



Многоканальные системы сбора и обработки информации для полунатурного стенда: архитектура и алгоритмы обработки¹

Даринцев О.В.* , Богданов Д.Р.* , Даринцева Е.О.**

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

**ФГБОУ ВПО УГАТУ, Уфа

В статье описана структура многоканальной системы сбора и обработки информации, построенной с учетом специфики работы микрозахвата, реализующего удержание микрообъектов за счет капиллярных сил. Информационная система позволяет одновременно получать значения температуры и влажности в различных точках рабочей среды, что достигается благодаря использованию специфических особенностей вычислительного ядра, корректной организации каналов обмена данными с цифровыми датчиками и специализацией протоколов.

1. Введение

Последнее время характеризуется не только увеличением номенклатуры выпускаемых МЭМС датчиков, но и расширением их функциональных возможностей за счет усложнения электронных схем и более глубокой интеграции механических, гидравлических, оптических и прочих активных элементов миниатюрных изделий [1, 2]. Интеграция разнородных, с технологической точки зрения, элементов требует реализации качественно нового уровня выполнения сборочных операций. Необходимо не только гарантировано захватывать и удерживать объект, но и обеспечить требуемую производительность при снижении вероятности разрушения или деформирования объекта. Особенности взаимодействия микрообъектов, в которых доминирующими являются адгезионные силы, не позволяют эффективно использовать «классические» пальцевые — фрикционные захваты. Так, при удержании микрокомпонентов сжимающимися губками схвата (микропинцет), велики вероятности пластических деформаций, самопроизвольного изменения ориентации, удержания объекта при раскрытых губках за счет накопления статического электричества и т.д. Широко используются в МЭМС дат-

чиках различные чувствительные элементы в виде мембран, пленок, тонкостенных объемных элементов, что также делает невозможным использование классических захватных механизмов. Поэтому в последнее время различные исследовательские центры активизировали свою работу в области создания специфических захватных устройств, базирующихся на оригинальных физических эффектах. Новые способы захвата и удержания микрообъектов, особенности среды функционирования, в свою очередь, требуют новых способов организации каналов обратной связи, так как достаточно часто функционирование микроинструмента характеризуется как работа в условиях «информационного голода». Экспериментальные работы, проводимые с прототипом капиллярного микрозахвата в лаборатории «Робототехника и управление в технических системах» ИМех УНЦ РАН, показали, что для организации корректного управления необходимо построение специализированной информационной системы, позволяющей генерировать управляющие сигналы на основе состояния рабочей среды.

2. Капиллярный микрозахват: конструкция и принцип работы

Капиллярный микрозахват является технической реализацией полученного ранее патента [3] и представляет собой лабораторный стенд для изуче-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-97016-р_поволжье_a).

