

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПЬЕЗОНАСОСОВ

Духовенский Г.Е.<sup>2</sup> (студент), Виноградов А.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «НИИ ПМТ» (115054 г. Москва, ул. М. Пионерская, 12;

e-mail: niipmt@mail.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет)

В данной статье рассматриваются модели микромеханических пьезонасосов двух типов: мембранного и перистальтического. Такие малогабаритные устройства используются для прецизионной перекачки жидкости или газа. Широкое применение микронасосы находят в медицине, в космической и вакуумной технике и в других областях. Микронасосы, или так называемые микровоздуходувки [1], используются в системах дозированной передачи метанола и кислорода в топливных элементах DMFC (прямой метаноловый топливный элемент).

Разработка насосов, использующих пьезоэффект, дает ряд преимуществ. Это – простота изготовления, отсутствие трущихся частей, низкое энергопотребление и малые размеры устройства определяют его как наиболее перспективное в области микронасосов. Также следует отметить достаточно высокую производительность устройств данного типа. Так некоторые микропьезонасосы, имеющие габариты спичечной коробки, могут перекачивать газы и жидкости со скоростью нескольких десятков миллилитров в секунду. Насосы, использующиеся в вакуумной технике, позволяют получить остаточное давление в высоковакуумной области  $10^{-5}$  Па при скорости откачки 1 л/с [2].

### 1. Микронасосы мембранного типа

Существуют разные конструкции насосов мембранного типа, но общий принцип их работы один. Устройство выполнено таким образом, что создается герметичная насосная камера с входным и выходным отверстиями, содержащими клапаны. Различные модели насосов отличаются, в основном, системой клапанов. Одна из стенок такой камеры содержит пьезоэлемент. При подаче переменного напряжения на пьезоэлемент, он периодически деформируется, изменяя объем камеры. Соответственно, объем камеры то увеличивается, то уменьшается с частотой подаваемого напряже-

ния. Из-за изменения объема камеры возникает перепад давления, за счет которого происходит перекачка жидкости или газа. На рис. 1 показана схема работы мембранного микронасоса, описанного в [1].

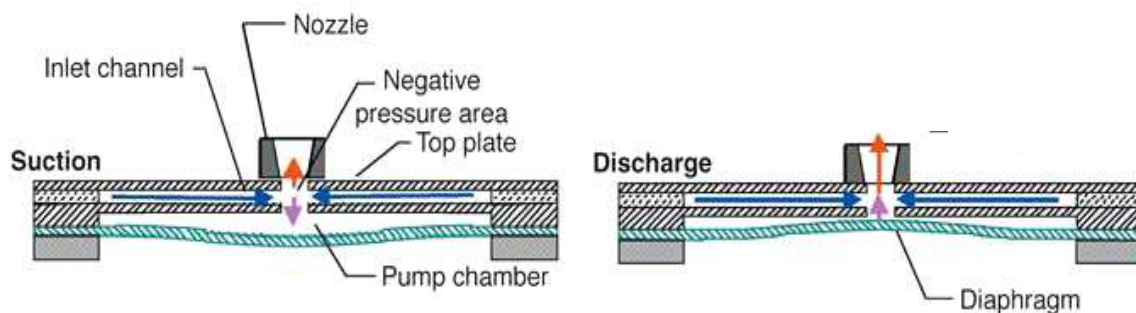


Рисунок 1. Вид мембранного насоса в разрезе

Данная конструкция интересна отсутствием клапанов. Головка с выходным отверстием выполнена в виде конического сопла (Nozzle). Таким образом, при всасывании (Suction) проявляется эффект Вентури, благодаря которому при увеличении объема камеры в нее не успевают вернуться перекаченный на предыдущей фазе газ. Таким образом, обеспечивается практически непрерывная работа насоса, несмотря на колебательный режим мембраны (Diaphragm).

Одной из важных частей устройства, очевидно, является деформируемая мембрана с пьезоэлементом. На начальных этапах разработки необходимо оценить механические характеристики мембраны, условия закрепления в корпусе, ее собственные частоты и прогибы на рабочей частоте – для оценки производительности насоса. Известно, что для такой оценки, используется метод конечных элементов (МКЭ). На рис. 2 показан пример модели, описанной в [3].

