

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МИКРО-НАНОАКТЮАТОРОВ

Сунка В.Я., Колешко Л.А.

New class of wide band ultrasonic micro – nanoactuators with increased stability of parameters was offered by authors. Output mechanical parameters are shown as results of computer simulation and experimental explorations.

В настоящее время на фоне интенсивного развития микроэлектроники, заметно некоторое отставание в создании исполнительных элементов мехатронных систем. В частности, задача создания высокоточных и миниатюрных актюаторов линейного и ограниченного углового перемещения весьма актуальна. Не менее значима актуальность и в разработке высокоточных, безредукторных приводов. В наибольшей мере указанным требованиям могут удовлетворять пьезоэлектрические исполнительные элементы (ПЭИЭ). Сюда можно отнести пьезоактюаторы (ПА) и пьезомоторы (ПМ). ПЭИЭ имеют уникальную совокупность положительных свойств: малые размеры, высокая разрешающая способность, широкий диапазон рабочих частот, значительные выходные усилия, отсутствие внешнего электромагнитного поля, широкий температурный диапазон, достаточная надежность. ПА имеют простую конструкцию и работают на основе обратного пьезоэффекта. Необходимое перемещение достигается за счет деформации пьезоэлемента при подаче на него электрического напряжения. Конструктивно пьезоэлементы выполняются в виде отдельных пластин или составного блока: секционного монолитного, склеенного составного и составного упругоподжатого пьезопреобразователя. ПА обеспечивает перемещения до десятков и сотен микрометров с нанометрической точностью.

Основной недостаток существующих ультразвуковых актюаторов заключается в существенном изменении выходных параметров (усилие, амплитуда и скорость перемещения) вследствие изменения резонансной частоты узкополосной механической ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) при переменном воздействии различных дестабилизирующих факторов (температуры, усилия прижима, шероховатости контактирующих материалов, старения и т.д.). Повысить стабильность выходных параметров ультразвуковых актюаторов возможно методом расширения полосы пропускания их амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) [1.2] выходных механических параметров.

Данный метод реализуется с помощью электрических пассивных и активных цепей, включаемых между выходом генератора и входом УЗКС и образующих с ней систему электромеханически связанных контуров (ЭМСК).

В статье исследованы параметры широкополосных микроактюаторов в зависимости от параметров входных электрических цепей и конструктивно-технологических параметров исходной узкополосной УЗКС. Основу широкополосного ультразвукового микроактюатора (рис. 1) составляют: узкополосная УЗКС, включающая излучающую пьезоэлектрическую 1 и отражающую 2 пластины, волновод 3; компенсирующая индуктивность L_k 4 с ее активным сопротивлением R_6 ; корректирующая емкость C_k 5 и источник питания E_T 6. В качестве излучателя использовалась пьезокермика ЦТС-19 диаметром 5 мм и толщиной 1 мм со статической емкостью $C_0 = 1000 \pm 25$ пФ при величине пьезомодуля $d_{33} = 3.3 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н. В качестве волновода могут использоваться формы образующей: однородный цилиндрический или прямоугольный стержень одинакового сечения по его длине; цилиндрические формы коническая (при коэффициенте усиления амплитуды колебаний на

излучающем торце $N=2,25$ и $4,58$), экспоненциальная ($N=5; 10$ и 15) и катеноидальная ($N=5; 10$ и 15) (рис. 1). В зависимости от формы волновода используют пьезоэлектрическую пластину прямоугольной или дисковой формы. В настоящей статье рассматриваются волноводы только конической, экспоненциальной и катеноидальной формы с указанной величиной коэффициента N . Исходная узкополосная УЗКС имела резонансную частоту продольных колебаний $f_p \sim f_2 \sim 420$ кГц. Величина механической нагрузки Z_n на торец волновода 3 (рис. 1) изменялась от нулевого до максимального значения 1000 Н·с/м. Величина механического параметра S (амплитуды перемещения, скорости колебаний) на торце волновода определялась через коэффициент электромеханического преобразования $K_{эп}$ по выражению $S = K_{эп} \cdot U_n$, где U_n – электрическое напряжение возбуждения пьезопреобразователя УЗКС. Расчет величины $K_{эп}$ производился с помощью ЭВМ с использованием полной шестиполусной эквивалентной схемы замещения реальной исходной УЗКС и параметров присоединенных реактивных L_k, C_k и активных R_6 цепей регулирования полосы пропускания. Величина коэффициента $K_{эп}$ определялась по выражению

$$K_{эп} = A_{11} Z_n + A_{12}, \quad (1)$$

где A_{11}, A_{12} – коэффициенты полной обобщенной матрицы шестиполусной эквивалентной схемы замещения УЗКС [3].

