

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОНАСОСОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А.Н. Виноградов¹, Г.Е. Духовенский²

¹Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий;

²Московский государственный институт электроники и математики

E-mail: niipmt@mail.ru

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. Например, насосы перистальтического типа разрабатываются в программах NASA для исследований, проводимых на других планетах [6]. Микронасосы, или так называемые микровоздуходувки [1], используются в системах дозированной подачи 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 спичечного коробка, 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 (см. рис.1,3). При подаче переменного напряжения на пьезоэлемент он периодически деформируется, изменяя объем камеры. Объем камеры то увеличивается, то уменьшается с частотой подаваемого напряжения. Из-за изменения объема камеры возникает перепад давления, за счет которого происходит перекачка жидкости или газа [1].

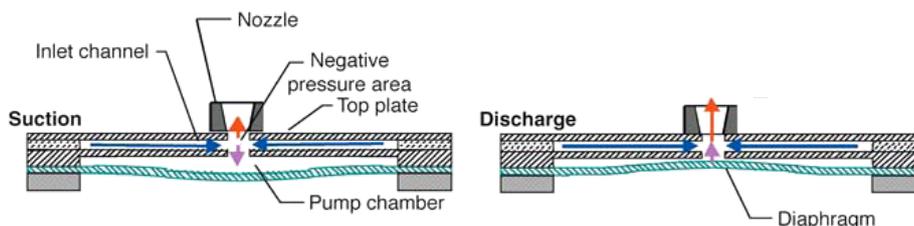


Рисунок 1. Вид мембранного пьезонасоса

Конструкция изображенная на рис.1 отличается 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 успевает вернуться перекаченный на предыдущей фазе газ. Этим 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].

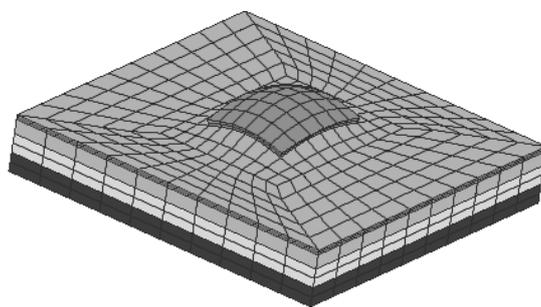


Рисунок 2. Вид модели мембранного насоса при расчете по МКЭ

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 зависимость 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 напряжено-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. Методика решения уравнений движения по методу начальных параметров приведена в [4]. В соответствии с этой методикой разработана компьютерная программа MSR [5] с интерактивным графическим интерфейсом, позволяющим удобно изменять параметры системы и быстро получать результаты в виде графиков и в численном виде.

Далее приведен пример расчета характеристик колебаний двухслойной мембраны для модели, взятой из статьи [1] и представленной на рис. 3. В данной модели подвижная часть представляет собой пластинку, выполненную из латуни с пьезокерамическим слоем, и закрепленную в стальной рамке. Исходные параметры указаны в таблице 1. Амплитуда напряжения, подаваемого на пьезоэлемент, составляет 10 В. Расчеты проводились с помощью разработанной программы MSR.

Таблица 1

Материал	h (мм)	E (МПа)	ρ (г/см ³)	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, ρ – плотность, d_{31} – поперечный пьезомодуль.

Геометрические параметры модели, изображенной на рис. 3, следующие. Габариты $16 \times 20 \times 0,45$ мм. Толщина каждого слоя $h = 0,15$ мм.



Рисунок 3. Модель мембранного насоса с двухслойной мембраной

Результаты моделирования показаны на рисунках 4 и 5.

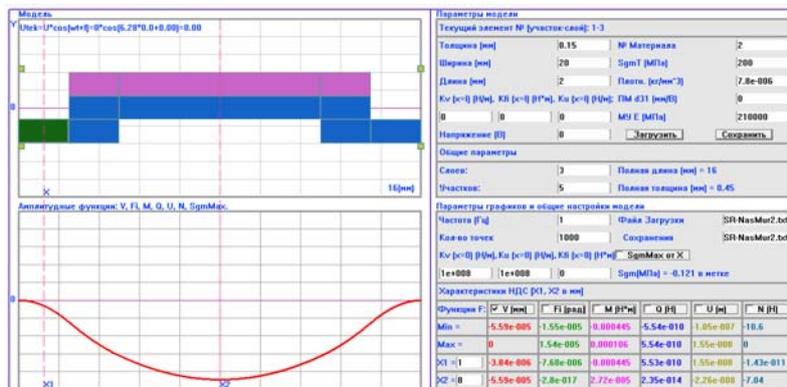


Рисунок 4. Рабочее окно программы MSR при моделировании двухслойной мембраны, закрепленной в упругой рамке

Максимальное отклонение мембраны в квазистатическом режиме ($f = 1$ Гц) $V_m = 5,59 \cdot 10^{-2}$ мкм. Собственные частоты составляют

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

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 . Из рис. 5 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.