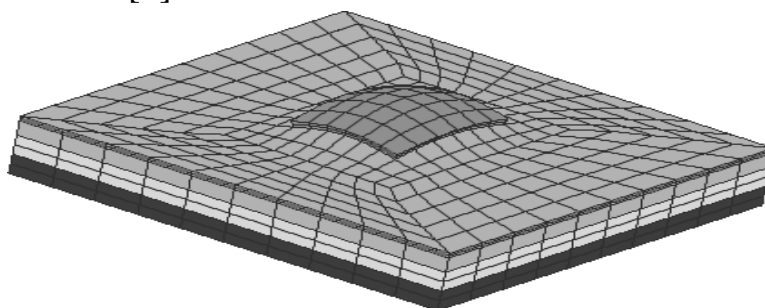


Рисунок 2. Вид модели мембранного насоса при расчете по МКЭ

Наряду с преимуществами МКЭ имеет ряд недостатков, например, долгое время подготовки и расчета модели, невозможность интерактивно менять ее параметры, необходимость владения навыками 3D-моделирования в стандартном дорогостоящем пакете программ, а также сильная зависи-

мость результатов расчета от «удачного» способа разбиения на конечные элементы.

Альтернативой МКЭ является аналитический метод. Программы, работающие на основе этого метода, не требуют специальной подготовки исследователя, расчеты производятся практически мгновенно, а точность результатов ограничивается лишь степенью упрощения упругой модели. Суть метода состоит в представлении планарной модели в виде многослойной системы с участками переменной жесткости. Для системы по участкам записываются однотипные уравнения движения и граничные условия. Решение позволяет найти основные характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) на границах участков, а затем и по всей длине модели. В результате расчета не составляет труда найти собственные частоты модели, построить амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), а также определить напряжения, возникающие в слоях. При аналитическом моделировании можно задавать различные коэффициенты упругости опор участков, что позволяет производить расчет лишь отдельных частей общей модели без потери точности результатов.

Для двумерной модели уравнение колебаний каждого участка многослойной полосы относительно функции прогиба  $y = v(x, t)$  имеет вид [4]:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \left( D \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0.$$

Здесь  $x$  – продольная координата,  $t$  – время,  $D$  – обобщенная жесткость сечения на изгиб,  $m$  – погонная масса многослойного сечения.

Изгибающий момент от обратного пьезоэффекта учитывается в граничных условиях для участков, содержащих пьезоэлектрические слои. Коэффициенты упругости опор на изгиб и на поперечное смещение учитываются на границах участков. Методика решения уравнений движения по методу начальных параметров приведена в [5]. В соответствии с этой методикой разработана компьютерная программа MSR [6] с интерактивным графическим интерфейсом, позволяющим удобно изменять параметры системы и быстро получать результаты в виде графиков и в численном виде. Подобная методика и программа использованы при анализе многослойных моделей вибрационных пьезогироскопов [7].

Ниже рассмотрен пример моделирования подвижных частей некоторых мембранных насосов. В модели (рис. 4) подвижная часть представляет собой пластинку из пьезокерамики ЦТС, зажатой между двух рамок – стальной сверху и латунной – снизу. Исходные параметры указаны в таблице 1.

Амплитуда напряжения, подаваемого на пьезоэлемент, составляет 10 В. Расчеты проводились с помощью разработанной программы MSR.

Параметры модели по рис. 1 с габаритами 20×20×0,9 мм.

Таблица 1

Материал	$h$ (мм)	$E$ (МПа)	$\rho$ (г/см <sup>3</sup> )	$d_{31}$ (мм/В)
сталь	0,35	$2,10 \cdot 10^5$	7,80	0
латунь	0,35	$1,20 \cdot 10^5$	8,50	0
ЦТС	0,20	$7,34 \cdot 10^4$	7,45	$1,7 \cdot 10^{-7}$

Здесь  $h$  – толщина,  $E$  – модуль Юнга,  $\rho$  – плотность,  $d_{31}$  – поперечный пьезомодуль.

Формы колебаний на различных частотах показаны на рис. 4. Коэффициенты упругости на внешнем контуре модели отвечают жесткой заделке.