Величина электрической добротности $Q_э$, подключаемой компенсирующей индуктивности L_k , изменялась при расчетах от 10 до 500 , т. е. охватывала все возможные значения добротностей реальных электрических пассивных и активных фильтров.

Типичные АЧХ механического параметра (величины $K_{эп}$) приведены на рис. 2. Зависимость 1, соответствует АЧХ исходной узкополосной УЗКС, а зависимость 2, получена при значении подключенной индуктивности

$$L_k = L_{к0} = (4 \cdot \pi^2 \cdot C_э \cdot f_p^2)^{-1} \quad (2)$$

и является существенно неравномерной в широкой полосе частот $f_n = f_3 - f_1$ при коэффициенте электромеханической связи $K_c \geq 0,05$ [3].

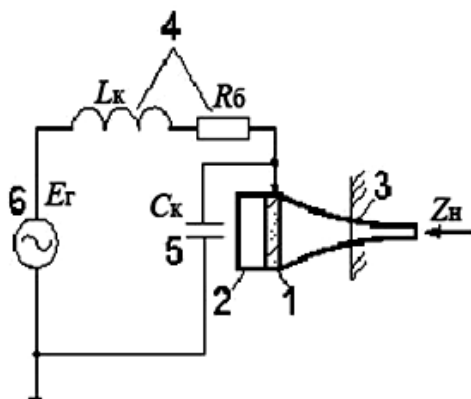


Рис. 1. Широкополосные микроактюаторы МЭМС

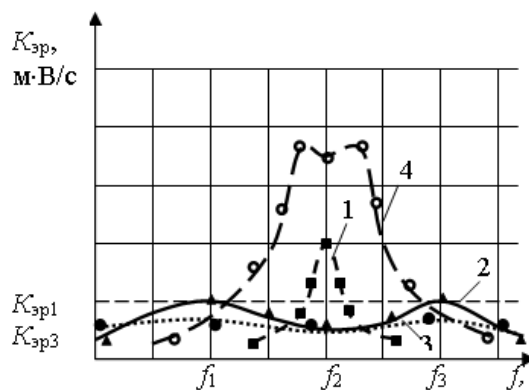


Рис. 2. АЧХ коэффициента электромеханического преобразования исходной (1) и широкополосных УЗКС (2-4) микроактюаторов МЭМС

Зависимости коэффициента $K_{эп}$ на частотах связи f_1 и f_3 от величины подключенной индуктивности L_k и механической нагрузки Z_n для УЗКС с катеноидальным волноводом ($N=5$) приведены на рис. 3. Независимо от формы волновода общие закономерности таких зависимостей следующие. С ростом полосы пропускания (увеличение значения L_k) величина коэффициента $K_{эп}$ уменьшается. Увеличение механической нагрузки Z_n и уменьшение электрической добротности $Q_э$ также снижает значение $K_{эп}$ (рис. 3). Между величиной ширины полосы пропускания $f_n = f_3 - f_1$ и величиной коэффициента $K_{эп}$ существует практически линейная зависимость,

чем шире полоса тем меньше значение коэффициента $K_{эп}$. Увеличение добротности $Q_э$ с 10 до 500 при узкой полосе пропускания приводит к росту коэффициента $K_{эп}$ в 30-40 раз, а при широкой полосе пропускания $f_{п} = 40-50$ кГц ($L_{к0} = 0,15$ мГн) коэффициент $K_{эп}$ увеличивается в 20-30 раз (зависимость 1-4).