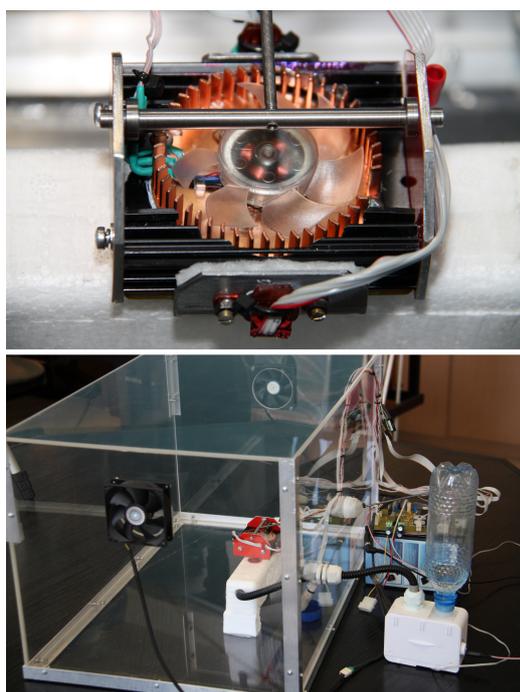


Рис. 1. Капиллярный микрозахват (сверху) и лабораторный стенд

ния поверхностных свойств наноструктурных материалов, а также полигон для проверки работоспособности интеллектуальных систем управления и сбора информации. Для экспериментальной проверки предлагаемой методики построения интеллектуальной системы управления капиллярного микрозахвата были изготовлены прототип устройства и лабораторный стенд, обеспечивающий требуемые параметры рабочей среды (рис. 1). Для работы микрозахвата необходимо гарантировано создать жидкую пленку на рабочей поверхности, при этом нежелательно образование крупных капель. Поэтому в качестве рабочей поверхности была использована металлическая пластина, как материал с высокой смачиваемостью, что гарантирует при конденсации пара образование тонкой пленки воды, а также позволяет быстро и эффективно очищать поверхность от посторонних веществ. В качестве охлаждающего элемента использовался серийный термоэлектрический модуль (ТЭМ), работа которого основана на реализации эффекта Пельтье. Для обеспечения необходимых температуры и влажности в состав стенда входят вентиляционная система на базе двух управляемых вентиляторов и пьезоиспаритель с возможностью программного управления подачей пара в рабочую зону.

Отличие от известных типов микросхватов, предлагаемая конструкция обеспечивает более бе-

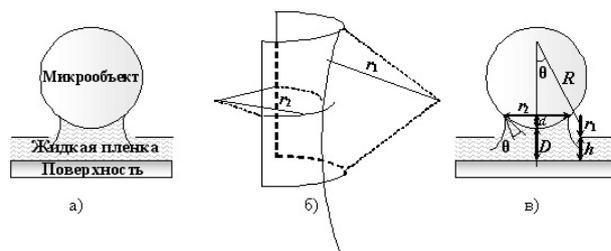


Рис. 2. Силы поверхностного натяжения между микрообъектом и поверхностью (рабочий орган или подложка): а) образование «шейки»; б) пояснение к формуле Лапласа; в) расчет капиллярной силы

режное манипулирование с микрообъектами благодаря использованию капиллярных сил, вызванных взаимодействием образованной на рабочей поверхности жидкой (межфазной) пленки и объекта. Природа этих сил определяется межмолекулярными взаимодействиями и структурой поверхностного слоя контактирующих объектов. Когда микрообъект соприкасается с межфазной пленкой на поверхности рабочего органа или подложки, происходит изменение формы пленки — образуется «шейка» (рис. 2(а)). Вода смачивает поверхность рабочего органа, так как согласно соотношению Неймана энергетически более выгоден контакт жидкости с материалом поверхности, чем с воздухом. Искривленная поверхность «шейки» будет стремиться к выпрямлению, что возможно только за счет отпущения микрообъекта, поэтому возникает сила притяжения между микрообъектом и рабочей поверхностью захвата.

Определить «грузоподъемность» схвата возможно путем грубой оценки величины капиллярной силы. Считаем, что радиус микрообъекта намного превосходит все остальные характерные размеры задачи. На рис. 2(б),(в) введены следующие обозначения: D — расстояние «рабочая поверхность-образец»; d — «глубина погружения»; h — толщина пленки; r_1 — меньший радиус кривизны жидкой поверхности; r_2 — радиус площадки соприкосновения поверхности с жидкостью; θ — краевой угол для линии раздела трех сред.

Согласно формуле Лапласа давление в жидкости будет меньше атмосферного на величину (рис. 2(в)):

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \approx \frac{\gamma}{r_1}, \quad r_1 \ll r_2,$$

где γ — коэффициент поверхностного натяжения.