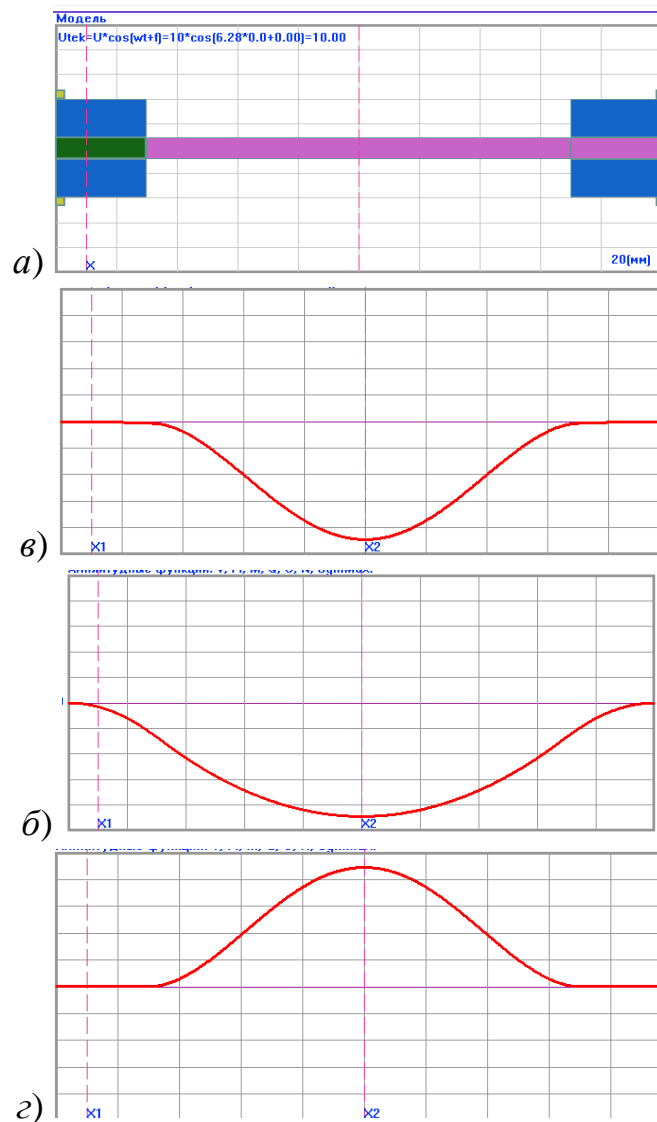


Рисунок 4. Результаты моделирования мембранного пьезонасоса

*a)* – расчетная схема, *б)* – форма колебаний при  $f = 1$  Гц, *в)*  $f = 3,30$  кГц, *г)*  $f = 3,40$  кГц.

Расчет показал, что при квазистатической частоте 1 Гц, максимальное отклонение мембраны от начального положения составляет  $V_m = 2,12 \cdot 10^{-2}$  мкм. Зная перемещения по всей длине модели, форму колебаний и рабочую частоту  $f$ , можно сделать оценку производительности устройства по формуле

$$P = kV_m S f,$$

где  $k$  – коэффициент полноты ( $k = |V_{cp}/V_m|$ ), зависящий от формы колебаний,  $S$  – площадь мембраны. Характерно, что при разных частотах вид колебаний имеет разные формы, содержащие как выпуклости ( $V > 0$ ), так и вогнутости ( $V < 0$ ), что снижает коэффициент  $k$ , а с ним и производительность  $P$ . Для данной модели найдены собственные частоты в отсутствии рабочего тела (газа или жидкости):

$$f_1 = 3375 \text{ Гц}; \quad f_2 = 9262 \text{ Гц}; \quad f_3 = 18005 \text{ Гц}.$$

На рис. 5 представлены формы колебания модели на высоких частотах.

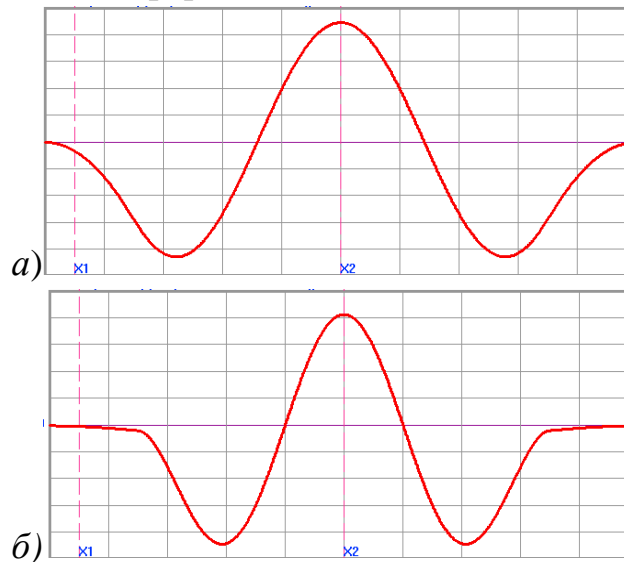


Рисунок 5. Формы колебаний модели а) – на частоте  $f = 9,30$  кГц, б)  $f = 18,0$  кГц