Характерно, что зависимость коэффициента $K_{эп}$ от механической нагрузки $Z_{н}$ в сильной степени определяется формой волновода и величиной его коэффициента усиления N . Чем больше значение N , тем больше и изменение коэффициента $K_{эп}$. Среди трех форм неоднородных волноводов наиболее устойчивы при изменении механической нагрузки $Z_{н}$ широкополосные ультразвуковые микроактюаторы с коническим волноводом. Для тех же значений N , $Z_{н}$ и $Q_э$ в широкополосной УЗКС с экспоненциальным или катеноидальным волноводом изменение величины коэффициента $K_{эп}$ в 1,5-2 раза больше, чем при использовании конического волновода. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ПА и не стремиться к высоким значениям коэффициента N (реально величина N должна находиться в пределах $N = 2-5$).

Чрезвычайно важной особенностью широкополосных УЗКС на системе ЭМСК является то, что чем шире полоса пропускания тем стабильнее механические колебания при воздействиях механической нагрузки на торец волновода и дестабилизирующих различных факторов эксплуатации (зависимости 5-8, рис. 3). В целом при полосе $f_{п} = 40 - 50$ кГц ($L_{к0} = 0,15$ мГн) стабильность механических параметров в 15 – 20 раз выше, чем в исходной узкополосной УЗКС ($f_{п} = 1,0 - 1,5$ кГц ($L_{к} = 0$ мГн)). Для всех широкополосных УЗКС с различными волноводами чем меньше величина электрической добротности $Q_э$, тем выше стабильность механических колебаний. Однако при этом уменьшается энергетический к.п.д.

С ростом ширины полосы пропускания (увеличение $L_{к}$) АЧХ механических параметров (амплитуды перемещения, скорости и коэффициента $K_{эп}$) приобретает М-образный (двухгорбый) характер с минимумом указанных значений на частоте связи f_2 (зависимости 2,3, рис. 2). Основным параметром таких АЧХ является неравномерность выходных параметров в полосе пропускания, определяемая как, например, отношение величин коэффициента $K_{эп1}$ или $K_{эп3}$ на частотах связи f_1 или f_3 к коэффициенту $K_{эп2}$ на частоте связи f_2

$$A = 20 \cdot \lg (K_{эп1} / K_{эп2}) = 20 \cdot \lg (K_{эп3} / K_{эп2}). \quad (3)$$

Проведенный анализ неравномерности α АЧХ механических выходных параметров рассматриваемого круга широкополосных УЗКС микроактюаторов позволяет сделать следующие выводы. Неравномерность АЧХ повышается с увеличением ширины полосы пропускания и увеличением добротности электрического контура, с одновременным уменьшением спектральной эффективности преобразования электрической энергии в механическую в заданной полосе частот.

Для УЗКС с $Q_э = 10-30$ при полосе $f_{п} = 15 - 30$ кГц величина $\alpha \sim 0$ так, как в данном случае получают АЧХ механических колебаний с одним экстремумом (максимумом) на частоте связи f_2 . Многочисленные эксперименты показали, что для качественной работы ПА необходимо в полосе используемых частот иметь величину неравномерности $\alpha \leq 3-5$ дБ. При использовании УЗКС с различной формой волновода величина α слабо зависит от коэффициента N в режиме холостого хода ($Z_{н} \sim 0$). Если же на торец волновода воздействует нагрузка ($Z_{н} \neq 0$), то характер зависимости $\alpha = \varepsilon(f)$ определяется формой образующей волновода. Наибольшая равномерность АЧХ присуща УЗКС с коническим волноводом. Так, при увеличении механической нагрузки $Z_{н}$ до 1000 Н·с/м неравномерность изменяется на (15-20) %, что в 2,5-5 раз меньше чем в УЗКС с экспоненциальным или катеноидальным волноводом (зависимость 1,5,6, рис. 4). При увеличении механической нагрузки изменение нерав-

номерности α происходит за счет уменьшения коэффициента связи $K_{\text{эп}}$ на частотах f_1 и f_3 .

