



УДК 621.865.8

# РАЗРАБОТКА МЕТОДАМИ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ (МЭМС)<sup>1</sup>

*А. Б. Мигранов*

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы, связанные с построением микроэлектромеханических систем (МЭМС), и проблемы, возникающие при их промышленном изготовлении. Особое внимание уделено микромеханизмам роботов, которые были разработаны методами полунатурного моделирования с использованием виртуальной среды проектирования, тестирования и отладки МЭМС.

**Ключевые слова:** микроэлектромеханические системы, микромеханизмы, микрообъекты, микророботы, микроманипулирование, полунатурное моделирование

---

## 1 Введение

Вопросы миниатюризации в промышленном производстве являются одними из ключевых в последние десятилетия, еще большее значение они имеют для перспективных технологий, таких как микроэлектромеханика, микроэлектроника, нанотехнологии и т.д. Объединение все большего количества функциональных возможностей при сохранении сверхмалых размеров возможно благодаря интегральным (кремниевым) технологиям (химическое, изотропное, анизотропное, сухое, плазменное травление и др.). Однако эти методы имеют существенное ограничение — их можно использовать только в производстве систем с двухмерной структурой, тогда как

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 02-01-97916) и в рамках программы фундаментальных исследований РАН (гос.контракт № 10002-25/ОЭММПУ-4/080-093-535)



Рис. 1. Микроинструменты для работы с MEMS

для построения трехмерных структур дополнительно нужна сборочная фаза. То есть, необходимо изменить положение и ориентацию микрообъектов, приложить направленные усилия. Очень важно точное высвобождение (выпускание) микрообъектов в целевых точках. В макромире проблемы захвата, удержания и перемещения объектов уже решены исполнительными механизмами роботов, принципы работы которых основаны на использовании фрикционных и гравитационных сил, особой геометрии схватов и т.д. В микромире доминирующими являются адгезионные эффекты, к примеру, когда объекты, над которыми производятся манипуляции, имеют размеры менее 1 мм, гравитационные и инерционные силы, пропорциональные объему объекта, оказывают меньшее влияние на технологический процесс по сравнению с силами адгезии (электростатические, Ван-дер-Ваальса, капиллярные), возникающими при контакте микрокомпонентов с рабочими поверхностями инструментов, манипуляторов и технологической оснастки и пропорциональные площади. Поэтому на практике при манипулировании микрообъектами, в отличие от макрообъектов, обычно используются методы, основанные на адгезионных силах и эффектах. К примеру, на Рис. 1 (слева) показан микросхват, в котором создание зажимных усилий основано на образовании льда (*ice-gripper*); в центре — микромеханизм захвата с пьезоэлектрическим двигателем; справа — вакуумный микроинструмент. Кроме микромеханизмов, являющихся исполнительными устройствами роботов, существуют и другие инструменты, также предназначенные для работы с микрообъектами, например, фрезерные и сверлильные микромашины, микропрессы и т.д. Они также предназначены для производства микросистем, размеры которых составляют доли миллиметра, а масса — десятые и сотые доли грамма.

Несмотря на миниатюрность, разработка, конструирование и отладка микромеханизмов с изготовлением натуральных образцов значительно более дорога и трудоемка, чем создание механизмов традиционных размеров. В лаборатории «Робототехника и управление в технических системах» ИМех

УНЦ РАН при проектировании подобных систем, создании новых конструкций микромеханизмов [1, 2], при разработке алгоритмов их управления и особенностей функционирования в условиях особых микровозмущений используется виртуальная среда проектирования, тестирования и отладки микроэлектромеханических систем [3]. В статье будут рассмотрены электромеханические, термоэлектромеханические и пьезоэлектрические микроустройства для использования в исполнительных устройствах микророботов при сборке микроэлектромеханических систем (МЭМС) или других автоматизированных техпроцессах.

## 2 Капиллярный микрозахват с обратной связью

Существующие на сегодняшний день микрозахватные устройства по принципу действия можно разделить на два класса: классические (механические, вакуумные, магнитные) и нетиповые (основанные на адгезионных силах и эффектах, или приводимые в действие особыми типами приводов). У первого класса устройств недостатки, в первую очередь, связаны с тем, что в своей конструкции они содержат элементы или узлы, которые в принципе невозможно одновременно миниатюризировать в равных пропорциях. Например, это такие комбинации как: электромагнитный двигатель и зажимные губки, источник вакуума и пневмоприсоска, эластичный тонкостенный материал и тяги и т.д. Поэтому некоторые узлы этого класса устройств, неподдающихся миниатюризации, приходится выполнять обособлено, в виде отдельных конструкций. Как следствие, недостатком классических схем реализации микрозахватных устройств является конструктивная сложность, неудовлетворительные массовые и габаритные характеристики, ограниченность или полное отсутствие обратной связи. Поэтому чаще применяются устройства второго класса. В зависимости от принципа действия или используемых приводов они называются электростатическими, фрикционными, термомеханическими, пьезоэлектрическими и т.д. Из наиболее общих недостатков этих устройств можно отметить ограниченность технологических возможностей, которые связаны с узкой направленностью на работу только с микрообъектами определенной формы и изготовленных только из определенных материалов. Рассмотрим микрозахватное устройство, разработанное для манипулирования микрообъектами сложных конфигураций — капиллярный микрозахват с обратной связью (Рис. 2).

