

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЕНСОР ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ШУМОПОДОБНЫМ СИГНАЛОМ

Колешко В. М., Гулай А. В.

Modes of electroacoustic and acoustoelectric converting of random signals by piezoelectric sensor as a flat piezoelement are studied. The wave equation for distribution of mechanical shift along the thickness of the given element, taking into account the acoustic voltage (vibration radiation mode) and the controlled mechanical shift (reception mode) are presented in a form of Furier stochastic integral. The solvations of the equation have a view of the relations between spectral densities of piezoelement shift and voltage on electrodes. The dependence of the given relation (spectrum transformation coefficient) from the frequency of random signal and piezoelectric sensor parameters are analyzed.

Задачи моделирования пьезоэлектрического сенсора для контроля шумоподобным сигналом

Ряд эффективных методов контроля в различных областях техники, медицины, мониторинга основан на возбуждении и приеме случайных акустических сигналов, имеющих широкий спектр частотных составляющих. В частности, на основе введения шумоподобных акустических колебаний в различные среды разработаны методы контроля качества для технологии микросистем [1], а также способы и оборудование для диагностики в медицине [2]. Контроль осуществляется как с использованием объемных акустических колебаний, так и с помощью поверхностных акустических волн [3].

В качестве электроакустических и акустоэлектрических преобразователей для излучения и приема шумоподобных сигналов применяются пьезоэлектрические сенсоры различного конструктивно-технологического исполнения [4]. Существенной проблемой при использовании указанных колебаний является получение достаточно высокой эффективности работы пьезопреобразователя в широком диапазоне частот. Эта задача обусловлена неравномерностью спектральной характеристики пьезопреобразователя, а также наличием потерь в его материале. Необходимая для излучения пьезоэлектрическим сенсором мощность может быть достигнута за счет объединения массива автономных излучателей в интеллектуальную адаптивную решетку, концентрирующую акустические колебания в заданном направлении. Реализация данного решения требует использования интеллектуальных технологий формирования излучаемого сигнала и обработки получаемой информации.

Повышение информативности, точности, достоверности акустического контроля при введении случайных колебаний достигается за счет достаточно длительного корреляционного накопления непрерывных шумоподобных сигналов и их адаптивной фильтрации. Детализация и точность визуализации структурных аномалий контролируемых объектов существенно возрастает в случае применения фильтрации сигналов нелинейного взаимодействия акустических волн от различных источников на границах раздела сред. Алгоритм обработки принимаемых сигналов, несущих полезную информацию о качестве контролируемого объекта, в данном случае реализуется при помощи интеллектуальной системы распознавания образов.

Основными компонентами пьезоэлектрических сенсоров являются, в частности, плоские пьезоэлементы (пластины, диски, кольца), совершающие механические колебания по толщине (рис. 1). Спектральная характеристика таких элементов зависит как от параметров материала, так и от их геометрических размеров. С учетом вышеизложенного представляет значительный интерес математическое моделирование работы пьезоэлектрического сенсора в режиме излучения и приема широкополосных акустических колебаний. В частности, важной для практики задач является определение спектральных полос наиболее эффективной

работы пьезоэлектрического сенсора в режиме преобразования шумоподобного акустического сигнала [5].

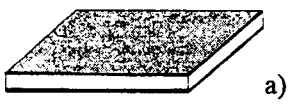

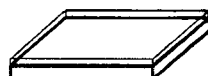

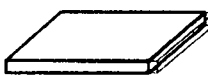






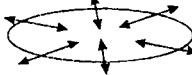
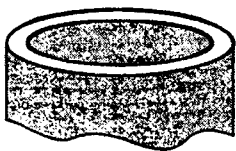

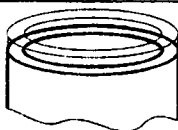

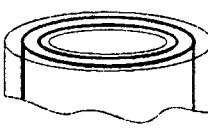
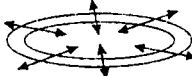
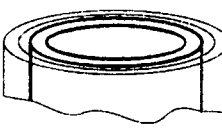
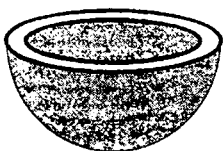
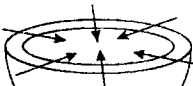
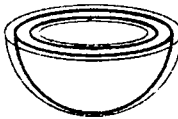