Давление P , которое «притягивает» объект, приложено к поверхности соприкосновения рабочего органа с жидкостью на площади $\pi r_2^2 \approx 2\pi R d$,

где R — радиус сферы, сегмент которой ограниченный углом равным углу смачивания и совпадает с площадкой контакта. Тогда сила притяжения $F_{\text{кап}}$ микрообъекта к рабочему органу, обусловленная капиллярным эффектом, составляет

$$F_{\text{кап}} = P2\pi R d = 2\pi R d \frac{\gamma}{r_1}.$$

Как видно из рис. 2(б) $r_1 \cos \theta + r_1 = D + d - h$. Таким образом

$$F_{\text{кап}} = \frac{2\pi R \gamma (1 + \cos(\theta))}{1 + (D - h)/d}.$$

Если можно пренебречь толщиной межфазной пленки ($h = 0$), то справедливо равенство $2r_1 \cos \theta \approx D + d$, и формула упрощается до

$$F_{\text{кап}} = \frac{4\pi R \gamma \cos \theta}{1 + D/d}.$$

Чтобы исключить из формулы d , для оценок воспользуемся максимальным значением капиллярной притягивающей силы, которое достигается при $D = 0$. При этом допущении получим формулу без неизвестного параметра d :

$$F_{\text{кап}} = F_{\text{max}} = 4\pi R \gamma \cos \theta.$$

Если принять, что краевой угол мал, то есть $\cos \theta \approx 1$, то формула для грубой оценки капиллярной силы принимает «окончательный» вид:

$$F_{\text{к}} = 4\pi R \gamma.$$

Таким образом, величина силы, удерживающей микрообъект, зависит не только от свойств жидкости γ , но и от смачиваемости рабочей поверхности, величины площади контакта и т.д. Значение силы удерживающей объект, рассчитанное по вышеприведенной формуле, может значительно отличаться от реального значения при постоянной площади смачивания из-за изменения свойств контактирующей системы или объема капли. Изменение параметров контакта происходит за счет происходящих физико-химических процессов — испарения жидкости, взаимного растворения твердого тела и жидкости, адсорбции, химических реакций и т.д. Поэтому определение неравновесных краевых углов θ должно производиться не только по скорости растекания жидкости, но и с учетом одного из сопутствующих физико-химических процессов (в нашем случае, скорее всего с учетом испарения).

Конденсация влаги и испарение ее с рабочей поверхности схвата определяется параметрами рабочей среды: температурой и влажностью возду-

ха, находящегося внутри замкнутого объема лабораторной установки, поэтому для обеспечения корректной работы схвата, а также требуемого быстрого действия необходимо своевременно и точно получать данные из информационной системы.

3. Архитектура многоканальной информационной системы полунатурного стенда

Для работы системы управления схватом необходима, как минимум, следующая информация: значения температуры холодной и горячей поверхностей схвата, температура и влажность окружающей среды [4]. Так как построение точной математической модели устройства затруднено, что связано с нестационарным характером происходящих на рабочей поверхности процессов, система управления строится на базе алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей, что позволяет реализовать требуемое многообразие режимов работы, подстройку параметров контура управления для определенной рабочей точки.

Значения температуры на холодной и горячей сторонах схвата (элемента Пельтье) используются для расчетов в системе управления величины силы тока, протекающего через активный элемент, потребной скорости вращения вентилятора системы отвода тепла от активного элемента. Так оптимальная сила тока, протекающего через элемент Пельтье рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{опт}} = \frac{\alpha \sigma S}{l} T_x,$$

где α — коэффициент термоЭДС (коэффициент Зеебека); σ — удельная теплопроводность ветвей термоэлемента; S — площадь сечения ветви полупроводникового термоэлемента; l — длина ветви термоэлемента; T_x — температура холодной стороны. Эффективность работы охладителя зависит от способа отвода тепла от горячей стороны элемента Пельтье. В построенном варианте лабораторного стенда имеется возможность управлять мощностью теплоотвода за счет управления частотой вращения вентилятора.