Принцип работы устройства основан на эффектах поверхностного натяжения (капиллярных силах), когда жидкость между двумя поверхностями создает адгезионную силу, приводящую к сцеплению поверхностей. Природа этих сил определяется межмолекулярными взаимодействиями и

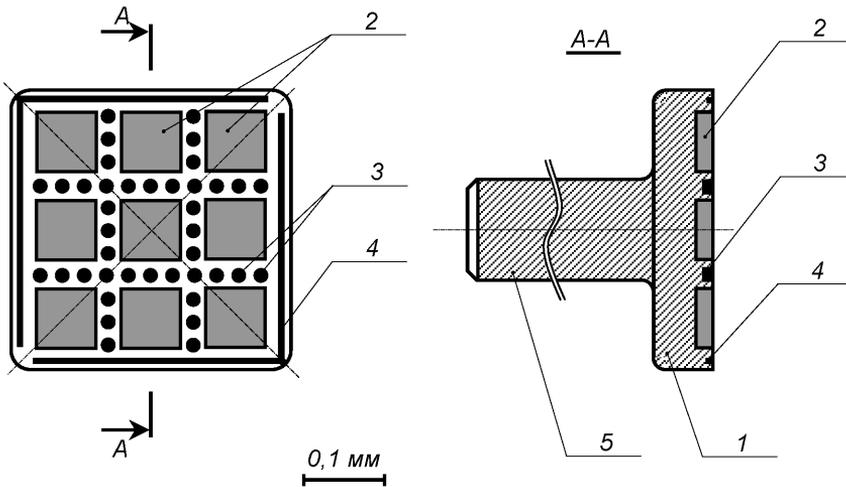


Рис. 2. Конструкция капиллярного микрозахвата с обратной связью

структурой поверхностного слоя. К примеру, для сферического микрообъекта и основания (Рис. 3) силы поверхностного натяжения  $F$  можно записать следующим образом [4]:

$$F = \pi R_2^2 \gamma \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + 2\pi R_2 \gamma,$$

где  $\gamma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $R_1$  — внешний радиус кривизны поверхности;  $R_2$  — внутренний радиус кривизны поверхности. Гравитационное поле практически не оказывает воздействия на силы поверхностного натяжения. В соответствии с результатами моделирования, представленными на графиках (Рис. 3), величины сил поверхностного натяжения являются достаточными, чтобы их можно было использовать для манипулирования микрообъектами различных конфигураций, имеющих размеры в диаметре до одного миллиметра.

В капиллярном микрозахвате с обратной связью в качестве жидкости, создающей силу сцепления, используется конденсат, который образуется на поверхности конденсаторов влаги 2, выполненных в виде термоэлектрических модулей на основе эффекта Пельтье. При этом, для образования конденсата достаточно, чтобы температура поверхностей конденсаторов влаги 2, граничащих с воздухом, опустилась ниже точки росы. Например, если температура воздуха  $20^\circ\text{C}$ , относительная влажность воздуха 50%, а температура поверхности  $9^\circ\text{C}$ , то в этом случае на поверхности достигается точка росы и влага конденсируется.

Работа капиллярного микрозахвата с обратной связью начинается с того, что на каждый из конденсаторов влаги 2, выполненных в виде тер-

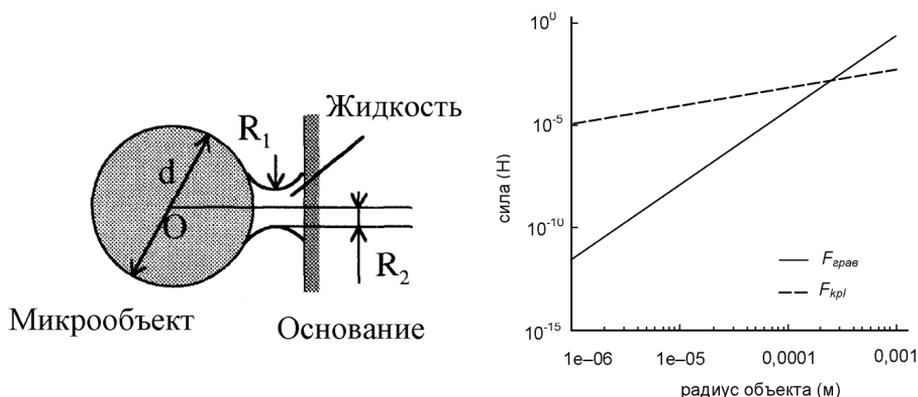


Рис. 3. Силы поверхностного натяжения между сферическим микрообъектом и основанием (слева); масштабы гравитационных и капиллярных сил при манипулировании сферическим микрообъектом из меди (справа)

моэлектрических модулей на основе эффекта Пельтье, подается слабое электрическое напряжение, что вызывает их охлаждение. При этом, избыток тепла, выделяющийся конденсаторами влаги 2, рассеивается основанием 1, выполненным из электроизоляционного материала с высокой теплопроводностью. С наступлением точки росы на конденсаторах влаги 2 и рабочей поверхности основания 1 конденсируется влага. В то же время на электродах 4 присутствует электрическое напряжение. Конденсирующаяся влага, проводниковые пластины 3 и электроды 4 образуют электрическую цепь, при прохождении по которой электрического тока, формируется сигнал о том, что на рабочей поверхности основания 1 образовался конденсат, достаточный для захвата микрообъектов. После этого, капиллярный микрозахват с обратной связью, крепящийся посредством крепежного приспособления 5 к микроманипулятору, приводится в движение для захвата объекта.

Для выпуска микрообъектов используется похожий принцип. Микрообъекты, являющиеся во влажном состоянии проводниками, нагреваются пропусканием через них электрического тока. Теперь электрическая цепь образуется уже конденсатом, проводниковыми пластинами 3, микрообъектом и электродами 4. При прохождении электрического тока через микрообъекты и проводниковые пластины 3 в тех и других выделяется тепловая энергия, которая приводит к разогреву и испарению влаги, приводящей к сцеплению поверхностей. С уменьшением влажности, величина протекающего тока и количество выделяющегося тепла самопроизвольно снижаются, контроль за процессом испарения осуществляется по величине протекающего в цепи тока. Через определенный промежуток времени, в

зависимости от приложенного напряжения, микрообъект падает под действием гравитационных сил.

Таким образом, использование разработанного устройства в автоматизированных техпроцессах позволит работать с микрообъектами сложных конфигураций, кроме того, натуральный образец устройства будет иметь низкие массогабаритные показатели.