Данный пример позволяет определить направление оптимизации прибора. Видно, что при частотах, близких к 2-й и 3-й собственным, почти резонансные колебания имеют менее выгодную форму ( $k \approx 0$ ), чем при колебаниях в квазистатическом режиме ( $0 < k < 1$ ). Следовательно, для увеличения производительности необходимо подобрать материалы и условия заделки так чтобы собственные частоты были как можно выше.

Далее приведен пример расчета характеристик колебаний двухслойной мембраны для модели, взятой из статьи [1] и представленной на рис. 6. В данной модели подвижная часть представляет собой пластинку,

выполненную из латуни с пьезокерамическим слоем, и закрепленную в стальной рамке.

Геометрические параметры модели, изображенной на рис. 6, следующие. Габариты  $16 \times 20 \times 0,45$  мм. Толщины всех слоев  $h = 0,15$  мм.

Физические характеристики те же, что приведенные в табл. 1.



Рисунок 6. Модель мембранного насоса с двухслойной мембраной.

Результаты моделирования показаны на рисунках 7 и 8.

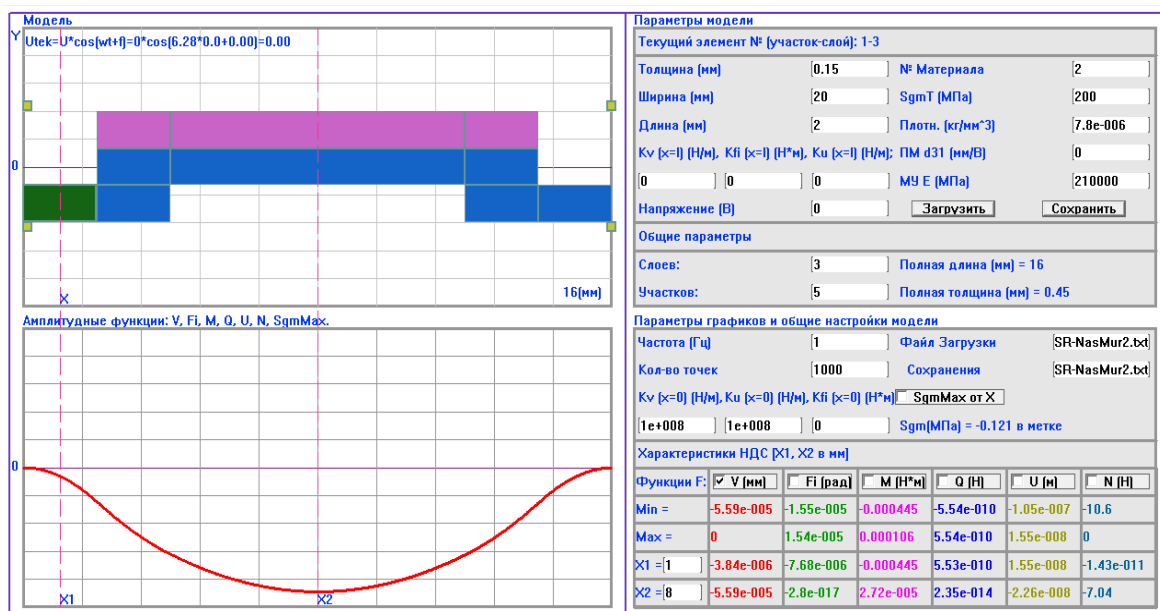


Рисунок 7. Рабочее окно программы MSR при моделировании двухслойной мембраны, закрепленной в упругой рамке

Учитывая, что размеры данной модели несколько меньше, чем предыдущей (см. табл. 1), принятый здесь вид крепления мембраны к корпусу позволяет увеличить ее прогибы. Максимальное отклонение мембраны в квазистатическом режиме  $V_m = 5,59 \cdot 10^{-2}$  мкм. Собственные частоты составляют

$$f_1 = 11057 \text{ Гц}; \quad f_2 = 25449 \text{ Гц}.$$

Из рис. 8 видно, что даже при высоких частотах форма колебаний позволяет совершать накачку ( $k > 0$ ). Несмотря на то, что активный объем камеры примерно в 4 раза меньше, чем в квазистатическом режиме, производительность устройства на высоких частотах возрастает почти в 6000 раз.

