

Данный экспериментальный анализ проводится в рамках разработки образовательного контента по дисциплине «Системы искусственного интеллекта».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обзор классических методов сегментации <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2005/kita/tribrat/diss/index.htm>
2. Родзин, С.И. Интеллектуальные системы. Проблемы и перспективы создания единой концепции гибридных эволюционных вычислений / С.И. Родзин [и др.]. – М.: Физматлит, 2005. – С. 76-94.
3. Bhanu, B. and Lee, S. 1994, Genetic learning for adaptive image segmentation, Kluwer Academic Press.
4. Shafer, S. and Kanade, T., 1982, “Recursive Region Segmentation by Analysis of Histograms”, Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 1166-1171.
5. Bhanu, B., Lee, S. and Ming, J., 1995, “Adaptive Image Segmentation using a Genetic Algorithm”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 25(12), pp. 1543-1567.
6. Yoshimura, M. and Oe, S., 1999, “Evolutionary Segmentation of Texture Image using Genetic Algorithms towards Automatic Decision of Optimum Number of Segmentation Areas”, Pattern Recognition 32, pp. 2041-2054.
7. Bhandarkar, S.M., Zhang, Y. and Potter, W.D., 1994, “An Edge Detection Technique using Genetic Algorithm-based Optimisation”, Pattern Recognition 27(9), pp. 1159-1180.
8. Chun, D.N. and Yang, H.S., 1996, “Robust Image Segmentation using Genetic Algorithm with a Fuzzy Measure”, Pattern Recognition 29(7), pp. 1195-1211.

М.В. Богуш, Э.М. Пикалев

АНАЛИЗ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Пьезоэлектрические датчики давления широко используются в различных областях науки и техники для контроля акустических, быстропеременных и импульсных давлений. Они обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, широкими динамическими и частотными диапазонами, малыми размерами, высокой надежностью, не требуют источников питания.

Однако методы расчета их характеристик развиты недостаточно. Это затрудняет проектирование пьезоэлектрических датчиков с заданными параметрами.

Целью настоящей работы является совершенствование методов расчета характеристик пьезоэлектрических датчиков быстропеременного давления, в том числе собственной частоты, функции преобразования к измеряемому параметру, а также вибрационной и деформационной чувствительности в зависимости от геометрии и свойств материалов его конструк-

тивных элементов. Цель достигается за счет анализа датчика с помощью численных методов теории упругости как единого пространственного электроупругого тела (а не совокупности отдельных конструктивных элементов).

Аналитические методы расчета характеристик

Рассмотрим наиболее распространенный тип датчика давления с чувствительным элементом, работающим на деформации растяжение-сжатие на продольном пьезоэффекте. Базовая конструкция датчика показана на рис.1 [1,2].

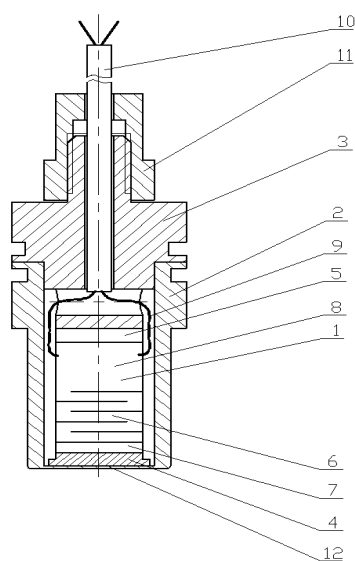


Рис. 1. Конструкция датчика давления

Датчик выполнен на основе модульного многослойного пьезоэлемента (ПЭ) 1, который размещен в корпусе 2 между основанием 3 и пятой 4 и поджат к мембране 12. ПЭ содержит несколько активных слоев 6, электроизолятор 7 и основание 8, в которое вмонтированы проволочные токо-съемники 9, соединенные с кабелем 10.