### 3 Микросхват с силовым очувствлением

Как известно, применение в микроинструментах и микромеханизмах обратной связи в настоящее время ограничивается тем, что большинство датчиков не удовлетворяет одновременно таким требованиям как миниатюрность и широкий динамический диапазон. Поэтому, например, обратная связь по положению и ориентации в микротехнологических средах реализуется визуально, с использованием систем технического зрения. Однако такой подход не является универсальным. Часто встречаются практические задачи, когда в микромашинах некоторые физические величины (давление, температура, влажность и др.) должны оцениваться в некоторых узлах, локальных областях или определенных участках. Типичный пример — реализация силовой обратной связи в зажимных микромеханизмах манипуляторов и роботов, где требуется точная информация о развиваемых усилиях при захвате и удержании микрообъектов. Отсутствие этой информации обычно является причиной деформаций, разрушений и поломок, как самих микромеханизмов, так и объектов, из-за того, что те и другие имеют сверхмалые размеры и низкую прочность. Поэтому, при разработке подобных микромеханизмов, необходимо предусматривать особые конструктивные элементы, направленные на решение задач обеспечения силовой обратной связи.

Рассмотрим микросхват с силовым очувствлением (Рис. 4), разработанный для использования в исполнительных устройствах микроботов. В качестве чувствительного элемента используется пьезорезистор, принцип работы которого основан на тензорезистивном эффекте — изменении сопротивления кристаллов под действием сжатия (растяжения) или одноосной деформации. Эффект особенно проявляется в полупроводниках, где связан с изменением энергетического спектра носителей заряда. Малые деформации в чувствительном элементе описываются так называемыми тензорами эластосопротивления  $m_{\alpha\beta\gamma\delta}$  или пьезосопротивления  $\pi_{\alpha\beta\gamma\delta}$ , связывающими относительное изменение проводимости  $\Delta\delta/\delta_0$  ( $\delta_0$  — проводимость в отсутствии деформаций) с тензором деформации  $u_{\gamma\delta}$  или тен-

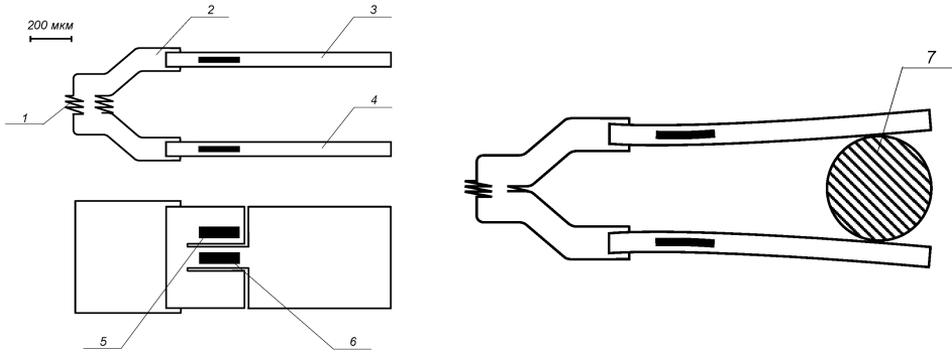


Рис. 4. Микросхват с силовым очувствлением

зором упругого напряжения  $P_{\gamma\delta}$  [5]:

$$\frac{\Delta\delta_{\alpha\beta}}{\delta_0} = \sum_{\gamma,\delta} m_{\alpha\beta\gamma\delta} u_{\gamma\delta} = \sum_{\gamma,\delta} \pi_{\alpha\beta\gamma\delta} P_{\gamma\delta}.$$

Учитывая симметрию относительно перестановки индексов  $\delta$  и  $u$ , а также  $\delta$  и  $P$ , обычно используют матричные обозначения, вводя вместо двух пар индексов  $\alpha, \beta$  и  $\delta, \gamma$  соответственно два индекса  $n$  и  $m$ , пробегающие значения от 1 до 6 [6]. Тензорным обозначениям  $\alpha, \beta$  или  $\delta, \gamma$  равным 11, 22, 33, 23, 13, 12 соответствуют матричные обозначения  $n$  или  $m$ : 1, 2, 3, 4, 5, 6. При этом  $\delta_{\alpha\beta} = \delta_n (n = 1..6)$ ;  $m_{\alpha\beta\gamma\delta} = m_{mn} (m, n = 1..6)$ ;  $\pi_{\alpha\beta\gamma\delta} = \pi_{mn} (m = 1..6, n = 1..3)$ ;  $\pi_{\alpha\beta\gamma\delta} = (1/2)\pi_{mn} (\gamma \neq \delta, m = 1..6, n = 4..6)$ ;  $u_{\alpha\beta} = u_m (m = 1..3)$ ;  $u_{\alpha\beta} = (1/2)u_m (\alpha \neq \beta, m = 4..6)$ ;  $P_{\alpha\beta} = P_m (m = 1..6)$ . Причем компоненты эластосопротивления  $m$  и пьезосопротивления  $\pi$  связаны друг с другом соотношениями

$$\begin{aligned} \pi_{11} + 2\pi_{12} &= (m_{11} + 2m_{12})(S_{11} + S_{12}), \\ \pi_{11} - \pi_{12} &= (m_{11} - 2m_{12})(S_{11} - S_{12}), \\ \pi_{44} &= m_{44}S_{44}, \end{aligned}$$

где  $S_{mn}$  — компоненты тензора коэффициента упругости. При больших деформациях чувствительного элемента тензорезистивный эффект становится нелинейным — сопротивление перестает меняться и «выходит на насыщение». В частности, как показано ниже, при зажиме микрообъекта губками это будет проявляться в том, что в определенный момент времени данные о развиваемом усилии перестанут изменяться, что в свою очередь приведет к переходу зажимного устройства в неустойчивый режим работы.

