

Использование технологий виртуализации в системах управления микророботами и микросистемами¹

Даринцев О.В.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

При синтезе систем управления микророботами серьезнейшей проблемой является слабая информационная поддержка: миниатюрные размеры роботов, ограниченность вычислительных и энергетических ресурсов не позволяют в полной мере реализовать все необходимые каналы сбора (обработки) информации. Некоторые параметры внешней среды и микрообъектов (микросистем), имеющие существенное влияние на эксплуатационные характеристики и функционирование микросистем, принципиально не могут быть измерены: шероховатость, профиль пятна контакта, величина заряда, распределенного по поверхности объекта и т.д. Выходом из создавшейся ситуации может стать использование виртуальных информационных систем, построенных на базе интеллектуальных алгоритмов, которые позволяют определить необходимые параметры по косвенным признакам на основе экспертных данных и накопленной статистики взаимодействия. При этом система управления микророботами усложняется незначительно, информация, поступающая с реальных и виртуальных измерительных систем, не разделяется, т.е. происходит частичное «погружение» управляющих контуров в виртуальную среду.

1. Введение

Синтез систем управления мобильных манипуляционных микророботов требует разработки специализированных методик, учитывающих особые условия эксплуатации, влияние масштабного фактора и уникальные характеристики микроприводов.

Проведенный анализ конструкций микророботов и микроманипуляционных устройств показал, что наиболее перспективным при создании приводов является использование обратного пьезоэлектрического эффекта. В отличие от других типов приводов, пьезоприводы обладают высокой точностью, до 1 \AA , и практически линейной механической характеристикой, высоким КПД и т.д., к недостаткам же можно отнести их хрупкость и наличие гистерезиса. На базе обратного пьезоэлектрического эффекта строятся как приводы прямолинейного перемещения, так и приводы вращения, что объясняет факт их широкого применения в микроманипуляционных устройствах.

Особенностью конструкции пьезоэлектрического мобильного микроманипуляционного робота «МикРоб III» и последующих разработок, является

ее модульность: подвижная платформа и манипуляционная система выполнены в виде автономных модулей с применением унифицированных пьезоприводов.

Подвижная платформа приводится в движение при помощи трех пьезоприводов, расположенных в вершинах равностороннего треугольника, что позволяет существенно упростить алгоритмы управления и упростить реализацию поворотов платформы. Более компактная конструкция обеспечивает достижение более высоких скоростей разворота платформы в связи с тем, что существует прямая зависимость между величиной поворота платформы и расстояниями от центра масс конструкции до точек расположения приводов.

Микророботы семейства МикРоб способны выполнять перемещения рабочего инструмента с точностью до 10 нм, передвигаться со скоростью до 12 мм в секунду по рабочей поверхности, которая, в свою очередь, характеризуется шероховатостью $Rz \approx 3,2$. На базе этого типа микророботов будет показана перспективность использования интеллектуальных алгоритмов и методик виртуализации.

2. Виртуализация информационной подсистемы мобильной платформы

Конструктивный облик существующих микророботов во многом определяется типом применяе-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Программы № 1 фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН (проект «Научные основы робототехники и мехатроники») и РФФИ (грант № 11-08-97016-р_поволжье_а).

мых приводов. Привод определяет не только внешний вид и конструкцию микроробота, способы выполнения действий и перемещений на микроуровне, но и материалы, которые могут быть применены для изготовления его основных компонентов. Поэтому, в первую очередь, при конструировании необходимо провести выбор исполнительных механизмов (приводов). Довольно часто этот выбор сводится к выбору физического эффекта, выходом которого является механическая энергия.

Основное требование к исполнительным механизмам, применяемым в микроробототехнике, — это отсутствие каких-либо механических передач или преобразователей видов движения. Перемещения, которые должны реализовываться этими приводами, более чем на порядок ниже величины зазора (люфта), которая может быть достигнута при прецизионном изготовлении механических передач. Поэтому в качестве приводов чаще всего используются так называемые преобразователи рода энергии (ПРЭ). Наиболее распространенными ПРЭ являются обращенные электромеханические преобразователи, потребность в которых объясняется тем, что протекание практически любого технологического процесса связано с необходимостью совершать механическую работу.