Измеряемое переменное давление с помощью мембраны преобразуется в усилие, действующее на ПЭ, который генерирует заряд, поступающий через кабель и согласующий усилитель в систему обработки информации.

Информативность пьезоэлектрических датчиков характеризуется динамическим и частотным диапазонами, основной (лабораторной) погрешностью и дополнительными погрешностями, обусловленными действием влияющих факторов. Верхняя и нижняя границы динамического диапазона пьезоэлектрических датчиков ограничены соответственно прочностью или нелинейностью свойств конструктивных элементов (пьезоматериала, мембраны и др.) и шумами усилителя [2-6].

Частотный диапазон определяется снизу постоянной времени электрических цепей, а сверху, с погрешностью 5% - одной пятой от резонансной частоты механической системы [6,7]. Отметим, что из-за релаксации заряда на низких частотах пьезоэлектрические датчики генераторного типа не пригодны для измерения статических механических параметров.

Рассматривая датчик как совокупность элементарных преобразователей (мембрана, ПЭ и электрическая цепь), функцию преобразования измеряемого давления P в напряжение на входе усилителя φ_0 для частот низких по сравнению с частотой резонанса датчика представляют в виде [4]:

$$\varphi_0 = \frac{n d_{33} R \omega}{\sqrt{1 + R^2 C^2 \omega^2}} L_{эфф} P, \quad (1)$$

где d_{33} – продольный пьезомодуль керамического материала, n – число активных слоев ПЭ, $L_{эфф}$ – эффективная площадь мембраны датчика, ω – круговая частота механического процесса, R и C – сопротивление и емкость электрических цепей [5].

$$L_{эфф} = \pi \left(\frac{r + r_0}{2} \right)^2, \quad (2)$$

где r – радиус мембраны, r_0 – радиус пяты, подпирающей мембрану.

Отметим, что в формулах (1), (2) элементы конструкции датчика рассматриваются в рамках одномерных моделей напряженного состояния, которые позволяют в простейших случаях получать удовлетворительное согласие с экспериментом.

Если электрические цепи датчика подобраны таким образом, чтобы во всем диапазоне рабочих частот выполнялось соотношение $R^2 C^2 \omega^2 \gg 1$, формула (1) упрощается и становится частотно независимой:

$$\varphi_0 = \frac{n d_{33}}{C} L_{эфф} P. \quad (3)$$

Важнейшей характеристикой датчиков давления наряду с чувствительностью к измеряемому параметру является его устойчивость к помехам – к механическим вибрациям и деформациям объекта, на котором он закреплен. При упрощенных оценках вибрационную чувствительность датчика давления K_a можно представить в виде [5]:

$$K_a = \frac{\varphi_{вых}}{a} = \frac{d_{33} \cdot n \cdot m_{ин}}{C}, \quad (4)$$

где $m_{ин}$ – инерционная масса датчика, a – амплитуда виброускорения, n – количество активных слоев в ПЭ.

Считается, что инерционная масса определяется массой всех элементов конструкции, расположенных выше центра тяжести ПЭ.

$$m_{ин} = \frac{n}{2} m_{пэ} + m_n + m_m, \quad (5)$$

где $m_{пэ}$, m_n , m_m – соответственно масса ПЭ, пяты и мембраны.

Вибрационный $W_{ар}$ и деформационный $W_{сп}$ эквиваленты датчика давления определяются по формулам:

$$W_{ap} = K_a/K_p, \quad W_{Sp} = K_S/K_p, \quad (6)$$

где K_p, K_a, K_S – соответственно коэффициенты преобразования датчика к измеряемому давлению, вибрации и деформации объекта вдоль оси датчика.

Резонансные частоты и деформационную чувствительность пьезоэлектрических датчиков в общем случае можно определить только с помощью численного моделирования.

Численные методы расчета характеристик

Используя метод конечных элементов и программный пакет ANSYS, рассмотрим геометрическую модель датчика, показанную на рис. 2.