Микросхват с силовым очувствлением содержит двухсторонний линейный возвратно-поступательный привод 1, пьезоэлектрический или термо-

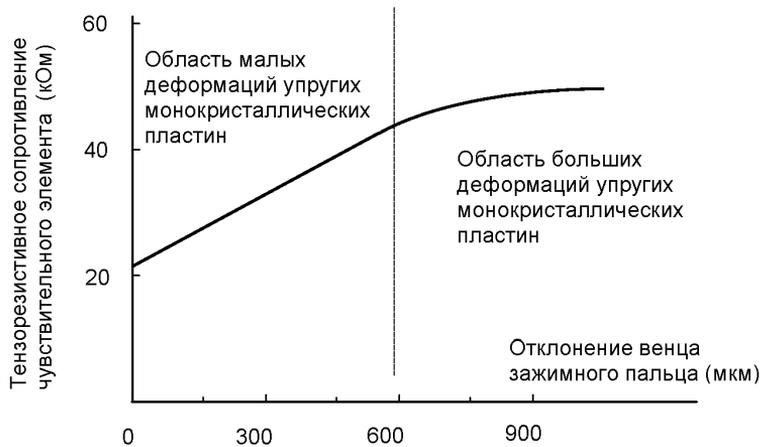


Рис. 5. Изменение тензорезистивного сопротивления чувствительного элемента в зависимости от отклонения венца одного из зажимных пальцев

механический по принципу действия, основание механизма захвата 2, верхний 3 и нижний 4 зажимные пальцы, выполненные в виде упругих монокристаллических пластин с пьезорезистором 6 и пьезорезистивным чувствительным элементом 6. Сферический микрообъект 7 (Рис. 4) удерживается верхним 3 и нижним 4 зажимными пальцами. Работа микросхвата основана на том, что двухсторонний линейный возвратно–поступательный привод, через основание механизма захвата, приводит в движение верхний и нижний зажимные пальцы, тем самым, схват раскрывается или закрывается. При захвате сферического микрообъекта усилие, создаваемое двухсторонним линейным возвратно–поступательным приводом, приводит к деформации изгиба верхнего и нижнего зажимных пальцев, выполненных в виде упругих монокристаллических пластин с пьезорезистивным чувствительным элементом и пьезорезистором, которые включены по дифференциальной схеме. При этом пьезорезистивный чувствительный элемент также деформируется под воздействием внешнего давления и изменяет свое электрическое сопротивление, а пьезорезистор, в свою очередь, не деформируется и не изменяет сопротивления. Дифференциальная схема включения снижает нелинейность характеристик пьезорезистивных свойств чувствительного элемента и пьезорезистора. Сигнал с дифференциальной схемы включения подается на внешнее электронное устройство, в котором формируются данные об усилии в верхнем и нижнем зажимных пальцах. На Рис. 5 представлены результаты моделирования изменения тензорезистивного сопротивления чувствительного элемента (пьезорезистор с вырожденной зоной типа  $p$ -Si) в зависимости от отклонения

венца одного из зажимных пальцев микросхвата. Как видно из графика, при больших деформациях упругих монокристаллических пластин, нелинейность выходных характеристик пьезорезистора приведет к искажению данных о реальных усилиях в зажимных пальцах. Поэтому величина силы  $F_l$ , прикладываемая двухсторонним линейным возвратно–поступательным приводом должна ограничиваться условием  $F_l < F_n$ , где  $F_n$  — усилие, вызывающее изгиб упругих монокристаллических пластин, при котором начинает проявляться нелинейность чувствительного элемента.

Таким образом, разработка позволяет осуществить силовое ощущение микросхвата, снизить вероятность случайной деформации структуры микрообъектов и миниатюризировать массогабаритные характеристики за счет того, что зажимные пальцы выполнены в виде упругих монокристаллических пластин с пьезорезистивным чувствительным элементом и пьезорезистором.

#### 4 Двухсторонний возвратно–поступательный пьезоэлектромеханический микропривод

Актуальность промышленного использования микросистем во многом связана с тем, что в подобных устройствах существенно ниже составляющие гравитационных и фрикционных сил, следовательно, сокращается износ деталей, что позволяет повысить надежность и долговечность их работы. Кроме того, в микросистемах низкий уровень энергопотребления, а значит более высокие значения КПД, невысокая стоимость сокращает эксплуатационные расходы на ремонт, обслуживание и модернизацию. Поэтому, неудивительно, что микросистемы уже сегодня широко применяются в автомобильной промышленности (сенсоры подушек безопасности), авиации и космонавтике (микро– гироскопы и акселерометры), энергетике (микротурбины) и т.д. Несмотря на то, что современный уровень развития технологий не позволяет в полной мере реализовывать механические передачи для трехмерных микроструктур, существуют микроприводы вращательных и возвратно–поступательных движений, предназначенные, например, для систем автоматики. Характерными их недостатками являются нелинейность и инерционность характеристик при определенных режимах, низкое быстродействие и сложность регулирования усилий, электромагнитные наводки на объекты микросреды, неудовлетворительные габаритные и массовые характеристики. Рассмотрим принципы управления и конструкцию двухстороннего возвратно–поступательного пьезоэлектромеханического микропривода, разработанного для манипуляторов, схватов и других механизмов микроботов.