Температура и влажность окружающей среды используются для определения точки росы, т.е. максимальной температуры холодной стороны, при которой начинается интенсивная конденсация водяных паров из воздуха и образование капель или пленки на рабочей поверхности. В известных методиках определения точки росы, скорости конденсации пара и испарения воды с поверхности рекомендуется использовать номограммы или табличные значения, что при высокой динамике процес-

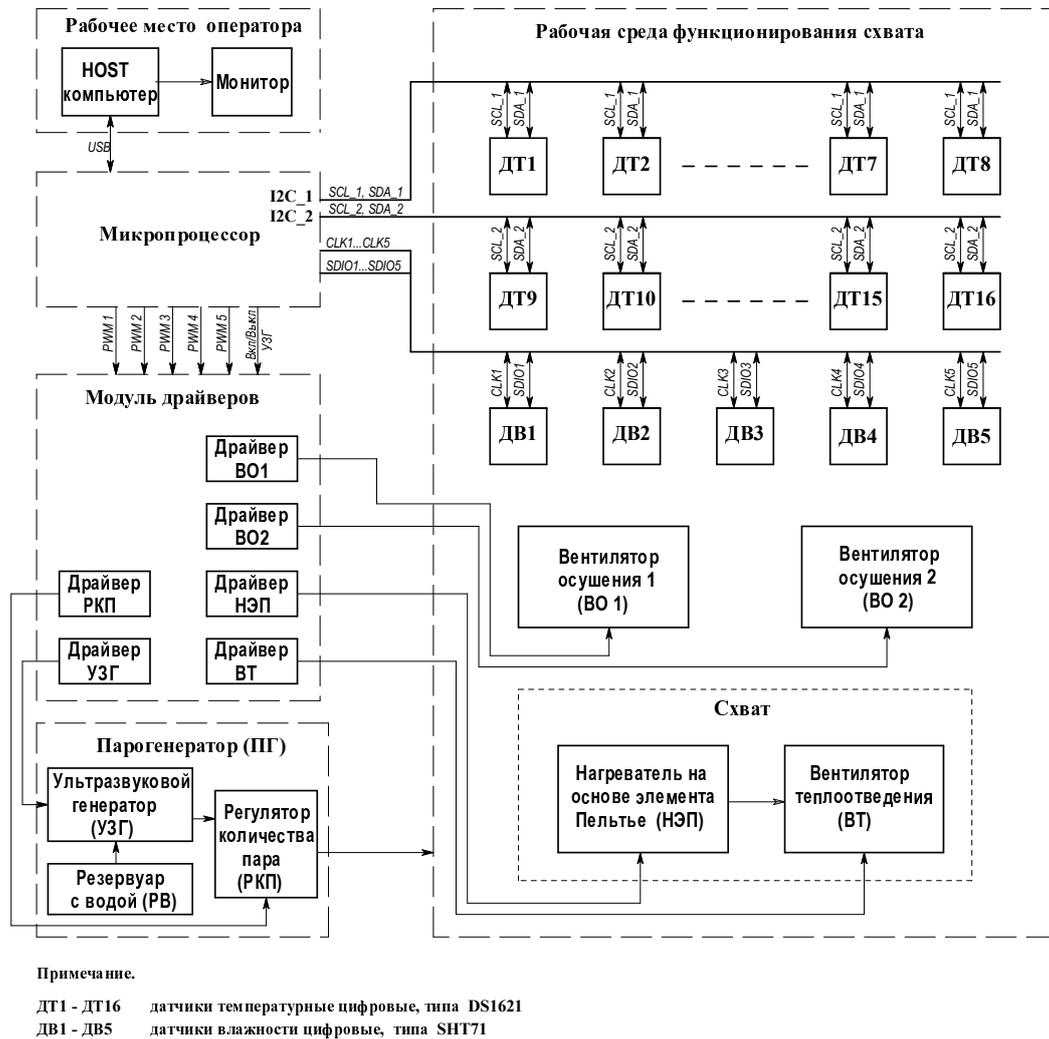


Рис. 3. Структура информационно-управляющей системы полунатурного стенда

са манипулирования не всегда осуществимо. Также следует учитывать и возникающие в процессе функционирования конвективные потоки. Приблизительное значение для точки росы возможно получить при использовании формулы:

$$T_p = \frac{b\gamma(T, RH)}{a - \gamma(T, RH)},$$

где $a = 17, 27^\circ\text{C}$; $b = 237, 7^\circ\text{C}$; $\gamma(T, RH) = \frac{aT}{b + T} + \ln RH$; T — температура окружающей среды; RH — влажность окружающей среды в объемных долях ($0 \div 1$).