Рис. 2. Геометрическая модель датчика давления

Благодаря осевой симметрии датчика, задача может решаться как двумерная. На рис. 2 показана половина осевого разреза датчика. Области геометрической модели разбиваются на конечные элементы. Конечноэлементная модель содержит около 11000 конечных элементов.

В зависимости от назначения датчика в конструкции могут использоваться различные материалы: пьезокерамика ЦТС-83Г или НТВ-1 (ПЭ); сталь нержавеющая 12Х18Н10Т или ЭИ826 (корпус); электроизоляторы из неполяризованной керамики ЦТС-83Г или НТВ-1. Характеристики конструкционных и пьезоэлектрических материалов заимствованы из работ [2,8].

В математической модели датчик рассматривается как единое кусочно-однородное тело, состоящее из сред с различными свойствами [2].

Каждая среда описывается уравнением движения

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial r_i} = \rho \dot{u}_i + \zeta \rho \ddot{u}_i. \quad (7)$$

В случае изотропной среды при изотермических условиях используются также обобщенный закон Гука и соотношения Коши:

$$\sigma_{ik} = \frac{E}{1+\nu} \left[(S_{ik} + \xi \dot{S}_{ik}) + \frac{\nu}{1-2\nu} (S_{ii} + \xi \dot{S}_{ii}) \delta_{ik} \right], \quad (8)$$

$$S_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial r_k} + \frac{\partial u_k}{\partial r_i} \right). \quad (9)$$

Пьезоэлектрическая анизотропная среда наряду с уравнением движения описывается уравнениями прямого и обратного пьезоэффекта и вынужденной электростатики:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} + \xi c_{ijkl}^E \dot{S}_{kl} - e_{lij} \mathcal{E}_l; \quad (10)$$

$$D_i = e_{ijk} S_{jk} + \varepsilon_{ij}^S \mathcal{E}_j;$$

$$\mathcal{E} = -\text{grad}\varphi; \quad \text{div}D = 0. \quad (11)$$

В выражениях (7) – (11) и далее используются следующие обозначения: ρ – плотность среды, σ – тензор механических напряжений, u – вектор перемещений, r – радиус вектор в пространстве, S – тензор деформаций, P – давление, D – вектор индукции электрического поля, \mathcal{E} – вектор напряженности электрического поля, φ – электростатический потенциал, c^E – модули упругости материала, e – пьезоэлектрические модули, ε^S – диэлектрические константы, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, ζ и ξ – коэффициенты, введенные для описания затухания в твердых средах по Рэлею (фактически, вязкоупругие потери).

Граничные условия учитывают то, что датчик закреплен на объекте с помощью свертного штуцера:

- на наружные поверхности действует гармоническое давление ΔP ;
- на закрепленных торцах основания и корпуса механические смещения равны нулю;
- прочие поверхности датчика свободны от напряжений;
- ток между электродами ПЭ равен нулю (условия холостого хода) либо разность потенциалов между электродами равна нулю (условия короткого замыкания);
- на боковых (без электродов) поверхностях ПЭ электрические заряды отсутствуют.

Между деталями датчика выполняются условия непрерывности всех полевых механических и электрических параметров.

Результаты расчетов и эксперимент

Расчеты проводились для базового исполнения датчиков 018 и 019, выпускаемых мелкими сериями, что позволило провести сравнение расчетных значений с опытными данными. Результаты расчета коэффициента

преобразования давления в заряд K_p , собственной частоты f_0 , и виброэквивалента W_{ap} датчиков 018 и 019, сведены в таблицу. Там же приведены и экспериментальные значения параметров, полученные на партиях датчиков от 20 до 100 шт.