Двухсторонний возвратно–поступательный пьезоэлектромеханический

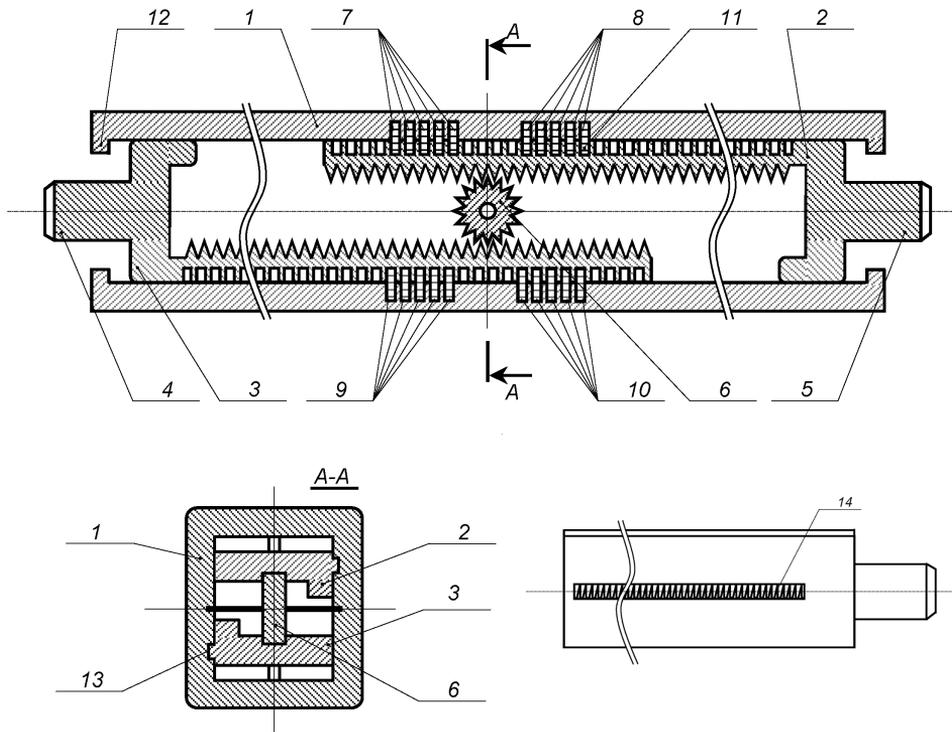


Рис. 6. Двухсторонний возвратно–поступательный пьезоэлектромеханический микропривод (сверху); поперечный разрез микропривода (внизу слева); зубчатая рейка прямого хода, вид сверху (внизу справа)

микропривод (Рис. 6) содержит корпус 1, в котором установлены зубчатые рейки прямого 2 и обратного хода 3, обеспечивающие двухстороннее возвратно–поступательное перемещение штокам 4 и 5. Зубчатые рейки с внутренней поверхности кинематически связаны между собой зубчатым колесом 6, а с внешней — зубчатая рейка прямого хода 2 входит в зацепление поочередно с первой 7 и второй 8 группой идентичных пьезоэлектрических преобразователей при выдвигании штоков 4, 5, а зубчатая рейка обратного хода 3 входит в зацепление поочередно с третьей 9 и четвертой 10 группой при втягивании штоков 4, 5, один конец каждого пьезоэлектрического преобразователя 11 закреплен к корпусу 1, а другой покрыт износостойким материалом и отклоняется в двух направлениях. Зубчатые рейки установлены на фиксирующих ограничителях 12 и направляющих 13, выполненных в корпусе 1. Внешняя поверхность зубчатых реек продольно по центру покрыта прямоугольными зубьями 14, профили которых в поверхностном сечении представляют собой прямоугольные треугольники, разделенные пазами, причем углы наклона зубьев зубчатой рейки прямого

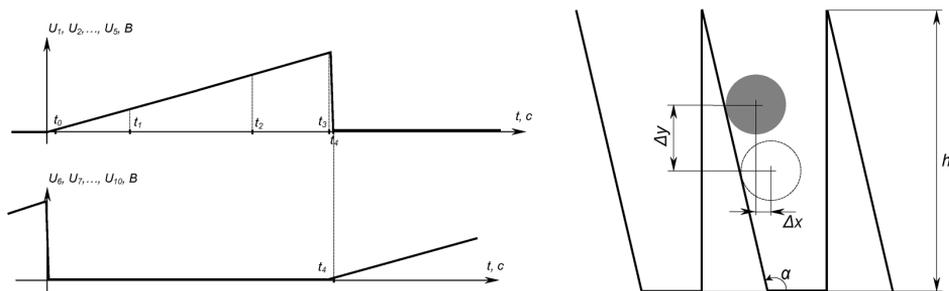


Рис. 7. Временные диаграммы управляющих напряжений идентичными пьезоэлектрическими преобразователями (слева); профиль зубьев зубчатых реек в поверхностном сечении (справа)

2 и обратного хода 3 имеют противоположенные направления, а высота зубьев равна величине отклонений концов идентичных пьезоэлектрических преобразователей 11.

Основой реализации движений микропривода являются пьезоэлектрические преобразователи 11, которые под действием управляющих напряжений деформируются — изгибаются в двух направлениях и входят в зацепление с расположенными на внешней поверхности зубчатых реек прямоугольными зубьями, тем самым, реализуя прямой (выдвижение штоков) и обратный ход (втягивание штоков) микропривода. Рассмотрим подробнее прямой ход микропривода (выдвижение штоков). На Рис. 7 (слева) представлены управляющие напряжения, подаваемые на первую 7 ( $U_1, U_2, \dots, U_5$ ) и вторую группу 8 ( $U_6, U_7, \dots, U_{10}$ ) идентичных пьезоэлектрических преобразователей. При отсутствии сигналов управления ( $U_i = 0$  В) пьезоэлектрические преобразователи 11 распрямлены, при подаче сигналов — деформируются, сгибаясь одновременно и в одном направлении, пропорционально приложенным напряжениям.

Для прямого хода микропривода на первую группу 7 идентичных пьезоэлектрических преобразователей подаются напряжения  $U_1 = U_2 = \dots = U_5$  (Рис. 1, слева), нарастающие по треугольной форме и вызывающие деформацию преобразователей. В момент времени  $t_0$  концы идентичных пьезоэлектрических преобразователей первой группы 7 перемещаются на величину  $(y_0 - y_1)$  (Рис. 8) и входят в зацепление с прямоугольными зубьями 14 зубчатой рейки прямого хода 2. К моменту времени  $t_1$  концы идентичных преобразователей первой группы 7 перемещаются еще на величину  $\Delta y_1 = (y_1 - y_2)$  и, скользя по направляющим скосам прямоугольных зубьев 14, перемещают зубчатую рейку прямого хода 2 на величину  $\Delta x_1 = \Delta y_1 \cos(\alpha) \sin(\alpha)$ , где  $\alpha$  — угол наклона прямоугольных зубьев 14 (Рис. 7, справа), зубчатая рейка прямого хода 2, в свою очередь, обеспе-

