкости C_s включалась корректирующая емкость $C_{кор}$ величиной,

$$C_{кор} = [1/(4\pi^2 f_p^2 L_k)] - C_s. \quad (12)$$

Из приведенных графиков (рис. 2) очевидно, что на АЧХ параметров имеются три экстремума на частотах связи f_I , $f_{II} = f_m$ и f_{III} , при этом частотный диапазон $\Delta f = f_{III} - f_I$, всегда шире, чем динамический частотный диапазон исходной УЗКС $\Delta f_d = f_n - f_m$, ненагруженной входными реактивными элементами. Здесь и f_n и f_m – частота резонанса минимума и максимума входного импеданса УЗКС.

Физическая сущность увеличения полосы пропускания системы УЗКС такая же, как и системы электрически связанных контуров (ЭСК) [5]. Она обусловлена компенсацией собственного реактивного сопротивления электрического (первичного) контура $L_k \cdot C_s$, внесенным реактивным сопротивлением вторичного механического контура $L_m \cdot C_m$. Поэтому на частотах связи f_I и f_{III} входной импеданс имеет одинаковое и меньшее значение, чем на частоте связи f_{II} . Электрическая мощность потребления широкополосной УЗКС на частотах связи f_I и f_{III} , одинаковая и существенно больше, чем на частоте связи f_{II} .

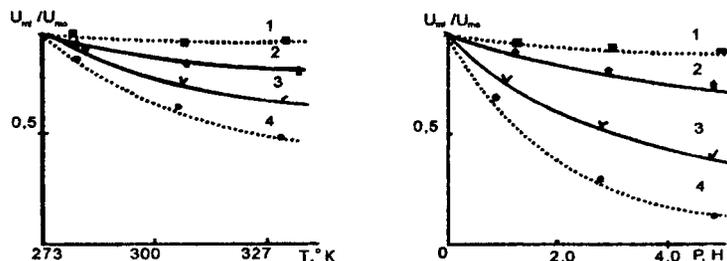
Если проводить аналогию между характеристиками рассматриваемой широкополосной УЗКС и характеристиками системы электрически связанных контуров (ЭСК), то можно отметить следующее. Частотные зависимости входного импеданса широкополосной УЗКС и первичного контура системы ЭСК подобны, в то же время частотные зависимости механических выходных параметров широкополосных УЗКС (скорости, амплитуды механических колебаний) и тока во вторичном контуре системы ЭСК подобны, но не идентичны. В системе ЭСК ток в первичном электрическом контуре на частотах связи f_I и f_{III} уменьшается с ростом коэффициента связи $K_{эс}$, пропорционального корню квадратному из отношения емкостей первичного и вторичного контуров, до определенной критической величины $K_{эс\text{ кр}}$. При дальнейшем увеличении значения $K_{эс} \geq K_{эс\text{ кр}}$ величина тока в первичном контуре на частотах f_I и f_{III} остается неизменной, т. к. величина вносимого активного сопротивления из вторичного контура остается постоянной. Во вторичном электрическом контуре системы ЭСК ток также увеличивается с

ростом величины $K_{эс}$ от нулевого значения до определенного значения, соответствующего критическому значению коэффициента $K_{эс} = K_{эс\text{кр}}$. При условии, что $K_{эс} \geq K_{эс\text{кр}}$ ток во вторичном контуре не увеличивается и его значение определяется активным сопротивлением вторичного электрического контура [8].

В системе ЭМСК электрический ток в первичном электрическом контуре и скорость механических колебаний во вторичном контуре на частотах связи f_I и f_{III} монотонно уменьшается при увеличении коэффициента $K_{эс}$, равного корню квадратному из отношения емкостей механического и электрического контуров. Это происходит потому, что вносимое в первичный контур сопротивление механических потерь увеличивается с ростом ширины полосы пропускания $\Delta f = f_{III} - f_I$. При компенсации в первичном контуре реактивного сопротивления емкости C_3 в нем остается только активное сопротивление индуктивности и активное внутреннее сопротивление источника питания $R_э$, а также вносимого из вторичного механического контура сопротивления нагрузки

$$R_B = 1/R_M [2\pi f_i(C_3 + C_{кор})]^2, \quad (13)$$

где R_M – сопротивление механических потерь на частоте связи f_{II} . Хорошо известно, что АЧХ сопротивления потерь R_M имеет закон изменения, близкий к нормальному закону распределения Гаусса с максимумом значения на частоте резонанса f_{II} . На частотах связи f_I и f_{III} величина сопротивления R_B меньше, чем на частоте f_{II} . Это различие тем больше, чем шире полоса частот $\Delta f = f_{II} - f_I$ или $\Delta f = f_{III} - f_{II}$. При полосе пропускания $\Delta f = f_{III} - f_I$, в 15-20 раз превышающей ширину полосы пропускания исходной узкополосной УЗКС, полное сопротивление в первичном контуре определяется, в основном, только величиной активного сопротивления индуктивности L_k (зависимости 1- 4 рис.2,б). Это сопротивление возрастает при неизменной величине добротности при увеличении индуктивности L_k . Поэтому полный ток в первичном контуре системы ЭМСК уменьшается, а значит, например, скорость механических колебаний также уменьшается. Одновременно уменьшение скорости механических колебаний на частотах связи f_I и f_{III} происходит и от того, что для возбуждения механической системы необходима тем большая электрическая мощность, чем больше отличается частота связи f_I и f_{III} от резонансной частоты связи f_{II} .