Таблица

Методы оценки	Тип датчика	Толщина мембраны, мм	Параметры			
			f_{01} кГц	K_p пКл/кПа	K_a пКл/м/с ²	W_{ap} Па/м/с ²
Расчет	018	0,1	62,07	65,5	1,78	25,4
Эксперимент			-	73	-	-
Отклонение, %			-	10	-	-
Расчет	018	0,25	68,32	59,6	1,55	26,1
Эксперимент			67,5	55	1,39	23,7
Отклонение, %			1,8	6,8	10	9,1
Расчет	019	0,25	73,03	3,83	0,138	36,2
Эксперимент			70,2	4,0	-	-
Отклонение, %			3,8	4,2	-	-

Датчики 018 и 019 идентичны по конструкции, но отличаются применяемыми материалами, чувствительностью и термостойкостью. Конструктивные особенности, технические характеристики и области применения этих датчиков подробно описаны в работе [2].

Из таблицы следует, что расчетные и экспериментальные значения хорошо согласуются между собой. Отличие для резонансной частоты не превышает 4%, для коэффициента преобразования и виброэквивалента - 10%. По-видимому, разброс расчетных и экспериментальных данных связан с вариацией параметров пьезокерамических материалов в различных технологических партиях.

Отметим отличие расчетных и экспериментальных данных K_p для датчиков 018 с мембраной толщиной 0,1 и 0,25 мм при прочих равных условиях. Естественно предположить, что в данном случае изменилась эффективная площадь мембраны. Однако согласно формуле (2) толщина мембраны не влияет на ее эффективную площадь. Для выяснения этого вопроса расчетным путем в рамках конечно-элементной модели исследовано относительное изменение эффективной площади мембраны от ее толщины и радиуса пяты.

Семейство кривых, полученное в рамках более точной численной модели и показанное на рис. 3, свидетельствует о том, что зависимость $L_{эфф}$ от радиуса пяты для мембран с реальной толщиной имеет ярко выраженный максимум при $r_0/r \approx 0,7$ и чем больше толщина мембраны, тем меньше пик. Этим и объясняется отличие расчетных и экспериментальных данных для K_p датчиков с различной толщиной мембраны. Только для бесконечно тонкой мембраны с $r/h_m > 100$, зависимость $L_{эфф}$ от радиуса пяты становится монотонной и близкой к формуле (2).

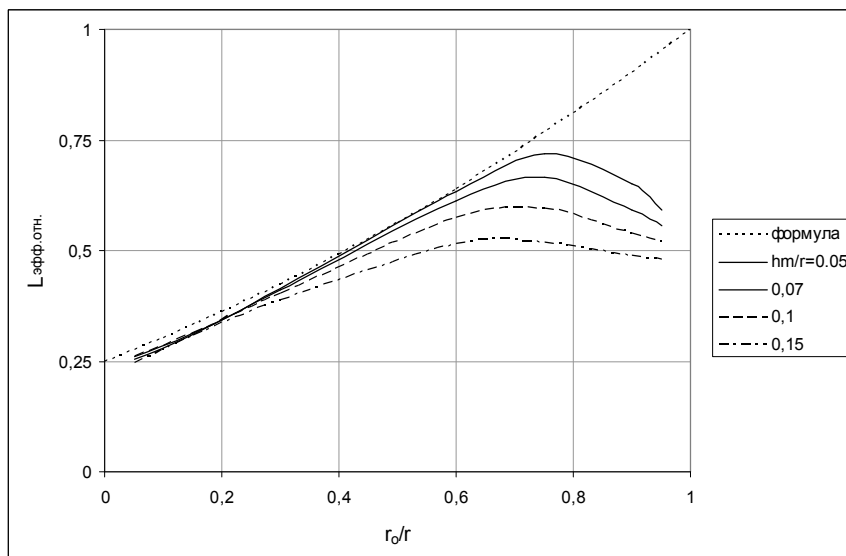


Рис. 3. Изменение эффективной площади мембраны от радиуса пяты и толщины мембраны

Как показал модальный анализ, основная (первая) мода собственных колебаний датчика связана с продольными (поршневыми) колебаниями системы мембрана-пята-пьезоэлементы при относительной неподвижности корпуса и основания датчика. На рис. 4 приведен ряд кривых относительных изменений частоты f_o от радиуса пяты, рассчитанных для различных значений толщины мембраны h_m/r (за исходную принята частота базового исполнения датчика 018 ($h_m/r = 0,07$, $r_o/r = 0,764$)).