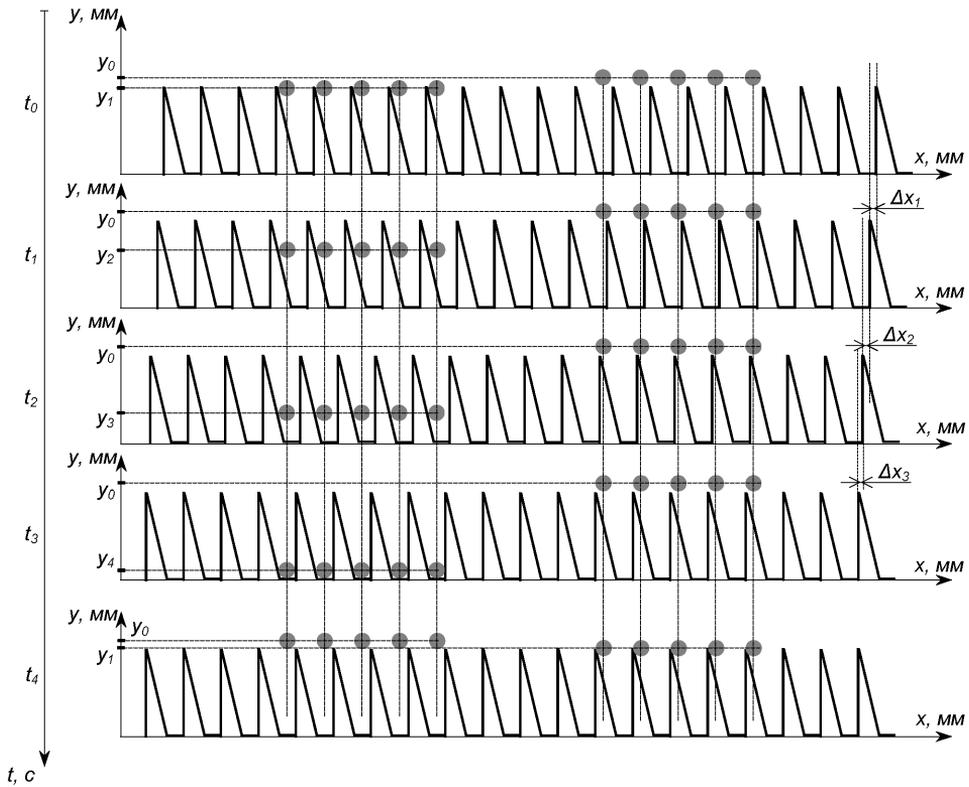


Рис. 8. Временные диаграммы скольжения концов пьезоэлектрических преобразователей по направляющим скосам прямоугольных зубьев зубчатых реек

чивает перемещение в том же направлении штоку 5, а посредством зубчатого колеса 6 — перемещение в противоположенном направлении также на величину  $\Delta x_1$  зубчатой рейке обратного хода 3, которая обладает возможностью свободного перемещения по направляющим 13 до фиксирующих ограничителей 12, так как на третьей 9 и четвертой группе 10 идентичных пьезоэлектрических преобразователей управляющие напряжения отсутствуют. Кроме того, зубчатая рейка обратного хода 3 обеспечивает перемещение штоку 4. Причем, если угол наклона  $\alpha$  прямоугольных зубьев удовлетворяет условию  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  — штоки 4 и 5 выдвигаются, а если выполняется условие  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  — штоки 4 и 5 втягиваются. К моменту времени  $t_2$  треугольные напряжения  $U_1, U_2, \dots, U_5$  продолжают нарастать, тем самым, еще больше сгибая идентичные пьезоэлектрические преобразователи первой группы 7 и перемещая их концы дополнительно на величину  $\Delta y_2 = (y_2 - y_3)$ , а зубчатые рейки на  $\Delta x_2 = \Delta y_2 \cos(\alpha) \sin(\alpha)$ ,

что в свою очередь приводит к выдвиганию штоков 4, 5, так как угол наклона прямоугольных зубьев зубчатой рейки прямого хода 2 удовлетворяет условию  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  (Рис. 6). К моменту времени  $t_3$  напряжения  $U_1, U_2, \dots, U_5$  достигают максимальных значений, результирующее отклонение концов идентичных пьезоэлектрических преобразователей первой группы 7 составляет величину  $h$ , где  $h$  — высота прямоугольных зубьев (Рис. 7, справа), т.е. их высота равна величине максимальных отклонений концов пьезоэлектрических преобразователей 11, результирующее выдвигание каждого из штоков 4 и 5 составляет  $h \cos(\alpha) \sin(\alpha)$ . В момент времени  $t_3$  прикладываемые напряжения  $U_1, U_2, \dots, U_5$  скачкообразно падают, и одновременно с этим подаются напряжения  $U_6 = U_7 = \dots = U_{10}$ , нарастающие по треугольной форме. К моменту времени  $t_4$  идентичные пьезоэлектрические преобразователи первой группы 7 распрямляются, а преобразователи второй группы 8 входят в зацепление с прямоугольными зубьями 14 зубчатой рейки прямого хода 2, этим достигается фиксация штоков 4 и 5 в статическом положении. Таким образом, с момента времени  $t_4$  зубчатая рейка прямого хода 2 входит в очередное зацепление уже со второй группой 8 идентичных пьезоэлектрических преобразователей, и аналогично зацеплению с первой группой 7 штоки 4 и 5 выдвигаются еще на  $h \cos(\alpha) \sin(\alpha)$ . При результирующем выдвигании штоков 4 и 5 на величину  $2h \cos(\alpha) \sin(\alpha)$  первый цикл прямого хода микропривода завершается. Подобным образом реализуются второй, третий, четвертый и т.д. циклы прямого хода микропривода.

Обратный ход микропривода (втягивание штоков) осуществляется также как прямой ход, за исключением того, что в поочередное зацепление входит зубчатая рейка обратного хода 3 с третьей 9 и четвертой 10 группой идентичных пьезоэлектрических преобразователей. Причем, углы наклона зубьев зубчатой рейки прямого 2 и обратного хода 3 имеют противоположенные направления, т.е. угол наклона  $\alpha$  зубьев зубчатой рейки обратного хода 3 удовлетворяет условию  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ , что приводит не к выдвиганию, а к втягиванию штоков 4 и 5 при скольжении концов пьезоэлектрических преобразователей 11 по направляющим скосам прямоугольных зубьев 14 зубчатой рейки обратного хода 3.