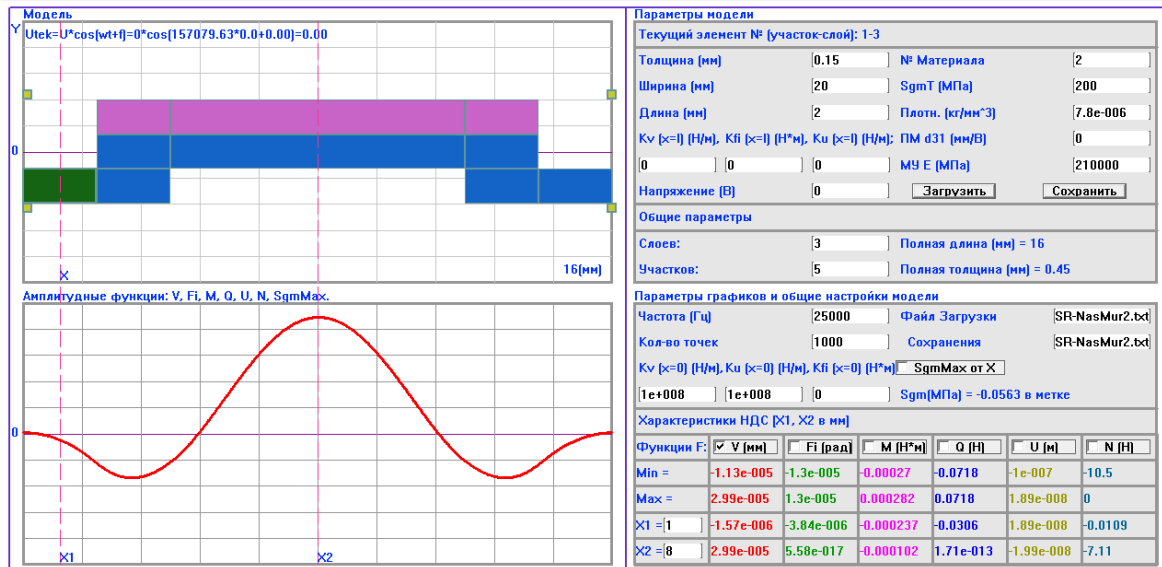


Рисунок 8. Вид колебаний двухслойной мембраны на частоте 25 кГц

## 2. Микронасосы перистальтического типа

Микронасосы перистальтического типа для переноса жидкости используют бегущую волну деформаций замкнутого объема. Волнообразное движение образуется от сжатия и растяжения пьезоэлементов. Для создания такой волны необходимо определенным образом подавать на пьезоэлементы переменное возбуждающее напряжение. На рис. 9 показан фрагмент модели перистальтического микронасоса и схема возбуждения со сдвигом фаз на  $\pi/2$  [8].

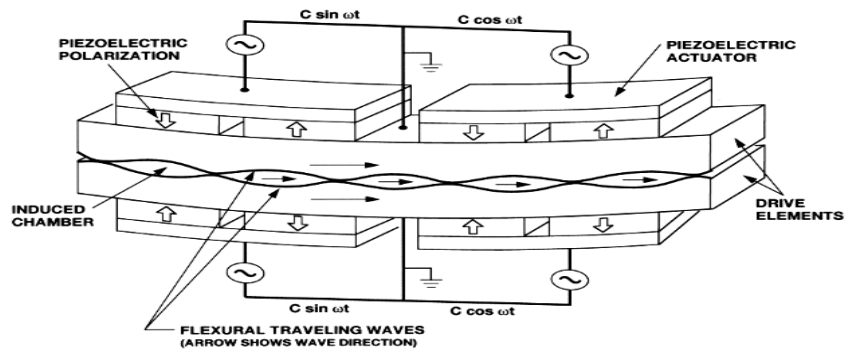


Рисунок 9. Схема возбуждения пьезокерамики с продольным пьезомодулем  $d_{33}$

Для моделирование возбужденного состояния при изгибе элементов нами также использовалась программа MSR, позволяющая задавать разные фазы переменных напряжений на соседние пьезоэлементы, а также отслеживать формы колебания во времени. При этом было обнаружено, что в модели с 15-ю электродами в одной плоскости и схемой возбуждения по рис. 9 бегущая волна образуется в сильно искаженном виде, что приведет к большим потерям производительности устройства. Это