Из рис. 4 видно, что для малых размеров пяты ($r_o/r < 0,7$) при уменьшении толщины мембраны, относительно базовой, собственная частота датчика убывает, а при увеличении толщины мембраны – возрастает. Однако по мере увеличения радиуса пяты при $r_o/r > 0,7$ собственная частота возрастает при любых реальных значениях толщины мембраны. При этом вариация значений собственных частот датчика при всех разумных размерах пяты и мембраны находится в пределах от минус 6 до 14% от базовой.

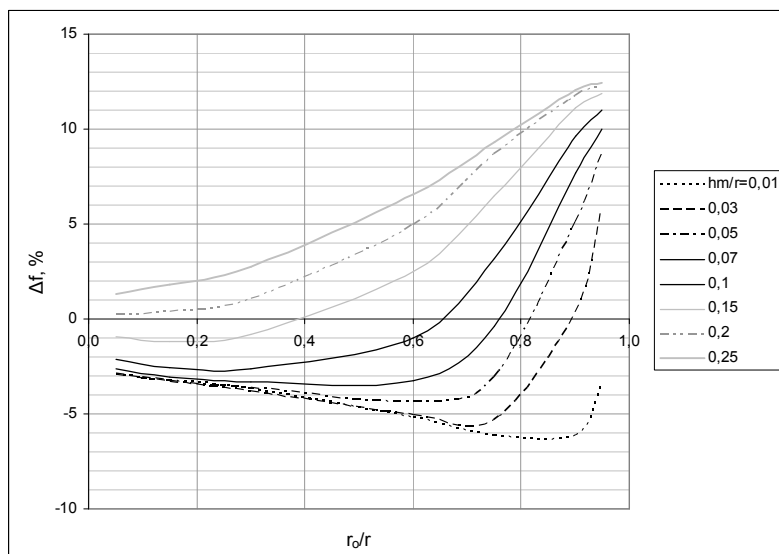


Рис. 4. Относительные отклонения резонансной частоты первой моды колебаний от резонансной частоты базового исполнения датчика 018 ($h_m/r = 0,07$, $r_o/r = 0,764$) в зависимости от радиуса пяты и толщины мембраны

Радикальной мерой для увеличения собственной частоты, а следовательно, и расширения диапазона рабочих частот датчика вверх, является уменьшение высоты ПЭ и пяты.

При расчете виброчувствительности методом конечных элементов вычисляется реакция модели датчика на вибрацию среды: на поверхностях датчика, контактирующих с упругой средой (трубой) при его закреплении, задаются граничные условия синфазных гармонических смещений в осевом направлении с амплитудой u_0 и вычисляется амплитуда электрического заряда q , выделяющегося на ПЭ датчика в ответ на такое возбуждение. Виброчувствительность при условии короткого замыкания рассчитывается как отношение амплитуды заряда к амплитуде ускорения.

На рис. 5 приведены расчетные зависимости виброчувствительности и виброэквивалента от толщины мембраны (при относительном радиусе пяты 0,764). С увеличением толщины мембраны виброчувствительность датчика снижается, однако виброэквивалент растет, поскольку чувствительность датчика к давлению снижается более круто.

Расчеты при различных относительных радиусах пяты показывают, что виброэквивалент растет при сужении пяты: при относительном радиусе $r_o/r = 0,2$ он возрастает примерно вдвое по сравнению с базовым размером (вследствие снижения чувствительности к давлению). Расширение пяты до $r_o/r = 0,95$ снижает виброэквивалент примерно на 10%.