а б
1; 2; 3; 4 - $\Delta f = 150; 380; 2000$ и 9200 Гц; 1- исходный узкополосный и 2-4 – широкополосный актюатор.
Рис.3. Зависимости относительной величины амплитуды механических колебаний от изменения температуры (а) и статического давления (б).

Сравнение расчетов резонансных частот связи по АЧХ входного импеданса системы ЭМСК по упрощенной (двухполосной) и полной (шестиполосной) эквивалентной электрическим схемам замещения с полученными экспериментальными результатами показывает, что расчеты по полной эквивалентной схеме более точны и отличаются от эксперимента не более чем на $2 \pm 3\%$. В то же время расчеты по упрощенной электрической схеме имеют погрешность определения резонансных частот $6 \pm 15\%$.

Проведены сравнительные испытания широкополосных микро пьезоактюаторов на системе ЭМСК с коническим концентратором, имеющим коэффициент усиления амплитуды механических колебаний $N = 5$, и узкополосной УЗКС при изменении режимов эксплуатации: подводимой электрической мощности; температуры от 273°K до 340°K и статического давления до 5 Н на торец рабочего

инструмента цилиндрической формы диаметром 2 мм, закрепленного на узкой части концентратора, перпендикулярно продольной оси концентратора. На рис. 3 представлены некоторые полученные экспериментальные зависимости относительной величины амплитуды механических колебаний U_{mi} / U_{mo} на торце концентратора при изменении температуры прогрева (рис. 3,а) и статического давления (рис. 3,б). Здесь U_{mo} и U_{mi} – амплитуда механических колебаний без влияния дестабилизирующих факторов и при их наличии.

Полоса пропускания исходной УЗКС с коническим концентратором [1] составляла величину $\Delta f_o = 140$ Гц. При подключении последовательной индуктивности $L_k = L_{ko}$ и образовании системы ЭМСК полоса увеличилась до $\Delta f = 9200$ Гц, т. е. в ~ 65 раз. Выравнивание амплитуды механических колебаний в полосе пропускания проводилось изменением активной составляющей первичного электрического контура (регулирование электрической добротности), а также и изменением, при необходимости, волнового сопротивления отражающей накладки (демпфера) отражающей стороне пьезоэлектрической пластины. Изменение ширины полосы от $\Delta f = 9200$ Гц до $\Delta f_o = 140$ Гц проводилось уменьшением величины индуктивности L_k при одновременном увеличении корректирующей емкости $C_{кор}$.

Из приведенных графиков очевидно существенное повышение стабильности механических колебаний широкополосных пьезоэлектрических актюаторов. Например, при увеличении температуры нагрева актюатора до 340 °К при полосе $\Delta f = 380$ Гц (расширение полосы в ~ 3 раза) стабильность повышается в 1,4 раза (зависимости 1,3 рис. 3,а), а при увеличении полосы до $\Delta f = 9200$ Гц стабильность повышается в 9 раз по сравнению с исходным узкополосным актюатором (зависимости 1,4 рис. 3.а).

Еще большее повышение стабильности (устойчивости) амплитуды механических колебаний U_m в широкополосных актюаторах имеет место при воздействии статического или динамического давления до 5 Н на торец рабочего инструмента актюатора. Так, по сравнению с исходным узкополосным актюатором расширении полосы пропускания в 3 раза стабильность амплитуды U_{mi} / U_{mo} повышается в ~ 2 раза (зависимости 1,3 рис. 3,б). При максимально достижимой полосе пропускания $\Delta f = 9200$ Гц стабильность повышается - до ~ 30 раз (зависимости 1,4 рис. 3,б).

Приведенные исследования показывают перспективность проведения дальнейших исследований в области создания широкополосных пьезоэлектрических актюаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сунка В.Я., Колешко Л.А. Механические параметры широкополосных ультразвуковых микро- наноактюаторов. Теоретическая и прикладная механика, 2010, вып.25.с.121-126.
2. Колешко В.М., Сунка В.Я. Авт. свид. СССР №№ 694326, 721285, 725846, 733924, 763004, 793662.
3. Сунка В.Я., Колешко Л.А.. Исследование электронных схем расширения полосы частот ультразвуковых систем. Известия АН БССР, сер. ФМН-1980. №1. – С.89-95.
4. Домаркас В.И., Кажис, Р.-И.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. - Вильнюс: Минтис, 1975. - 255с.
5. Харкевич А.А. Теория электроакустических преобразователей. - М.: Наука, 1973, т.1. – с.58-69.
6. Снытко А.Я. и др. Матрица параметров эквивалентных шестиполосников сложных пьезоактивных колебательных систем. Акустический журнал, 1976, т. XXII, в. 6. – с.922-930.
7. Лосев А.К. Теория и расчет электромеханических фильтров. – М.: Связь, 1965. – с.63-80.
8. Калашников А.М. и др. Колебательные системы. – М.: Военное издательство Мин. обороны, 1980. – с.80-113.
9. Гальперина А.Н. Расчет сложных ультразвуковых колебательных систем с помощью эквивалентных схем. – Акустический журнал, 1977, в. 5. с.710-715.