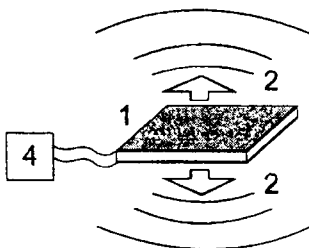
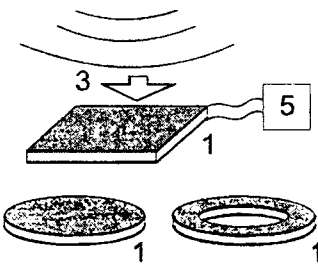
| | Конструкция | Поляризация | Деформация | Колебания |
|---|---|--|---|---|
| Плоский |  а) |  |  |  |
| | | |  |  |
| |  б) |  |  |  |
| | | |  |  |
| Цилиндрический |  в) |  |  |  |
| | | |  |  |
| | | |  | |
| Сферический |  г) |  |  |  |
| | | |  | |
|  д) | |  е) | | |

Рис. 1. Конструкции пьезоэлектрического сенсора (а-г) и его работа в режиме излучения (д) и приема (е) шумоподобных акустических сигналов:
 1 – пьезоэлектрический элемент; 2, 3 – излучаемый и принимаемый акустический сигнал; 4 – электронная система возбуждения шумоподобного сигнала; 5 – схема обработки принимаемого шумоподобного сигнала

Следует отметить, что для возбуждения случайных акустических колебаний пьезоэлектрических сенсоров разработана гамма шумовых ультразвуковых генераторов с различной шириной спектра выходного электрического напряжения [6]. Генерация электрического шума производится, например, за счет лавинного пробоя $p-n$ перехода полупроводникового прибора при его обратном включении. В задающих каскадах генераторов применяются также ферромагнитные элементы, в которых происходит скачкообразное смещение границ доменов при медленном перемагничивании. Достаточно мощные генераторы шума для возбуждения пьезоэлектрических элементов выполняются на основе формирования случайной и псевдослучайной последовательности импульсов.

Излучение шумоподобного акустического сигнала с помощью пьезоэлектрического сенсора

При подаче на пьезоэлектрический сенсор электрического сигнала сила, вызывающая продольные механические колебания по толщине, существует только на основаниях пьезоэлемента, при этом возникающее акустическое давление равно:

$$P_z(z, t)|_{z=0} = -d_{33}\mu E_z(z, t)|_{z=0} = -d_{33}\mu U(t)/d, \quad (1)$$

где d_{33} – пьезомодуль; μ – модуль упругости; $E_z(z, t)$ – компонента напряженности возбуждающего электрического поля вдоль координаты z , перпендикулярной плоскости пьезоэлемента; $U(t)$ – возбуждающее электрическое напряжение; t – время; d – толщина пьезоэлемента [7].

Электрическое напряжение широкого спектра частот можно представить в виде стохастического интеграла Фурье

$$u_z(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_z(z, \omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2)$$

при этом спектр Фурье электрического напряжения в пьезоэлементе $U_z(z, \omega)$ интерпретируется как обобщенная случайная вектор-функция частоты ω , удовлетворяющая соотношению

$$\langle U_z^*(z, \omega) U_z(z, \omega') \rangle = S_{u_z}(z, \omega) \delta(\omega - \omega'), \quad (3)$$

где $\delta(\omega - \omega')$ – дельта-функция; $S_{u_z}(z, \omega)$ – спектральная плотность электрического напряжения (здесь и далее звездочкой обозначена комплексно-сопряженная величина).

Используя известную зависимость между деформацией и акустическим давлением [8], можно записать

$$\partial \xi_z(z, t) / \partial z = d_{33} u_z(z, t) / d, \quad (4)$$

где $\xi_z(z, t)$ – механическое смещение пьезоэлемента вдоль координаты z . Подставляя (2) в (4) получим выражение для механического смещения в виде:

$$\xi_z(z, t) = d_{33} / d \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} U_z(z, \omega) e^{j\omega t} d\omega dz = \int_{-\infty}^{+\infty} \Xi_z(z, \omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (5)$$

где $\Xi_z(z, \omega)$ – функция спектра Фурье механического смещения пьезоэлемента, удовлетворяющая соотношению

$$\langle \Xi_z^*(z, \omega) \cdot \Xi_z(z, \omega') \rangle = S_{\xi_z}(z, \omega) \cdot \delta(\omega - \omega'), \quad (6)$$

$S_{\xi_z}(z, \omega)$ – спектральная плотность механического смещения.