При $Z_n = 1000 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ для УЗКС с добротностью $Q_3 \geq 250$ величина α уменьшается на ~50% (зависимость 1,2, рис.4), а при $Q_3 \leq 100$ величина α уменьшается до 25 % (зависимость 3,4, рис.4). В УЗКС с коническим волноводом зависимость неравномерности АЧХ при воздействии нагрузки Z_n очень слаба (5 – 10 %) и несколько повышается при увеличении коэффициента N . Зависимость $\alpha = \varepsilon(N, Z_n)$ очень сильно выражена для УЗКС с экспоненциальным и катеноидальным волноводами (зависимость 5,6 рис. 4). Для УЗКС с последними волноводами при нагрузке $Z_n \geq 300 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$ форма АЧХ механических колебаний изменяется столь сильно, что превращается с двугорбой в одногорбую, причем чем больше величина N , тем при меньшей величине нагрузки Z_n двугорбая широкополосная АЧХ приобретает форму одногорбой АЧХ.

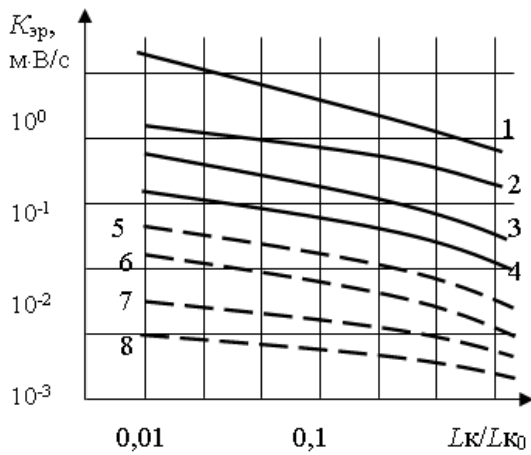


Рис.3. Зависимость величины $K_{\text{эп}}$ широкополосной УЗКС с катеноидальным волноводом от величины индуктивности L_k . 1,5; 2,6; 3,7; 4,8 - $Q_3 = 500, 100, 50$ и 10 ; 1-4 - $Z_n = 0$, 5-8 - $Z_n = 1000 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$

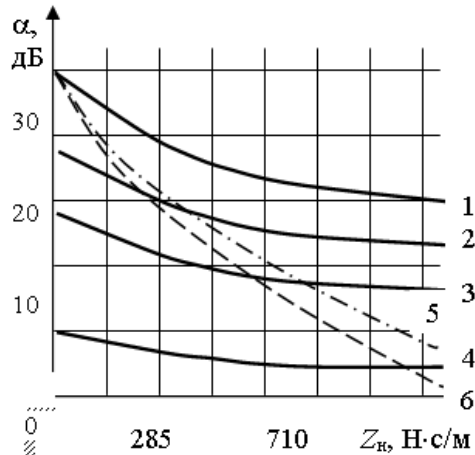


Рис. 4. Зависимость неравномерности АЧХ механической скорости широкополосных ПА с экспоненциальным волноводом от величины Z_n . 1,5,6; 2,3,4 - $Q_3 = 500, 100, 50$ и 10 ; 1-4 - $N = 5$; 5- $N = 10$ и 6- $N = 15$

Из приведенного выше анализа для широкополосных УЗКС пьезоэлектрических микроактуаторов можно предложить следующие методы коррекции (повышения) равномерности АЧХ выходных механических параметров в полосе пропускания.

1. Введение в цепь первого электрического контура системы ЭМСК последовательно с индуктивностью L_k активного сопротивления R_6 , определяемого по выражению

$$R_6 = (2 \cdot \pi \cdot L_{\text{ко}} \cdot f_2) / (f_2 / f_n). \quad (4)$$

При использовании данного метода полоса пропускания f_n остается неизменной, а равномерность повышается при увеличении сопротивления R_6 за счет одновременного уменьшения величины $K_{\text{эп}}$ только на частотах связи f_1 и f_3 при постоянной его величине на частоте f_2 . Недостаток данного метода – низкий к.п.д. из-за потерь электрической мощности на активном сопротивлении R_6 сравнимом с сопротивлением излучения УЗКС. Кроме того, амплитуда механических колебаний широкополосной УЗКС меньше, чем в исходной узкополосной без дополнительного подключения компенсирующей индуктивности $L_k = L_{\text{ко}}$.