Увеличивая или уменьшая число задействованных в работе пьезоэлектрических преобразователей, можно легко регулировать величину усилия, создаваемого микроприводом. Кроме того, у разработки линейные выходные характеристики, низкая инерционность и высокая нагрузочная способность.

## 5 Термоэлектромеханический преобразователь для микроманипулятора

Конструктивный облик существующих микророботов во многом определяется типом применяемых исполнительных механизмов. Они определяют внешний вид и конструкцию микроробота, способы выполнения действий и перемещений на микроуровне и материалы, которые могут быть применены для изготовления его основы. Чаще всего в качестве приводов используются так называемые преобразователи рода энергии, которые часто не содержат ни редукторов, ни датчиков, так как наличие в них кинематических звеньев отрицательно сказывается на быстродействии, надежности, точности, стоимости и стойкости к действию различных возмущающих факторов. Для микромеханизмов разрабатываются принципиально новые типы исполнительных механизмов, отвечающих вышеприведенным требованиям. Наибольший интерес с точки зрения габаритов, точности и массы, представляют следующие типы приводов: пьезоэлектрические, магнито-стрикционные, биметаллические и на базе сплавов с памятью. Электростатические и электромагнитные приводы для микророботов отличаются от обычных только лишь размерами и развиваемыми усилиями, в остальном конструкции практически идентичны.

Большая часть микросистем использует исполнительные механизмы на базе пьезоэлектрического эффекта, который в «больших» робототехнических системах использовался лишь в качестве датчиков обратной связи. Несмотря на такие достоинства, как прочность, устойчивость к воздействию агрессивных сред, химическая инертность, малое энергопотребление, пьезоприводы обладают и рядом недостатков, таких как относительно быстрое изменение пьезоэлектрических свойств со временем, большие значения управляющих напряжений, сложность генерации управляющих сигналов при реализации относительно простых движений, малое значение максимального отклонения конца привода. В последние годы создатели микросистем все чаще в качестве исполнительных механизмов предлагают использовать материалы с памятью формы. Рассмотрим одно из подобных устройств — микротермоэлектромеханический преобразователь, разработанный для использования в микромеханизмах, в частности, мобильных микророботах и микроманипуляторах.

Преобразователь (Рис. 9) содержит деформируемый стержень 1, выполненный из материала с эффектом памяти формы, спиральный электрический нагреватель 2, нижний 3 и верхний 4 ряд термоэлектрических модулей на основе эффекта Пельтье, каждый термоэлектрический модуль крепится к деформируемому стержню с помощью заклепочного крепления 5, допускающего относительное вращение деталей. Пружина изгиба 6

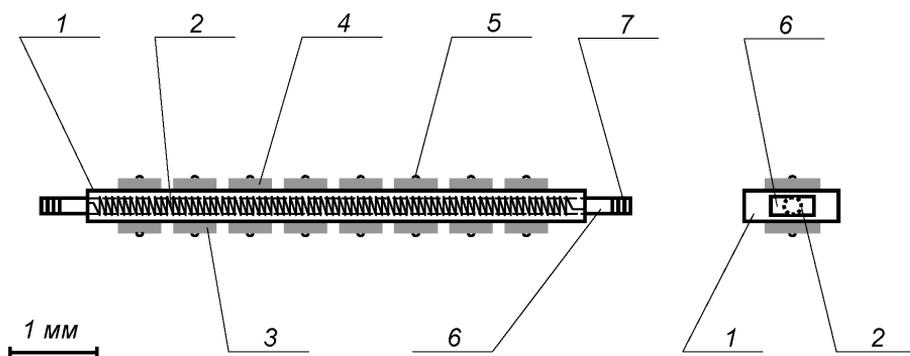


Рис. 9. Конструкция микротермоэлектромеханического преобразователя

спрессована с деформируемым стержнем. Через крепежные приспособления 7 осуществляется передача механической работы потребителям энергии — звеньям 8 и 9 микроманипулятора (Рис. 10, слева) или основанию микросхвата 10 и зажимному пальцу механизма захвата 11 (Рис. 10, справа).

Перед началом работы, до подачи управляющих напряжений, термоэлектромеханический преобразователь для микроманипулятора находится в конфигурации верхней дуги (Рис. 11(а)). После подачи слабого электрического тока в спиральный электрический нагреватель деформируемый стержень, изготовленный из материала с эффектом памяти формы, начинает нагреваться и одновременно восстанавливать свою первоначальную форму, переходя в аустенитное состояние, тем самым изгибая и изменяя непрерывно конфигурацию термоэлектромеханического преобразователя на распрямленную дугу (Рис. 11(б)) и далее — нижнюю дугу (Рис. 11(в)). Возможно также пропускание электрического тока непосредственно через деформируемый стержень, если последний выполнен из электропроводникового материала с эффектом памяти формы. При этом выделится тепловая энергия, которая также приведет к разогреву и изгибу деформируемого стержня. Изгиб термоэлектромеханического преобразователя сопровождается выполнением механической работы, которая передается через крепежные приспособления, что позволяет реализовать вращательный привод двухстороннего действия для звеньев микроманипулятора с поворотом против направления часовой стрелки или захват объекта нижним зажимным пальцем микросхвата. Таким образом, нагреванием деформируемого стержня реализуется первая фаза изгиба термоэлектромеханического преобразователя.