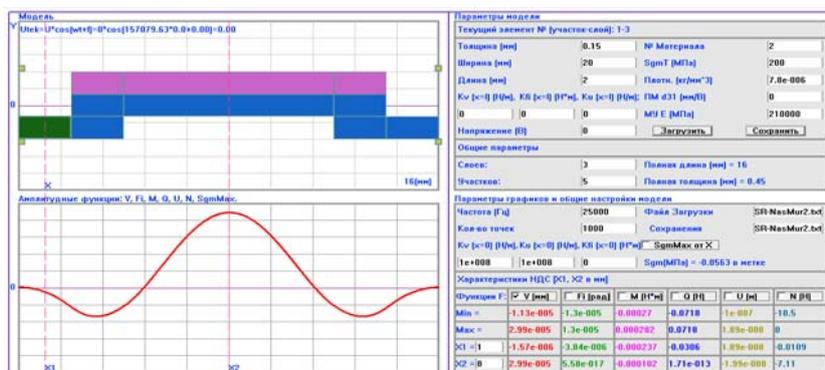


Рисунок 5. Вид колебаний двухслойной мембраны на частоте 25 кГц

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. 6 показан фрагмент модели перистальтического микронасоса и схема возбуждения со сдвигом фаз на $\pi/2$ [6].

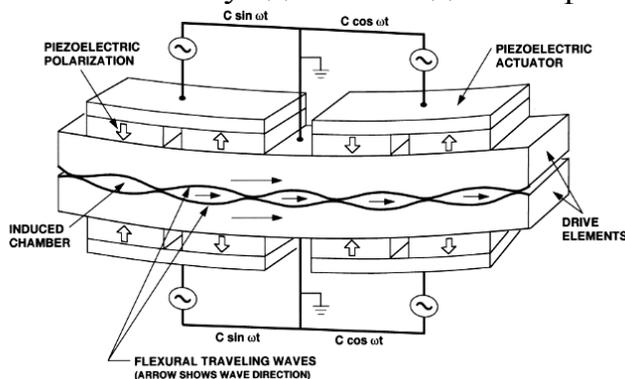


Рисунок 6. Схема возбуждения пьезокерамики с продольным пьезомодулем d_{33}

Для моделирования 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. 6 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. 7). Для создания деформаций изгиба здесь используется поперечный пьезомодуль d_{31} пьезокерамики. В такой модели с возбуждением трехфазного типа бегущая волна создается практически без искажений.

Расчетная производительность устройства составляет примерно 1 мкл/с.

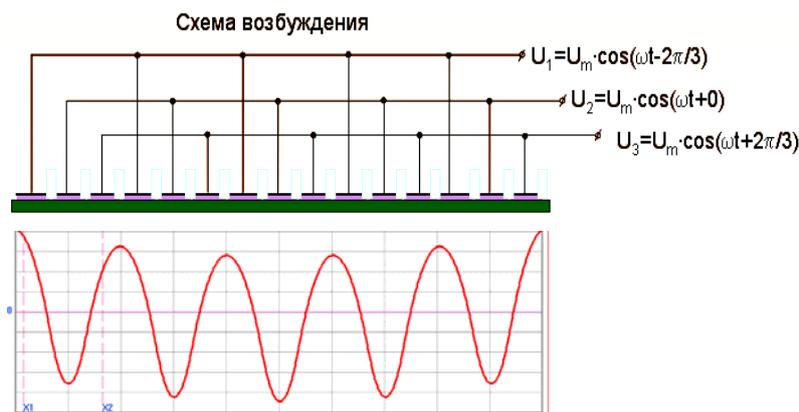


Рисунок 7. Трехфазная схема возбуждения и форма бегущей волны прогибов

Выводы

1. Проведен поиск и анализ различных моделей микропъезонасосов.
 2. Разработана методика и компьютерная программа двумерного моделирования планарных конструкций микропъезонасосов.
 3. Разработана и опробована новая схема возбуждения перистальтического насоса, дающая устойчивую бегущую волну прогибов.
 4. Разработана концепция оптимизации микропъезонасосов мембранного типа.
1. Yasumichi Nakamura. Murata Catches up as Demand for Fuel Cell Systems Grows. AEI December 2009. pp. 29-30.
 2. А.А. Макаров, П.Н. Лускинович, И.А. Рыжиков. Способ откачки газов и вакуумный насос для откачки газов. Патент РФ № 2079000, – 1997.
 3. F.Ulises Gonzczlez, Ph.D., A.Walied Moussa, Ph.D. University of Alberta. Simulation of MEMS Piezoelectric Micropump for Biomedical Applications. / Center for Mechanical Simulations Technology Finite Element Analys, Simulation and Design Optimization, ALGOR, Inc. – 2002.
 4. А.Н. Виноградов. Методика моделирования пьезогироскопов стержневого типа. – М.: ГНУ «НИИ ПМТ», 2009. – 25с .
 5. А.Н. Виноградов, Г.Е. Духовенский. 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».
 6. 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.