Сопоставление полученных зависимостей с оценками по формулам (4) и (5) показывает, что последние, не учитывая сложности взаимодействия между элементами конструкции датчика, дают неверную оценку

вибрационной чувствительности не только количественно, но и качественно по сравнению с более точными численными расчетами. Например, в формулу (5) мембрана входит лишь как инерционная масса, что, казалось бы, должно приводить к росту виброчувствительности при увеличении толщины мембраны. При рассмотрении же мембраны в ее взаимосвязи с корпусом, пятой и другими конструктивными элементами датчика результат получается обратный, поскольку в оценочных формулах игнорировался тот факт, что рост толщины мембраны означает увеличение жесткости системы и, следовательно, уменьшение ее электрического отклика на вибрацию.

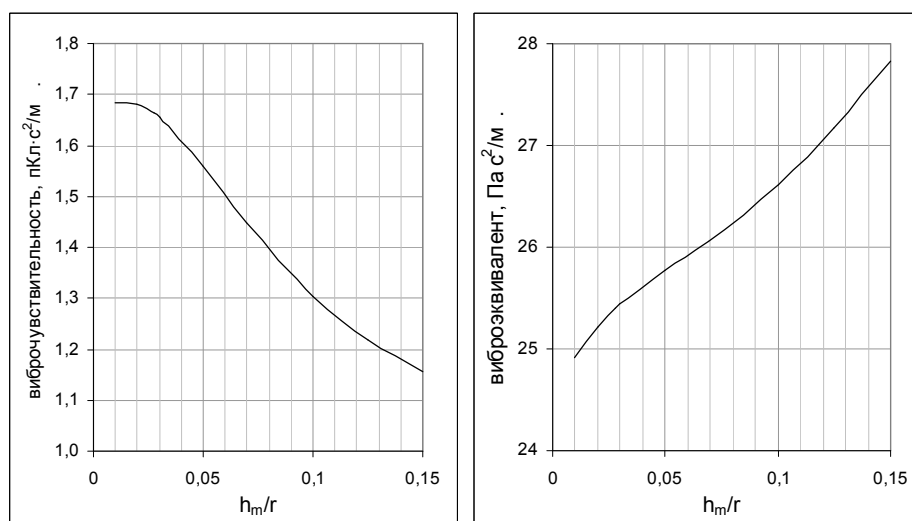


Рис. 5. Зависимость виброчувствительности и виброэквивалента датчика давления от относительной толщины мембраны

При расчете деформационной чувствительности к осевым деформациям S_{yy} на закрепляемых поверхностях датчика задаются противофазные смещения с одинаковой амплитудой u_0 , что соответствует однородной деформации среды с амплитудой $S_{yy} = 2u_0/\Delta y$, где Δy – расстояние по оси датчика между закрепляемыми поверхностями. Отношение амплитуды выделяющегося при этом заряда к величине S_{yy} и есть деформационная чувствительность датчика в осевом направлении K_S .

На рис. 6 приведены расчетные зависимости деформационного эквивалента W_{Sp} от относительной толщины мембраны для узкой ($r_0/r = 0,2$), базовой ($r_0/r = 0,764$) и широкой ($r_0/r = 0,95$) пяты. Отметим, что деформационный эквивалент растет с увеличением толщины мембраны и диаметра пяты.

Результаты расчетов, показанные на рис. 3–6, получены на модели датчика типа 018, изготавливаемого на основе ПЭ из пьезокерамики ЦТС-83Г. Датчик типа 019 – конструктивный аналог 018, в котором используется высокотемпературная керамика НТВ-1, имеет существенно меньшую

чувствительность как к информационному, так и влияющим факторам из-за более низких пьезомодулей материала. Однако вибрационный и деформационный эквиваленты датчиков 018 и 019 близки по величине, характер их зависимостей от геометрии конструктивных элементов датчика идентичен, а количественные различия не превышают 10%.