Микророботы отличаются простотой конструкции и процесса реализации движений, в случае пьезоэлектрического мобильного микроробота это «единичный» шаг. Тем не менее, управление объектом данного класса в силу ряда причин, часть из которых была приведена и смоделирована выше, является сложной и неоднозначной задачей. Особо жесткими являются требования к системе управления по обеспечению требуемой точности выполнения перемещения и манипуляций, а в некоторых случаях и к скорости выполнения данных действий. Иногда в качестве требования выступает корректная реализация одного из способов выполнения перемещения.

В силу малой величины шага и особенности процессов реализации движения у объекта управления появляются свойства, нетипичные для макросистем робототехники. Это явление связано с проявлением особенностей функционирования объектов в микромире.

Построение адекватной обратной модели (ОМ) мобильного микроробота как объекта управления с приемлемой величиной времени расчетов управляющих воздействий предоставляет возможность применить ОМ непосредственно в качестве регулятора управляющей части системы. В этом случае система управления при генерации управляющих сигналов будет учитывать наиболее значимые

особенности объекта и в системе будут присутствовать только ошибки, связанные с ориентацией приводов платформы микроробота (постоянная составляющая, но на практике практически не поддающаяся измерению) и качеством поверхности движения (случайная составляющая, т.к. необходимо учитывать величину отдельных «пииков», а не их среднюю величину).

Грубая модель выполнения перемещения микроробота $\mathbf{Z}(t)$ может быть представлена в виде:

$$p\mathbf{Z}(t) = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}(t),$$

где \mathbf{V} — частота подаваемого в модель сигнала управления $\mathbf{U}(t)$; \mathbf{K} — линейный коэффициент зависимости напряжения — перемещение; \mathbf{I} — единичная матрица; $\mathbf{H} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}$ — матричный оператор, где, в свою очередь,

$$\mathbf{B} = \begin{vmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ b_{x1} & b_{x2} & b_{x3} & b_{y1} & 0 & b_{y3} \end{vmatrix} — матрица$$

коэффициентов для расчета элементарных движений по x , y координатам и углу поворота; \mathbf{R} — матрица перехода из локальной системы координат в глобальную.

Предлагаемая модель перемещения микроробота достаточно проста, так как она строится на основе геометрической и кинематической моделей мобильных пьезоэлектрических микророботов класса МикРоб. Но, в то же самое время, эта модель предъявляет жесткие требования к соосности приводов, практически абсолютному равенству площадей сегментов, точности изготовления платформы и другим параметрам, приводящим к изменению коэффициента передачи и, следовательно, отклонениям от желаемого характера движения. Предлагаемая модель микроробота будет адекватной, если качество рабочей поверхности стабильно и не меняется в процессе эксплуатации, микроприводы обладают идентичными характеристиками, конструктивные элементы, определяющие жесткость подвижной платформы, изготовлены с большой точностью.

Проведенные эксперименты показали, что шаг, выполняемый пьезоприводом, не является величиной постоянной, а зависит от технологического разброса характеристик и от внешних возмущающих воздействий, вызванных шероховатостью поверхности, сравнимой с величиной отдельного шага и действием адгезионных сил.

В связи с этим обстоятельством, предлагается коэффициент передачи представить в виде суммы постоянной величины и параметрического возмущения, а движение микроробота по траектории

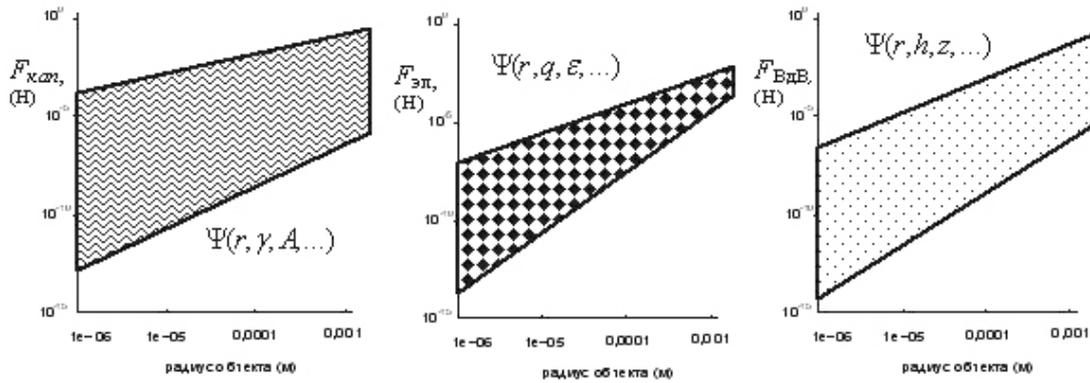


Рис. 1. Области достоверности для адгезионных сил

можно представить в виде нестационарного уравнения:

$$p\mathbf{Z}(t) = V \cdot I \cdot N \cdot [K^* + \Delta K(t)] \bar{\rho}(t). \quad (1)$$