В приведенном выше анализе частотной зависимости механического смещения учтено влияние только одного основания пьезоэлемента на процесс возбуждения акустических колебаний, в данном случае не учитывалось распространение колебаний от этого основания по толщине пьезоэлемента, а также отражение колебаний от другого основания. Чтобы установить распределение механического смещения по толщине пьезоэлемента, решалось волновое уравнение, которое для пьезоэлемента с учетом акустических потерь имеет вид:

$$\rho \partial^2 \xi_z(z, t) / \partial t^2 = \bar{\mu} \partial^2 \xi_z(z, t) / \partial z^2 \quad (7)$$

при граничных условиях:

$$S_{u_z}(z, \omega) |_{z=0} = -S_{u_z}(z, \omega) |_{z=d} = S_u(\omega). \quad (8)$$

Здесь ρ – плотность материала; $\bar{\mu} = \mu + j\omega\eta$ – эффективный модуль упругости среды с потерями; η – эффективная вязкость среды.

Решение уравнения (7) при граничных условиях (8) и с учетом выражения (5) позволяет определить спектр Фурье механического смещения пьезоэлемента:

$$\Xi_z(z, \omega) = d_{33} U(\omega) \sin(\bar{k}(z - d/2)) / \bar{k}d \cos(\bar{k}d/2), \quad (9)$$

где $\bar{k} = \omega(\bar{\mu} / \rho)^{-1/2}$ – обобщенное волновое число, являющееся комплексной величиной при учете потерь: $\bar{k} = k - j\alpha$; $k = \omega/c$ – волновое число для среды без потерь: c – скорость распространения акустических колебаний в пьезоэлементе; α – коэффициент поглощения акустических колебаний в материале пьезоэлемента, связанный с эффективной вязкостью среды.

Учитывая (6), получим выражение для спектральной плотности механического смещения в следующем виде:

$$S_{\xi_z}(z, \omega) = A \left\{ \sin^2[k(z - d/2)] + \text{sh}^2[\alpha(z - d/2)] \right\}, \quad (10)$$

где $A = S_u(\omega) d_{33}^2 / d^2 (k^2 + \alpha^2) [\cos^2(kd/2) + \text{sh}^2(\alpha d/2)]$.

Поскольку значение коэффициента поглощения α для наиболее широко распространенных пьезоэлектрических материалов, например, пьезокерамики, значительно меньше волнового числа k , с достаточной степенью точности можно записать выражение для спектральной плотности механического смещения без учета акустических потерь в материале пьезоэлемента:

$$S_{\xi_z}(z, \omega) |_{\alpha=0} = B \sin^2(k(z - d/2)), \quad (11)$$

где $B = S_u(\omega)d_{33}^2/k^2d^2 \cos^2(kd/2)$. Выражения (10), (11) характеризуют распределение спектральной плотности механического смещения по толщине пьезоэлемента в первоначальный момент после приложения к электродам шумоподобного электрического напряжения.

С течением времени спектральная плотность механического смещения в любой точке вдоль оси пьезоэлемента будет определяться суммой парциальных частотных составляющих спектра шумовых колебаний, возникающих на основаниях пьезоэлемента $z = 0$ и $z = d$, многократно прошедших по объему преобразователя и отразившихся от его оснований. Без учета потерь в материале пьезоэлемента сумма парциальных частотных составляющих спектра колебаний, возникающих у разных оснований пьезоэлемента, дает узел в точке $z = (d/2)$ ($S_{\xi_z}(z, \omega)|_{z=d/2} = 0$) с установлением в пьезоэлементе режима стоячей волны. Например, в результате однократного отражения колебаний от оснований пьезоэлемента спектральная плотность механического смещения равна:

$$S_{\xi_z}(z, \omega)|_{\alpha=0} = 2B \sin^2(k(z-d/2)). \quad (12)$$

Анализируя аналогичным образом результирующие значения спектральной плотности механического смещения после двух, трех и большего числа отражений, можно сделать вывод, что и при многократном суммировании спектров отраженных колебаний в пьезоэлементе в точке $z = d/2$ существует обязательный узел.

Рассмотренный режим излучения акустических колебаний пьезопреобразователя характерен при симметричной механической нагрузке со стороны обоих оснований без учета затухания в материале преобразователя. На практике обычно одна сторона плоского пьезоэлемента граничит со средой или материалом, в котором возбуждаются акустические колебания, а другая – с демпфером или отражающей накладкой, что приводит к возникновению режима бегущей волны. Однако, учитывая, что амплитуда частотных составляющих спектра бегущих волн много меньше амплитуды частотных составляющих спектра стоячих колебаний, для анализа реального режима работы пьезопреобразователя с достаточной степенью точности применимы выражения для спектральной плотности механического смещения (10), (11).