Вторая фаза изгиба (изгиб в обратном направлении) реализуется охлаждением деформируемого стержня нижним и верхним рядами термоэлек-

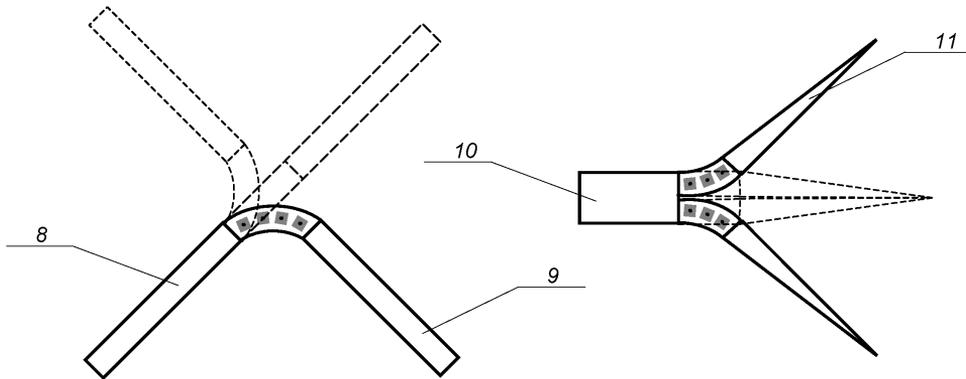


Рис. 10. Сочленение микроманипулятора на основе преобразователя (слева) и механизм захвата микроманипулятора (справа)

трических модулей на основе эффекта Пельтье, тем самым материал с эффектом памяти формы переходит в мартенситное состояние. При подаче слабого электрического напряжения каждый термоэлектрический модуль на основе эффекта Пельтье в местах контакта с деформируемым стержнем поглощает тепло. Для более интенсивного охлаждения используется два ряда термоэлектрических модулей на основе эффекта Пельтье — нижний и верхний, которые существенно ускоряют процесс обратного мартенситного превращения. В мартенситном состоянии деформируемый стержень легко пластически деформируется пружиной изгиба. Под действием силы упругости пружины изгиба, микротермоэлектромеханический преобразователь сгибается в обратном направлении и переходит из конфигурации нижней дуги в верхнюю дугу. Заклепочное крепление, допускающее относительное вращение деталей, не позволяет термоэлектрическим модулям на основе эффекта Пельтье деформироваться, как в процессе обратного, так и прямого мартенситного превращения. Обратный изгиб микротермоэлектромеханического преобразователя сопровождается выполнением механической работы, которая передается через крепежные приспособления, что позволяет реализовать вращательный привод двухстороннего действия для звеньев микроманипулятора с поворотом по направлению часовой стрелки или захват объекта верхним зажимным пальцем микросхвата. Таким образом, охлаждением деформируемого стержня с помощью термоэлектрических модулей на основе эффекта Пельтье реализуется вторая фаза изгиба микротермоэлектромеханического преобразователя.

На этом первый термоэлектромеханический цикл работы завершается. Второй, третий, четвертый и т.д. циклы реализуются аналогично.

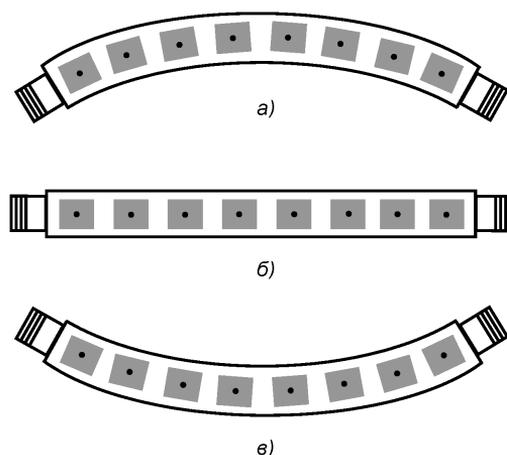


Рис. 11. Преобразователь в холодном (конфигурация верхняя дуга) (а), нагретом (нижняя дуга) (в) и равновесном состоянии (распрямленная дуга) (б)

Таким образом, использование разработанного устройства в микромеханизмах, в частности, в мобильных микророботах и микроманипуляторах позволит упростить генерацию управляющих напряжений, увеличить максимальное отклонение конца преобразователя, кроме того, натуральный образец устройства будет иметь низкие массовые и габаритные показатели.

## 6 Заключение

Разработка рассмотренных микромеханизмов и алгоритмов их управления велась с использованием виртуальной среды проектирования, тестирования и отладки микроэлектромеханических систем. На все из них получены положительные решения формальной экспертизы [7, 8, 9, 10]. В будущем планируется реализация этих, а также целого ряда других новых микромеханизмов в виде натуральных образцов, в качестве компонентов реальной микротехнологической среды.

## Список литературы

- [1] Пугин А. М., Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Мобильный вакуумный пьезоэлектрический микроробот // Патент 22054753 РФ МКИ 3 В 25 J 15/06, 7/00. Оpubл. 20.08.03. Бюл. № 23.

- 
- [2] Пугин А. М., Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Вакуумное захватное устройство // Патент 2210493 РФ МКИЗ H01 L41/09, H02 N 2/00, B 25 J 15/06. Оpubл. 27.05.03. Бюл. № 15.
- [3] Pyasov B. G., Darincev O. V., Munassypov R. A., Migranov A. B. Decision Making on Control of Real Microsystems on the Virtual Model's Basis // Proc. of the IARP Intern. Workshop «MicroRobots, MicroMashines and MicroSystems», Moscow, 24–25 Apr., 2003. P. 157–163.
- [4] Fearing R.S. Survey of sticking effects for micro parts handling // IEEE/RSJ Conf. on Intell. Robots and Systems, p. 212–217, Pittsburgh, PA, 1995.
- [5] Глаговский Б. А., Пивен И. Д. Электротензометры сопротивления / 2 изд., Л., 1980. С. 31–32.
- [6] Най Д. Физические свойства кристаллов и их описание с помощью тензоров и матриц / Перевод с англ., 3 изд., М., 1986. С. 278–279.
- [7] Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Капиллярный микрозахват с обратной связью // Полож. решение форм. экспертизы по заявке №2004105379/02 с приоритетом от 24.02.2004 г.
- [8] Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Микросхват с силовым очувствлением // Полож. решение форм. экспертизы по заявке №2004105380/02 с приоритетом от 24.02.2004 г.
- [9] Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Двухсторонний пьезоэлектромеханический микропривод // Полож. решение форм. экспертизы по заявке №2004105336/02 с приоритетом от 24.02.2004 г.
- [10] Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Термоэлектромеханический преобразователь для микроманипулятора (варианты) // Полож. решение форм. экспертизы №2004105381/02 с приоритетом от 24.02.2004 г.