2. Суть данного метода регулирования равномерности АЧХ выходных параметров состоит в дополнительном введении параллельно пьезопреобразователю

УЗКС корректирующей емкости C_k (рис. 1), величину которой выбирают по выражению

$$C_k = (1 / (4 \cdot \pi^2 \cdot C_3 \cdot f_p^2))^{-1} - C_3. \quad (5)$$

При противоположных изменениях величин C_k и L_k возможно регулировать форму АЧХ выходных механических параметров за счет корректировки коэффициента электромеханической связи K_c . В этом случае, с уменьшением величины компенсирующей индуктивности L_k и увеличением корректирующей емкости C_k полоса пропускания уменьшается при одновременном увеличении значения коэффициента $K_{зр}$ (зависимость 4, рис. 2). При малых значениях компенсирующей индуктивности $L_k \leq (0,05-0,25) L_{ко}$ величины выходных механических параметров существенно увеличиваются по сравнению с аналогичными параметрами узкополосной исходной УЗКС. Например, при $Q_3 \sim 30-50$ теоретически и экспериментально получено увеличение механических параметров в 3-4 раза, при этом и полоса пропускания $f_{п}$ также увеличилась в 3-4 раза. Равномерность АЧХ в полосе пропускания таких широкополосных УЗКС микроактюаторов легко регулируется и находится в пределах $\alpha \leq 0,5-2$ дБ. Увеличение выходных механических параметров при одновременном и расширении полосы пропускания обусловлено следующими обстоятельствами. В системе ЭМСК УЗКС образуется резонанс электрических напряжений, а значит на параллельно соединенных C_k и C_3 (т.е на электродах пьезокерамического преобразователя) электрическое напряжение увеличивается в несколько раз по сравнению с напряжением источника питания E_r (генератора). Безусловно спектральная мощность, потребляемая широкополосным ПА от источника, равномерна в заданном частотном диапазоне.

3. Третий метод регулирования равномерности в полосе пропускания обусловлен изменением величины пьезомодуля пьезокерамического преобразователя, т. е. изменяем величину коэффициента электромеханической связи K_c механического и электрического контуров системы ЭМСК. Собственно, изменение величины d_{ik} приводит к адекватному изменению эквивалентной механической емкости C_m пьезопреобразователя. Уменьшение величины пьезомодуля d_{33} от $3,3 \cdot 10^{-10}$ до $0,47 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н ведет почти к линейному уменьшению полосы пропускания $f_{п}$ (рис. 5,б) системы ЭМСК микроактюатора и соответственно к уменьшению величины неравномерности α (рис.5,в). Величина коэффициента электромеханического преобразования $K_{зр}$ с уменьшением пьезомодуля увеличивается на 10-50 % и тем больше, чем уже исходная полоса пропускания УЗКС (рис. 5,а). Этот неожиданный результат (ибо хорошо известно, что величина механических выходных параметров пьезопреобразователей прямо пропорциональна величине пьезомодуля d_{ik}) можно объяснить следующим образом. Действительно, уменьшение пьезомодуля ведет к соответствующему уменьшению механических выходных параметров. С другой стороны, уменьшение пьезомодуля d_{33} ведет к сужению полосы пропускания (рис. 5,б), а значит к повышению значения коэффициента $K_{зр}$ на частотах связи f_1 и f_3 . Второе условие является доминирующим, вследствие чего величина механических параметров и увеличивается частотах связи f_1 и f_3 при уменьшении пьезомодуля d_{33} и приемлемой (заданной) величине неравномерности α . Больше изменение величины коэффициента $K_{зр}$ при уменьшении пьезомодуля d_{33} имеет место при узкой полосе пропускания $f_{п} \leq 1,5$ кГц (рис. 5,а, зависимость 1,2).

Приведенные на рис. 2-5 графики позволяют в зависимости от конкретного технологического процесса использования микропьезоактюатора оптимально сконструировать их УЗКС, выбрать необходимую величину компенсирующих и корректирующих элементов L_k , $R_б$, C_k и величину пьезомодуля d_{ik} с целью получения широкополосной АЧХ выходных механических параметров. Из сравнения рассмотренных трех методов регулирования неравномерности АЧХ выходных механиче-

ских параметров широкополосных микроактюаторов для создания микроперемещений изделий второй метод (одновременное противоположное изменение величин реактивных элементов L_k и C_k) со всех точек зрения является безусловно самым предпочтительным. В некоторых практических случаях применения широкополосных пьезокерамических микроактюаторов возможно и комбинированное использование трех методов, но с возможно меньшей величиной активного резистора R_6 для второго метода.