Вычисленное значение температуры точки росы обычно уменьшается на $1 \div 2$ градуса, а затем принимается за требуемую температуру холодной стороны при расчетах потребной силы тока. Но, так как при работе схвата тепло от горячей стороны

удаляется в окружающий рабочий объем, что приводит к изменению как температуры, так и влажности окружающей среды, поэтому в системе используются два вентилятора осушения. Управление частотой вращения этих вентиляторов, а, следовательно, и скоростью воздухообмена позволяет частично снизить влияние дрейфа температуры на работоспособность схвата. Учет всех вышеперечисленных факторов требует синтеза информационной системы, учитывающей специфику работы устройства.

Поэтому в лабораторном стенде количество датчиков, а, следовательно, и точек измерения значительно увеличено, что позволило получить информативные обучающие выборки, на базе которых строилась методика синтеза интеллектуальных алгоритмов управления.

Структура информационной системы полуна-

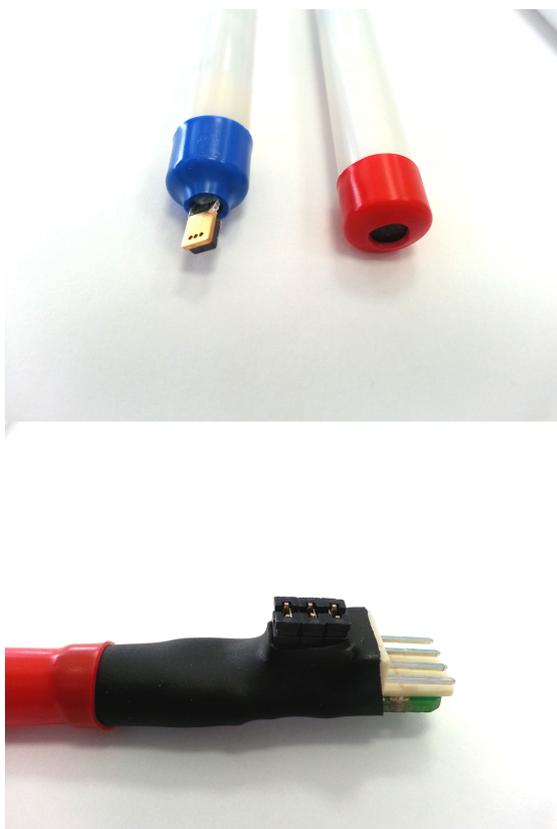


Рис. 4. Внешний вид зондов на базе датчиков температуры и влажности

турного стенда представленная на рис. 3, построена в классе многоуровневых распределенных систем управления. Для реализации многоканальной (многоточечной) системы измерения используются датчики температуры (ДТ) *DS1631S*, работающие по протоколу *I2C*, и датчики температуры и влажности (ДВ) *SHT75* с собственным нестандартным двухпроводным интерфейсом.

На основе синтезированной архитектуры информационной системы лабораторного стенда было разработано специализированное программное обеспечение для персонального компьютера и современного 32-разрядного контроллера *STM32F407* (вычислительное ядро *Cortex M4*).

Конструктивно используемые датчики выполнены в виде зондов, что позволило уменьшить воздействие внешней среды на чувствительные элементы информационной системы, упростило их монтаж и подключение (рис. 4).

Следующей задачей при разработке стенда являлась разработка алгоритмов фильтрации полученных с датчиков значений температуры и влажности, для которых необходимо не только прово-

дить коррекцию полученных значений в соответствии с методикой описанной в документации, но и компенсировать случайные возмущения. Для цифровых датчиков, установленных в системах с высокой динамикой процессов, характерны сильная зашумленность и наличие случайных выбросов. Эти явления возникают вследствие влияния шума самих измерительных элементов, сбоя в процессах измерения и передачи данных в информационных системах (нередко такие системы измерений работают на максимальных скоростях опроса датчиков с минимальными временами выдачи сигнала) и внешних возмущений, что вызвано наличием и значительной длиной соединительных кабелей, а также присутствием мощной импульсной помехи, возникающей во время включения-выключения сильноточных элементов стенда.