Используя выражения (5) и (9), можно найти распределение акустического давления по толщине пьезоэлемента $p_z(z, t) = \mu \sigma_z(z, t) = \mu \partial \xi_z(z, t) / \partial z$, где $\sigma_z(z, t)$ – механическая деформация. Спектральная плотность акустического давления в пьезоэлементе равна:

$$S_{p_z}(z, \omega) = A\mu^2(k^2 + \alpha^2) \{ \cos^2[k(z-d/2)] + \text{sh}^2[\alpha(z-d/2)] \}, \quad (13)$$

или без учета акустических потерь:

$$S_{P_z}(z, \omega)|_{\alpha=0} = B\mu^2k^2 \cos^2(k(z-d/2)). \quad (14)$$

Для проведения анализа эффективности возбуждения пьезопреобразователем широкополосных акустических колебаний введем понятие коэффициента трансформации спектра, равного отношению спектральных плотностей колебательного смещения основания пьезоэлемента и электрического напряжения на электродах:

$$\Psi_{\xi/u} = S_{\xi_z}(z, \omega) / S_U(\omega)d_{33}^2. \quad (15)$$

Подставив в (15) значение $S_{\xi_z}^i(z, \omega)$ из (10), получим:

$$\Psi_{\xi/u} = \left[\sin^2(kd/2) + \text{sh}^2(\alpha d/2) \right] / d^2 (k^2 + \alpha^2) \left[\cos^2(kd/2) + \text{sh}^2(\alpha d/2) \right], \quad (16)$$

или без учета потерь:

$$\Psi_{\xi/u} |_{\alpha=0} = (1/d^2 k^2) \text{tg}^2(kd/2). \quad (17)$$

Результаты расчета коэффициента трансформации спектра для разных значений kd (частоты колебаний, скорости распространения, толщины пьезоэлемента) в случае $\alpha = 0$ представлены на рис. 2. В качестве примера здесь же показана дополнительная шкала частот для пьезоэлектрического преобразователя из пьезокерамики ЦТС-19 ($c \approx 3,3 \cdot 10^3$ м/с) толщиной 0,001 м. Эффективность излучения пьезопреобразователем акустических колебаний широкого спектра максимальна вблизи значений $kd = (2n - 1)\pi$, которые соответствуют нечетным гармоническим составляющим основной резонансной частоты пьезоэлемента $f_n = c(2n - 1)/(2d)$, где $n = 1, 2, 3, \dots$ Для сенсора на основе пьезокерамики ЦТС-19 эти частоты равны 1,65; 4,94; 8,23, ... МГц. Следует отметить, что по мере увеличения параметра kd полоса эффективного возбуждения шумоподобных колебаний значительно сужается.

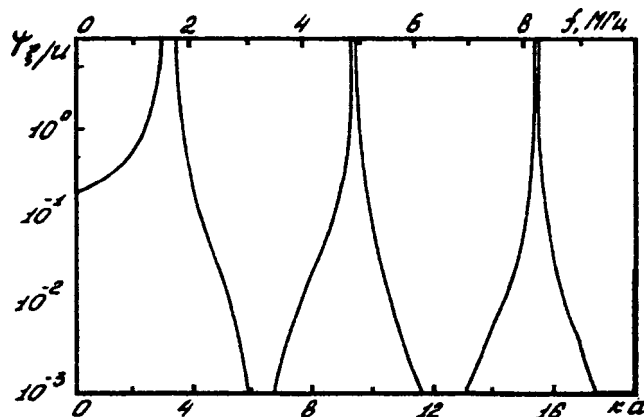


Рис. 2. Зависимость коэффициента трансформации спектра пьезоэлектрического сенсора от частоты колебаний и параметров пьезоэлемента при возбуждении шумоподобного акустического сигнала

Отсутствие эффективного возбуждения акустических колебаний вблизи четных гармонических составляющих основной резонансной частоты можно объяснить следующим образом. В данном режиме силы, вызывающие механические колебания, действуют на оба основания пьезоэлемента с электродами, так как на них происходит электромеханическое преобразование. При этом четные гармонические составляющие в пьезоэлементе существовать не могут, поскольку на этих частотах волны, возникшие на разных основаниях, гасят друг друга.