Особенностью данного описания, в отличие от традиционного, является то, что оператор, связывающий $\mathbf{Z}(t)$ и $\bar{\rho}(t)$, является нестационарным коэффициентом передачи, не содержащим дифференциальных компонент, т.е. является голономным оператором. При этом постоянную составляющую K^* можно рассматривать как номинальный коэффициент передачи объекта, а нестационарную составляющую $\Delta K(t)$ — как некоторое эквивалентное параметрическое возмущение, действующее на объект и вызванное нелинейными свойствами поверхности, изменением ее характеристик во время движения и технологическим разбросом характеристик пьезоприводов.

При этом для параметрического возмущения $\Delta K(t)$ может быть получено только приближенное значение, т.к. действующие величины адгезионных сил, как возмущений со стороны окружающей среды, носят вероятностный характер (рис. 1).

Т.е. для режима эксплуатации \mathbf{R} действующие на микроробот сигнальные возмущения \mathbf{F}_{out} будет справедливо представить в виде следующего выражения:

$$\mathbf{F}_{out} = \sum_i^{n(\mathbf{R})} (\alpha_i \cdot \mathbf{F}_i^R) + \Delta^R,$$

где α_i — коэффициент масштабирования адгезионной силы \mathbf{F}_i^R , отражающий особенности ее проявления на режиме эксплуатации \mathbf{R} ; Δ^R — возмущения, проявляющиеся на режиме \mathbf{R} , но не имеющие аналитического выражения и носящие вероятностный характер.

В процессе эксплуатации микроробота его параметры меняются вследствие износа, старения компонентов, действия окружающей среды и т.д., но эти изменения можно учесть при управлении,

используя статистику, накопленную во время опытной эксплуатации, и снизить их влияние путем тщательной конструкторской проработки конструкции. Т.е. в формуле (1) можно постоянную составляющую K^* представить в виде переменной с небольшой величиной дрейфа во времени, или корректировать ее во время эксплуатации в соответствии с экспериментальными данными.

Более сложным представляется аналитическое описание $\Delta K(t)$, т.к. кроме визуальной обратной связи (координаты, ориентация микроробота и скорость перемещения) другой информации о взаимодействии микроробота с окружающей средой нет. При этом действие возмущений зависит от режима функционирования микроробота: перемещение (крейсерский, оперативный и точный режимы), выполнение технологических операций (манипуляции, сборка, тестирование и т.д.), а также от типа микроприводов, особенностей конструкции, типов контактирующих материалов и др. Поэтому для управления микророботами необходимо использовать простейшие модели кинематики и динамики, т.к. на высокоточные перемещения большее влияние оказывают особенности взаимодействия объектов на микроуровне, а не конструкция узлов микроробота и тип микропривода. Чем выше точность реализуемого перемещения, тем существеннее влияние возмущений, а т.к. величина адгезионных сил может иметь достаточно большой разброс (рис. 1), то необходима разработка алгоритма предсказания величин адгезионных сил. Для достижения необходимой точности (для корректной работы оборудования достаточно 85–90%) предсказания необходимо использовать модельные данные, данные экспериментов и текущие данные обратной связи, на основе которых можно сформировать сначала качественную картину происходящего на микроуровне, а затем уточнить коэффициенты α_i для наиболее значимых адгезионных проявлений.