Будем считать, что случайные сигналы, накладывающиеся в процессе измерения на полезный сигнал, независимы и равномерно распределены. С учетом того, что полной и корректной математической модели стенда нет, реализовать фильтрацию сигнала с использованием классического подхода к построению фильтра Калмана не представляется возможным. Но, как показывает практика построения таких фильтров, коэффициент Калмана K_k с увеличением номера шага k всегда стабилизируется к некоему значению K_{st} . Предлагается заменить расчет этого коэффициента на подбор его значения с использованием нейронной сети, где в качестве входных сигналов выступают найденные значения дисперсии системы σ_s и датчика σ_t , и в дальнейшем работать с этим значением как с константой.

Подобранное значение коэффициента Калмана K_{st} будет использовано в итерационной формуле при расчетах отфильтрованных значений датчиков:

$$x_{k+1} = K_{st}z_{k+1} + (1 - K_{st}x_k),$$

где z_{k+1} — значение, полученное с датчика; x_k — отфильтрованное значение датчика, полученное на предыдущем опросе.

Как показали проведенные расчеты, для рассматриваемой информационной системы такой подход вполне правомерен и отфильтрованные данные, полученные по упрощенной схеме, практически совпадают с данными, полученными с использованием «классических» методик построения фильтра. На начальных стадиях опроса датчиков наблюдаемое расхождение данных может быть объяснено тем, что в рассчитываемом фильтре Калмана еще идет процесс стабилизации коэффициента, а в предлагаемом упрощенном варианте сразу же используется его стабильное значение. При дальнейшем использовании упрощенной формулы разность между

полученными данными и «классическим» выходом фильтра составляет не более $0,3 \div 0,7\%$.

Так как в процессе функционирования капиллярного микрозахвата меняются не только характеристики рабочей среды, но и режимы работы устройства, возникла необходимость коррекции значения коэффициента Калмана, что предлагается делать с использованием интеллектуальных алгоритмов на основе информации о предыдущих значениях измеряемых параметров, режиме работы захвата, вентиляторов охлаждения и системы осушения воздуха.

Скорости опроса датчиков, достигнутые в настоящее время, удовлетворяют поставленным требованиям. Дальнейшие исследования капиллярного схвата своей целью ставят увеличение его производительности, поэтому вероятней всего следующая работа над информационной системой будет заключаться в синтезе автоматов опроса, алгоритмов коррекции результатов с реализацией на базе ПЛИС.

4. Заключение

Проведенные эксперименты показали, что рассматриваемый вариант реализации системы опроса датчиков и обработки данных может частично компенсировать «информационный голод» систе-

мы управления капиллярным микрозахватом. Микрозахват и рабочая среда рассматриваются как единое целое, поэтому синтезированная многоканальная система предоставляет необходимый объем косвенной информации о протекающих при микроманипуляциях процессах, что, в свою очередь, позволяет более эффективно использовать возможности интеллектуальных надстроек [4].

Список литературы

- [1] Fatikow S.(ed) Automated Nanohandling by Microrobots, London: Springer. 2008
- [2] Zhang Y., Chen B., Liu X., Sun Y. Autonomous Robotic Pick-and-Place of Microobjects IEEE Trans. Robot. 2010. 26: 200–207 pp.
- [3] Капиллярный микрозахват с обратной связью // Авт. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Патент № 2261795 RU МПК7 В 25 J 7/00, 15/00. Оpubл. 10.10.2005. Бюл. № 28.
- [4] Даринцев О.В. Интеллектуальный модельный базис системы управления капиллярным микрозахватом // Искусственный интеллект. 2011. № 1. П-III МОН і НАН України «Наука і Освіта». С. 47–53.