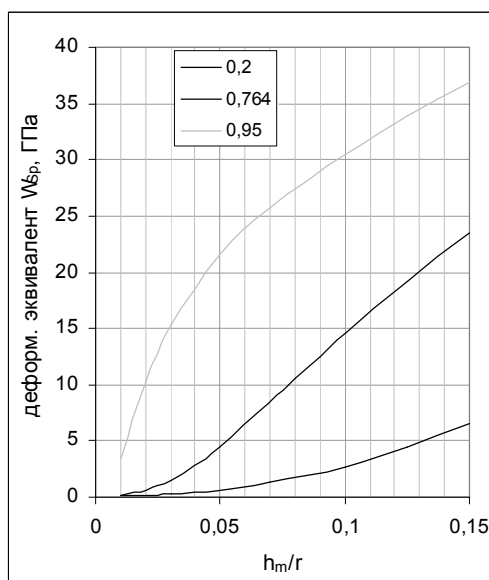


Рис. 6. Зависимость деформационного эквивалента от толщины мембраны

Таким образом, кратко результаты настоящей работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. С использованием метода конечных элементов разработана математическая модель пьезоэлектрического датчика давления, которая хорошо согласуется с опытными данными.

2. В рамках разработанной модели получены более точные зависимости коэффициента преобразования измеряемого давления и вибрационной чувствительности датчика давления от геометрии его конструктивных элементов, которые не только количественно, но качественно отличаются от традиционных оценок.

3. Выявлены основные закономерности, связывающие собственную частоту и деформационную чувствительность пьезоэлектрического датчика давления с геометрией мембраны и опорной пяты.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при проектировании пьезоэлектрических датчиков давления с перспективными техническими характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Abramenko T, Gorish A., Bogush M., Mitko V.* Main characteristics analysis of the piezoelectric sensors under finite-element method. – Proceeding of the Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, 2003, v.3, p 951-959.
2. Пьезоэлектрическое приборостроение: Сборник в 3 томах. Т. 3. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону. Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. 346 с: ил.
3. *Туричин А.М.* Электрические измерения неэлектрических величин. – М. –Л.: Энергия, 1966. – С.52-61
4. *Левшина К.С., Новицкий И.В.* Электрические измерения физических величин. – М.: Энергоатомиздат, 1973. – С. 107-130.
5. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Под общ. ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
6. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в трех томах / Под общ. ред. Ю.Н. Коптева; Под ред. Е.Е. Богдатыева, А.В. Гориша, Я.В. Малкова. – М.: ИПРЖР. Т.1 (кн.2). 1998. – 512 с., Т.2. 1999. – 688 с.
7. Пьезоэлектрические приборы для измерения давлений, усилий, ускорений. Проспект фирмы Kistler Instrument AG., 1999. – 12 с.
8. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

**Н.С. Анишин, И.Н. Булатникова,
Н.Н. Гершунина**

**РАЗНОСТНО-ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ**

Широкое внедрение микропроцессоров (МП) и микроконтроллеров (МК) в системы автоматизации и управления технологическими процессами потребовало интенсивного развития их алгоритмического обеспечения.

Технико-экономические требования к МП и МК (дешевизна, быстродействие, простота конструкции вычислителя) привели к востребованности целочисленных алгоритмов.

Их достоинства – ограниченный набор простых операций (сложения, вычитания, сдвиги, условные переходы) и быстродействие – были успешно продемонстрированы при их аппаратной реализации (цифровые линейные, круговые интерполяторы [1], спецвычислители, например, для навигации [2]).

Исторически разностно-итерационные алгоритмы своё применение ведут от всемирно известных алгоритмов Волдера и Меджита [3,4].

Впоследствии они были развиты в трудах многих зарубежных и отечественных учёных. Однако в основном – на применении аппаратно, в том числе и в микроэлектронном исполнении [2,5].

Причём абсолютное большинство этих алгоритмов создавалось эвристическим путём, т.е. они имели сугубо специфическое применение на