Режим приема пьезоэлектрическим сенсором шумоподобного акустического сигнала

При анализе работы пьезопреобразователя в режиме приема будем считать, что акустические колебания, распространяющиеся во внешней среде, действуют только на одно из его

оснований ($z = 0$). Для установления распределения механического смещения по толщине пьезоэлемента решаем волновое уравнение (7) с граничными условиями

$$\left. \begin{aligned} \xi_z(z, t)|_{z=0} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \Xi_z(0, \omega) e^{j\omega t} d\omega, \\ (\partial \xi_z(z, t) / \partial z)|_{z=d} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где $\Xi_z(0, \omega)$ – функция спектра Фурье возникающего механического смещения основания пьезоэлемента, удовлетворяющая условию:

$$\langle \Xi_z^*(0, \omega) \Xi_z(0, \omega') \rangle = S_{\xi_z}(0, \omega) \delta(\omega - \omega'), \quad (19)$$

$S_{\xi_z}(0, \omega)$ – спектральная плотность механического смещения основания пьезоэлемента.

Решение волнового уравнения (7) позволяет определить распределение спектральной плотности механического смещения по толщине пьезоэлемента в режиме приема:

$$S_{\xi_z}(z, \omega) = C[\cos^2(k(z-d)) + \text{sh}^2(\alpha(z-d))], \quad (20)$$

где $C = S_{\xi_z}(0, \omega) / [\cos^2(kd) + \text{sh}^2(\alpha d)]$. Без учета акустических потерь в материале пьезоэлемента выражение (20) имеет вид:

$$S_{\xi_z}(z, \omega)|_{\alpha=0} = D \cos^2(k(z-d)), \quad (21)$$

где $D = S_{\xi_z}(0, \omega) / \cos^2(kd)$.

Расчитаем электрическое напряжение $U(t)$, возникающее на электродах пьезоэлемента в первоначальный момент после воздействия на одно из оснований акустических колебаний внешней среды. Для этого используем уравнение пьезоэффекта для одномерного случая [9]:

$$E_z(z, t) = \varepsilon_0 \varepsilon D_z(z, t) - h_{33} \sigma_z(z, t), \quad (22)$$

где $D_z(z, t)$ – компонента электрического смещения вдоль координаты z ; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная; h_{33} – пьезоконстанта. Учитывая, что $D_z(z, t)$ равно поверхностной плотности свободных зарядов, а за счет пьезоэффекта на электродах преобразователя возникают связанные заряды, в данном случае принимаем $D_z(z, t) = 0$. Проинтегрировав уравнение (22) по z от 0 до d , получим выражение для определения электрического напряжения на электродах пьезоэлемента:

$$U(t) = h_{33} [\xi_z(z, t)|_{z=d} - \xi_z(z, t)|_{z=0}]. \quad (23)$$

Переходя к спектральной плотности электрического напряжения, получим:

$$S_u(\omega) = Ch_{33}^2 (\text{ch}(\alpha d) - \cos(kd))^2, \quad (24)$$

или без учета акустических потерь:

$$S_u(\omega)|_{\alpha=0} = 4Dh_{33}^2 \sin^4(kd/2). \quad (25)$$

Как источник электрических сигналов пьезоэлектрический сенсор в режиме приема аналогичен конденсатору, емкость которого равна емкости заторможенного пьезоэлемента C_0 . Учитывая это, можно найти ток $J(t) = C_0 \partial U(t) / \partial t$, а также спектральную плотность тока $S_J(\omega)$, протекающего через пьезопреобразователь в режиме короткого замыкания:

$$S_J(\omega) = -Ch_{33}^2 \omega^2 (\text{ch}(\alpha d) - \cos(kd))^2. \quad (26)$$

Без учета потерь выражение (26) упрощается:

$$S_J(\omega)|_{\alpha=0} = -4Dh_{33}^2 \omega^2 \sin^4(kd/2). \quad (27)$$

С целью анализа эффективности процесса приема широкополосных акустических колебаний определим коэффициент трансформации спектра, равный отношению спектральной плотности электрического напряжения, возникающего на электродах, к спектральной плотности колебательного смещения основания пьезоэлемента:

$$\psi_{u/\xi} = S_u(\omega) / S_{\xi Z}(0, \omega) h_{33}^2. \quad (28)$$

Подставив в (28) значение $S_u(\omega)$ из (24), получим:

$$\psi_{u/\xi} = [(\text{ch}(\alpha d) - \cos(kd))^2] / [\cos^2(kd) + \text{sh}^2(\alpha d)], \quad (29)$$