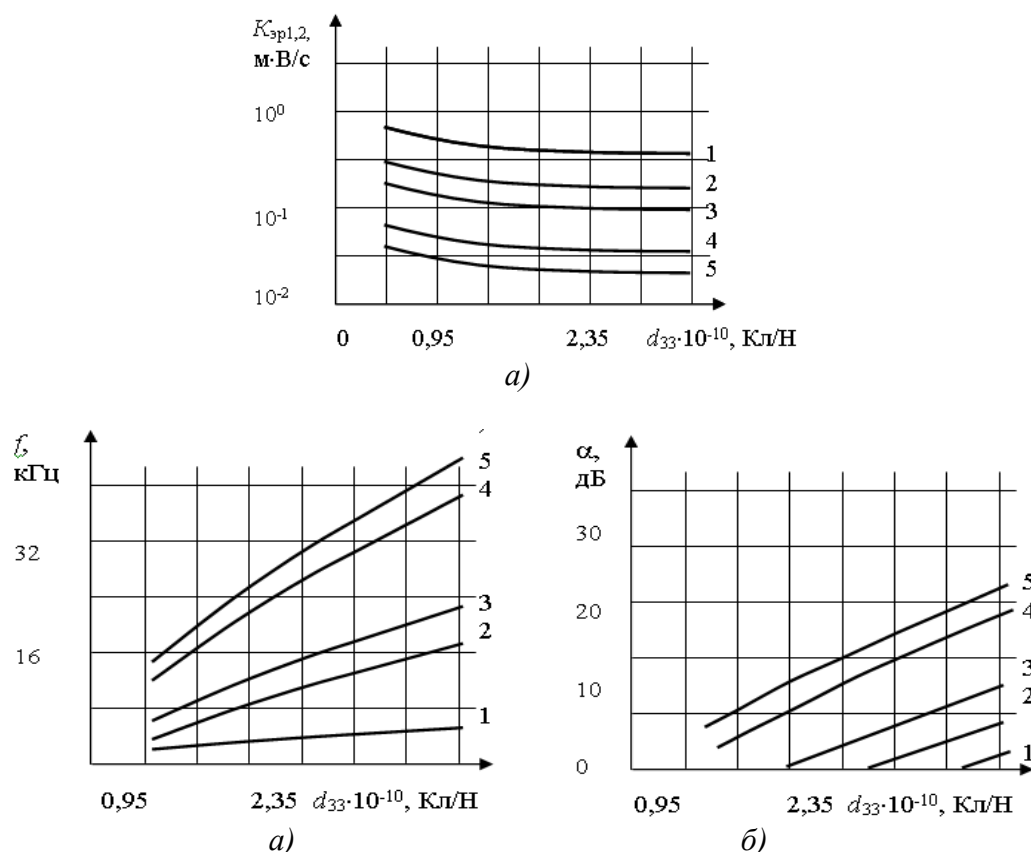


Рис. 5. Зависимость коэффициента $K_{эp}$ (а), ширины полосы пропускания f_n (б) и неравномерности α (в) от величины пьезомодуля d_{33} для широкополосной УЗКС с коническим волноводом ($N=4.58$) при $Z_n=0$, $Q_э=50$ и 1; 2; 3; 4; 5- $L_k/L_{к0}=0,01; 0,05; 0,1; 0,5$ и 1,0

При этом ширина полосы пропускания f_n ультразвуковых микроактюаторов должна, по крайней мере, в 3-4 раза превышать возможный уход резонансной частоты исходной узкополосной УЗКС при воздействии дестабилизирующих факторах их эксплуатации. В этих условиях использование широкополосных микроактюаторов будет весьма плодотворным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование электронных схем расширения полосы частот ультразвуковых систем/ В.М. Колешко, В.Я. Сунка // Известия АН БССР, сер. ФМН-1980. №1. – С.89-95.
2. В.М. Колешко, В.Я. Сунка. Авт. свид. СССР №№ 721285, 725846, 763004, 793662.
3. Домаркас, В.И., Кажис, Р.-И.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. - Вильнюс: Минтис, 1975. - 255 с.