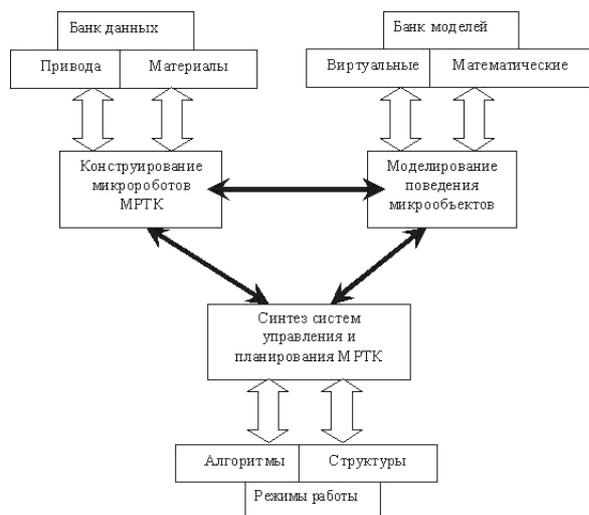


Рис. 2. Информационная модель функционирования систем управления МРТК

Так как при реализации перемещения микроробота возможны три различных типа движения, то необходимо построение трех различных вариантов объединения кинематической, динамической и модели возмущающих воздействий в эталонную модель и обратную модель для реализации регулятора в системе управления. А наиболее простым вариантом реализации набора моделей будет их реализация в виде виртуальной надстройки системы управления, а дополнительным входным сигналом для регулятора будет генерируемый этой надстройкой вектор начальных угловых установок приводов микроробота [1–2].

Подводя итог вышесказанному, и основываясь на концепции управления микроробототехническими комплексами, предлагается строить систему управления с использованием следующей информационной модели (рис. 2). Предлагаемая информационная структура представлена в форме триады, что определяется самой картиной взаимодействия между элементами структуры. Как это было показано выше для управления микросистемами и микророботами необходимо знание об эффектах, проявляющихся в микромире, которые, в свою очередь, в значительной степени зависят как от материалов, из которых изготовлены компоненты, так и от предполагаемого режима работы. Во время эксплуатации МЭМС и микророботов свойства элементов, характер взаимодействий могут меняться, иногда весьма значительно, поэтому необходимо накопление статистической информации в виде специализированных банков данных, моделей и режимов.

3. Манипуляционные системы микророботов, виртуальные подсистемы контроля и управления

Когда объекты, с которыми производятся манипуляции, имеют размеры менее 1 мм, гравитационные и инерционные силы, пропорциональные объему объекта, оказывают меньшее влияние на технологические процессы по сравнению с силами адгезии (электростатические, Ван-дер-Ваальса и поверхностного натяжения), возникающими при контакте микрообъектов с рабочими поверхностями инструментов, манипуляторов и технологической оснастки, и пропорциональные площади.

При микросборке основными причинами адгезии (прилипание, сцепление, притяжение) являются электростатические силы, силы Ван-дер-Ваальса и поверхностного натяжения (капиллярные силы). Электростатические силы проявляются под действием электрических зарядов, которые наводятся от сил трения или передаются контактной электрификацией. Силы Ван-дер-Ваальса являются следствием мгновенной поляризации атомов и молекул, то есть являются эффектами квантовой механики. Капиллярные силы возникают из-за присутствия жидкой пленки микроскопических масштабов на взаимодействующих поверхностях. В зависимости от условий внешней среды, используемых материалов, поверхностных свойств объектов и т.д., также можно выделить такие проявления адгезии, как силы сцепления/упругости (pull-of-force), возникающие во время контакта при деформации поверхности микрообъекта инструментом, магнитные силы и эффекты микротрибологии. Моделирование адгезионных эффектов показало, что при уменьшении размера объекта менее 3–4 мкм упомянутые выше силы становятся более значимыми по сравнению с гравитационным воздействием.

Расчеты действующих на микрообъекты сил носят эмпирический характер, так при всех прочих равных параметрах объекта истинное соотношение адгезионных сил может варьироваться в достаточно широком диапазоне, так как оно определяется целым рядом параметров окружающей среды, шероховатостями поверхностей, контактируемыми материалами, которые измерить практически невозможно в рабочих условиях. Вместе с тем, на практике из всех составляющих адгезии именно электростатические силы создают наибольшие сложности при работе с микрообъектами и выполнении микросборочных операций. Это можно объяснить тем, что поверхностный заряд индуцируется фактически при выполнении каждой операции, где есть трение, взаимодействия и контакты микрообъектов с инструментами, паллетами и т.д. К

тому же, всегда наблюдается эффект «конденсатора», поскольку между поверхностями микрообъектов и инструмента всегда присутствует определенный воздушный зазор из-за наличия на поверхностях шероховатостей, неровностей и т.д. Электростатические силы, в отличие от других составляющих адгезии, способны проявляться не только на поверхности, но и по всему объему микрообъектов. Борьба с негативным влиянием электростатических сил наиболее сложна и, как правило, малоэффективна.