послужило поводом для создания модели, работающей по принципу трехфазного электродвигателя (рис. 10). Для создания деформаций изгиба здесь используется поперечный пьезомодуль  $d_{31}$  пьезокерамики. После расчета модели с возбуждением трехфазного типа бегущая волна создается практически без искажений.

Расчетная производительность устройства составляет примерно 1 мкл/с.

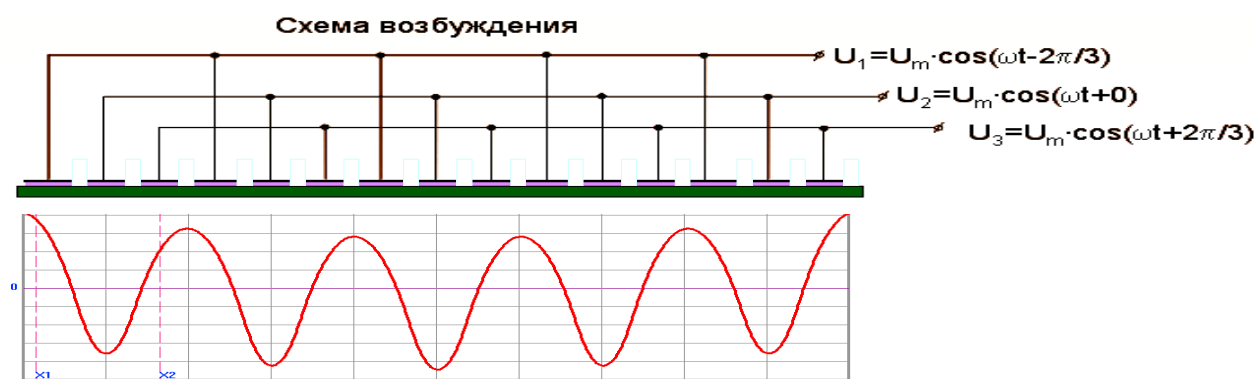


Рисунок 10. Трехфазная схема возбуждения и форма бегущей волны прогибов.

## Выводы

1. Произведен поиск и анализ различных моделей микропьезонасосов.
2. Разработана методика двумерного моделирования планарных конструкций микропьезонасосов двух типов.
3. Разработана и опробована новая схема возбуждения перистальтического насоса, дающая устойчивую бегущую волну прогибов.
4. Разработана концепция оптимизации микропьезонасосов мембранного типа.

## Список литературы:

1. Yasumichi Nakamura. Murata Catches up as Demand for Fuel Cell Systems Grows. AEI December 2009. pp. 29-30.
2. Макаров А.А., Лускинович П.Н., Рыжиков И.А. Способ откачки газов и вакуумный насос для откачки газов. Патент РФ № 2079000, – 1997.
3. Ulises F. Gonzalez, Ph.D., Walied A. Moussa, Ph.D. University of Alberta. Simulation of MEMS Piezoelectric Micropump for Biomedical Applications. / Center for Mechanical Simulations Technology Finite Element Analysis, Simulation and Design Optimization, ALGOR, Inc. – 2002.
4. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов.– М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.



5. Виноградов А.Н. Методика моделирования пьезогироскопов стержневого типа. – М.: ГНУ «НИИ ПМТ», 2009. – 25с .
6. Виноградов А.Н., Духовенский Г.Е. Программа расчета вынужденных колебаний многослойного пьезопривода стержневого типа с участками переменной жесткости. Свидетельство о гос. регистрации № 2011610402 от 11.01.2011. Правообладатель ГНУ «НИИ ПМТ».
- 7 Духовенский Г.Е. Исследование многослойных вибрационных пьезогироскопов. Тезисы докладов на НТК студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2011. С. 295–296.
8. Yoseph Bar-Cohen and Zensheu Chang. Piezoelectrically Actuated Miniature Peristaltic Pump. / SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, CA. Paper No. 3992-103. – 2000. – 8 с.