или без учета акустических потерь:

$$\psi_{u/\xi}|_{\alpha=0} = 4 \sin^4(kd/2) / \cos^2(kd). \quad (30)$$

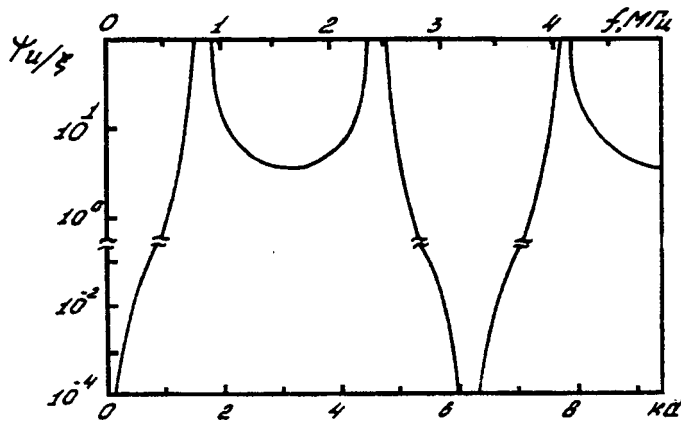


Рис. 3. Зависимость коэффициента трансформации спектра пьезоэлектрического сенсора от частоты колебаний и параметров пьезоэлемента в режиме приема шумоподобного акустического сигнала

Результаты расчета значений $\psi_{u/\xi}$ при разных kd для случая $\alpha = 0$ приведены на рис. 3, здесь же показана дополнительная шкала частот для конкретных параметров пьезоэлемента (ЦТС-19; $c \approx 3,3 \cdot 10^3$ м/с; $d = 0,001$ м). Эффективность приема пьезопреобразователем акустических колебаний широкого спектра частот максимальна вблизи значений $kd = (2n-1)\pi/2$, которые соответствуют частотам $f_n = c(2n-1)/4d$. Для пьезоэлемента, рассматриваемого в качестве примера, эти частоты составляют 0,82; 2,47; 4,11, ... МГц. Отличия режима приема от условий возбуждения объясняются тем, что в режиме приема сила, вызывающая акустические колебания, действует только на одно основание пьезоэлемента, граничащее со средой, из которой приходит шумоподобный акустический сигнал, в то время как излучение колебаний происходит симметрично обеими плоскостями пьезоэлемента.

Заключение

Таким образом, проведено моделирование режимов возбуждения и приема пьезоэлектрическим сенсором шумоподобных акустических колебаний. Решено волновое уравнение для плоского пьезоэлемента в случае представления электрического напряжения на его электродах (режим возбуждения) и механического смещения его основания (режим приема) в виде стохастического интеграла Фурье. Определены коэффициенты трансформации спектра широкополосных акустических колебаний в указанных режимах в зависимости от параметров пьезопреобразователя и частоты колебаний. Установлены частотные полосы наиболее эффективного возбуждения и приема шумоподобных акустических сигналов с помощью пьезоэлектрического сенсора. С учетом полученных результатов анализа работы пьезоэлектрического элемента в режиме преобразования широкополосных сигналов производится моделирование интеллектуальных систем распознавания образов для контроля, диагностики, мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко, В. М., Гулай, А. В. и др. Авт. свид. СССР № 1276465, 1311887, 1441462.
2. Колешко, В. М., Гулай, А. В. и др. Авт. свид. СССР № 1567203, 1711888, 1801463.
3. Колешко, В. М., Гулай, А. В. и др. Авт. свид. СССР № 605170, 658468, 842567, 879448, 1262317, 1291829.
4. Колешко, В. М., Гулай, А. В. и др. Авт. свид. СССР № 605118, 1731493.
5. Колешко, В. М., Гулай, А. В. Излучение и прием пьезопреобразователем акустического шума // XVII Российская научно-техническая конференция с международным участием «Неразрушающий контроль и диагностика». Сборник тезисов докладов, Екатеринбург, 5–11 сент. 2005 г. – Екатеринбург, 2005. – С. 68.
6. Колешко, В. М., Гулай, А. В. и др. Авт. свид. СССР № 1058743, 1232436, 1276369, 1538382, 1650148, 1695945, 1803148.
7. Королев, М. В. и др. О работе резонансных пьезопреобразователей в режиме излучения и приема // Дефектоскопия. – № 12. – 1981. – С. 42–59.
8. Лепендин, Л. Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
9. Свердлин, Г. М. Прикладная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1976. – 280 с.