Все вышеперечисленные возмущения относятся к классу случайных и не поддаются измерению в явном виде или их оценка требует значительных временных затрат. Случайный характер адгезионных сил проявляется не только при работе захватных устройств традиционных принципов действия, но и при работе концевых эффекторов. В математических моделях микроконтактной динамики, используемых при синтезе систем управления, с целью упрощения были учтены не все эффекты (о влиянии некоторых возмущений на микроуровне сегодня точно не известно, например, короткодействующих молекулярных сил). Но на основе результатов проведенных вычислительных экспериментов можно сделать вывод, что при работе концевых эффекторов, величины адгезионных сил являются также труднопрогнозируемыми, а на микроманипуляционные операции оказываются комбинированные воздействия.

Поэтому при генерации управляющих воздействий сборочными микромеханизмами проанализировать и учесть влияние каждого из возмущающих факторов практически невозможно из-за отсутствия численных показателей для большинства из них, а также чрезмерного увеличения сложности модели. Предлагаемый подход основан на синтезе интеллектуальной системы управления с виртуальной надстройкой, в которой реализован блок предсказания (предиктор), построенный в нейросетевом базисе и использующий в процессе функционирования как результаты моделирования различных составляющих адгезии, так и текущую доступную информацию с сенсорных систем.

Основная особенность выполнения микроманипуляций состоит в том, что в отличие от захвата «макро» изделий, где усилие захвата рассчитывается исходя из массы изделия, его поверхностных свойств, динамики системы манипулирования и сил сцепления с рабочей поверхностью схвата, при микроманипулировании необходимо учитывать поверхностные эффекты [3].

Таким образом для вычисления F_{cxb}^{mp} силы сжатия губок схвата необходимо использовать форму-

лу, отличную от классической, которая включает не только стандартные параметры, такие как масса микрообъекта m , коэффициент трения μ , динамические характеристики манипуляций (ускорения, возникающие при перемещении объекта) $a_{\text{возм}}$, но и адгезионные силы $F_{\text{адз}}$, шероховатость поверхности (материал) δ , а также условия эксплуатации схвата M .

Классический (традиционный) вариант формулы для расчета силы схвата F_{cxb}^{mp} выглядит следующим образом:

$$F_{cxb}^{mp} = K_1 \cdot K_2 \cdot (F_{zp} + m \cdot a_{\text{возм}}),$$

где K_1 — коэффициент, зависящий от положения заготовки по отношению к губкам схвата и направления действия силы тяжести; K_2 — коэффициент запаса.

Анализ экспериментальных данных показал, что роль гравитационной силы при выполнении микроманипуляций сводится часто к необходимости придания захватываемому объекту нужной ориентации и дополнения действующих адгезионных сил до минимально необходимого уровня. Так, при захвате сферического микрообъекта, радиус которого 50 мкм, схватом с плоскими губками, сила поверхностного натяжения имеет величину в пределах 10^{-5} Н, сила Ван-дер-Ваальса — 10^{-7} Н, электростатическая сила — 10^{-9} Н, в то же самое время, гравитационная сила равна примерно 10^{-9} Н.

Поэтому для вычисления силы схвата предлагается использовать следующую формулу, где добавляется «положительный» (для операции захвата) эффект адгезионных сил:

$$F_{cxb} = K_1 \cdot K_2 [\mu \cdot (F_{zp} + m \cdot a_{\text{возм}}) + \mathbf{F}_{\text{адз}}(M, \delta)],$$

где $\mathbf{F}_{\text{адз}}(M, \delta)$ — сумма наиболее эффективных адгезионных сил при заданных режимах работы схвата и для данной пары взаимодействующих материалов.

Прогнозирующую оценку недетерминированных возмущений предлагается проводить на основе информации, поступающей на вход в виде векторов текущего состояния $Sf(k)$ (сигналы обратной связи, получаемые с сенсорных систем), косвенных и размерных факторов $Sv(k)$ (данные в виде констант, описывающих основные свойства окружающей обстановки и используемых материалов), текущих коэффициентов взаимодействий $Sa(k)$ (выход математических моделей микромира, моделей микроразрушения), а также значений векторов текущего состояния за один $Sf(k-1)$, два $Sf(k-2)$, три такта $Sf(k-3)$ назад. Выходом предиктора будет являться коэффициент $\alpha(k+1)$ уменьшения силы захвата F_{cxb}^{mp} , величина которой была вычисле-

на классическими методами (1), для последующей операции:

$$\alpha(k+1) = RBF(Sf(k), Sv(k), Sa(k), \alpha(k), Sf(k-1), Sf(k-2), Sf(k-3)),$$

где RBF — проводимое сетью преобразование вход–выход.

Предиктор синтезировался в виде одношагового блока прогнозирования на базе прямонаправленной трехслойной нейронной сети с радиально-базисными активационными функциями нейронов скрытого слоя (РБФ-сети):

$$f_i(Y, c_i, \sigma_i) = \exp\left(-\frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{j=1}^V (Y_j - c_{i,j})^2\right), \quad i = \overline{1, H},$$

где $Y = (Sf(k), Sv(k), Sa(k), \alpha(k), Sf(k-1), Sf(k-2), Sf(k-3))$ — вектор входных сигналов сети; $c_i = (c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,V})$ — вектор координат центра активационной функции i -го нейрона скрытого слоя; σ_i — ширина окна активационной функции; V — количество нейронов во входном слое сети; H — количество нейронов в скрытом слое.

Линейные выходные нейроны суммируют сигналы со скрытого слоя и формируют выход сети, генерируя предсказания:

$$Z_j(k+1) = \sum_{i=1}^H w_{ji} f(Y, c_i, \sigma_i),$$

где j — номер нейрона выходного слоя; w_{ji} , $i = \overline{1, H}$ — весовые коэффициенты.

Проведенные исследования доказывают, что синтез одношагового нейросетевого предиктора для оценки величин микроэффектов при захвате объектов возможен даже при отсутствии прямой информации обо всех действующих на микрообъект силах, — достаточно только косвенных и модельных данных. Исходя из полученных результатов, использование концевых эффекторов с предложенной прогнозирующей моделью управления наиболее эффективно в задачах по сборке гибридных микросистем, где требуется высокая точность в прикладываемых усилиях, т.к. отдельные детали имеют толщину несколько мкм и ниже (кантилеверы, пластины, мембраны и т.д.). Несмотря на необходимость затрат машинных ресурсов на прогнозирование, в результате достигается минимизация времени сборки микроизделия за счет увеличения быстродействия манипуляционной системы и снижается вероятность выхода из строя захватываемых микродеталей, т.к. усилие приводов значительно ниже.

Достоверность работы виртуальной надстройки со встроенным предиктором подтверждена положительными результатами ее тестирования на моделях адгезионных эффектов и экспериментальными данными [4]. Все это указывает на перспективность использования виртуальных технологий для решения задач управления микроманипулятором.

4. Заключение

В статье показана лишь часть возможностей, реализуемых при помощи виртуальных технологий, применительно к синтезу и использованию систем управления микроробототехническими устройствами. Использование технологий виртуализации позволяет проводить реконструкцию состояния окружающей среды по косвенным показателям и генерировать «виртуальные» сигналы для систем управления, как результат прямого «измерения» параметров рабочей среды: шероховатость, величины адгезионных взаимодействий и т.д. При этом нагрузка на бортовой управляющий комплекс снижается практически на порядок, система корректно парирует возмущения внешней среды

Список литературы

- [1] Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Виртуальный имитатор технологического комплекса сборки микросистем // Вестник компьютерных и информационных технологий. М.: Изд-во «Машиностроение». 2006. № 10. С. 19–25.
- [2] Даринцев О.В. Использование интеллектуальных алгоритмов при построении систем управления микроробототехническими комплексами // Искусственный интеллект. Донецк, ИПШ МОН і НАН України «Наука і освіта». № 3, 2008. С. 408–418.
- [3] Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Моделирование работы микроманипуляционного устройства, изготовленного с использованием наноструктурных материалов // Нано- и микросистемная техника. М.: Изд-во «Новые технологии». 2007. № 11. С. 19–23.
- [4] Даринцев О.В. Система управления и конструкция капиллярного микрозахвата // Материалы XX Междунар. науч.-техн.конфер. «Экстремальная робототехника. Нано- микро- и макророботы (ЭР-2009)». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. С. 335–337.