

УДК 004.89

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА И МЕТОДОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ВСТРАИВАЕМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А. Е. Васильев,

канд. техн. наук, доцент

А. В. Криушов,

старший преподаватель

М. М. Шилов,

старший преподаватель

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Рассматриваются особенности построения, обобщенная структура встраиваемых интеллектуальных систем управления и проблемы подготовки квалифицированных специалистов в этой области. Описаны организация и используемые программно-аппаратные средства лаборатории встраиваемых интеллектуальных систем управления.

Ключевые слова — встраиваемая интеллектуальная система управления, нечеткий регулятор, система технического зрения, многозвенное манипуляционное устройство, супервизорное управление.

Особенности современного этапа развития методов и средств автоматического управления обуславливаются усилением степени влияния тенденций, действующих в этой области техники на протяжении последних 20–25 лет; отметим из них две группы наиболее значимых.

К *первой группе* относятся тенденции алгоритмической, системотехнической и конструктивной интеграции устройства управления и объекта, что позволяет говорить об эволюционировании систем управления в направлении встраиваемых систем. Тенденции такого рода проявляются в широком применении устройств управления, разработанных с исходной ориентацией на определенный класс или группу объектов. Аппаратными платформами таких встраиваемых систем управления, как правило, служат специализированные вычислительные системы: микроконтроллеры, микросхемы с программируемой структурой или их гибриды, — что обеспечивает достижение рекордных массогабаритных показателей устройства управления и возможность гибкого изменения алгоритма управления (как проектировщиками в процессе модернизации, так и средствами автоматической адаптивной моди-

фикации в процессе функционирования). Область применения таких встраиваемых систем довольно широка — промышленная автоматика, средства связи, медицинская аппаратура, бытовая техника и др. Следует отметить, что использование специализированных вычислительных систем устанавливает дополнительные ограничения на допустимую (т. е., косвенно, и на необходимую) производительность вычислений, а также предъявляет ряд специфических требований к процессу проектирования, в частности, связанных с расчетом и анализом характеристик реального времени, организацией взаимодействия с аппаратными модулями и др.

К *второй группе* относятся тенденции вовлечения в сферу практического использования так называемых «сложных» объектов. К этому широкому классу принадлежат объекты с высоким порядком уравнений в математическом описании; не полностью наблюдаемые и не полностью управляемые объекты; системы, функционирующие в условиях не полностью определенной внешней среды или по слабо алгоритмизируемым законам; системы с не полностью определенными целями управления и критериями оценки каче-

ства их функционирования. К этой же группе относятся тенденции роста требований к качеству управления объектами, ужесточение существующих и предъявление новых ограничений к режимам эксплуатации систем автоматического управления [1].

Решение задач управления в данной постановке средствами традиционного математического аппарата теории управления затруднено или практически невозможно — особенно с учетом противоречивости тенденций первой и второй групп: наличием ограничений, связанных с используемой элементной базой и вытекающих из необходимости встраиваемости, с одной стороны, и предъявлением требований расширения функциональных возможностей — с другой. В качестве методов решения таких задач все шире применяются методы теории интеллектуальных систем. Примерами базовых вычислительных технологий, часто применяемых в задачах интеллектуального управления, являются нечеткие и нейросетевые технологии, генетические алгоритмы и др. [2, 3].

Таким образом, в данном контексте уместно говорить о встраиваемых интеллектуальных системах управления (ВИСУ), сочетающих доступность (в смысле простоты использования, дешевизны и т. п.) и надежность встраиваемых систем с пригодностью для реализации сложных алгоритмов интеллектуального управления. При этом, безусловно, необходима трансформация методов и средств проектирования интеллектуальных систем, учитывающая особенности встраиваемых систем (в частности, меньшую вычислительную мощность, ограничения по ресурсам памяти в сравнении с вычислительными системами общего назначения и др.; постоянное совершенствование обеих ветвей вычислительной техники из поколения в поколение продолжает подтверждать эти соотношения) и обеспечивающая гармоничное сочетание интеллектуальных и встраиваемых технологий.

Функционирование ВИСУ (рис. 1) подчинено задаваемой извне (однократно в процессе синтеза системы или динамически корректируемой в процессе ее функционирования) цели, формируемой метасистемой (субъектом) управления.

Исполнительный уровень ВИСУ оперирует непосредственно с физическими сигналами управления и состояния объекта, реализуя традиционную схему управления с обратными связями.

Принятие решений в смысле адаптивного интеллектуального управления реализуется вышележащими уровнями на основе баз знаний (возможно, пополняемых в процессе функционирования), индексированных информацией (как правило, обобщенной) о текущем состоянии системы.



■ Рис. 1. Обобщенная структура трехуровневой модели ВИСУ

При необходимости существенно улучшить качество функционирования или невозможности достичь поставленной цели верхний (стратегический) уровень может принять решение о смене принципа функционирования (об изменении типа движения).

Возможны и в ряде случаев практически целесообразны распределенные варианты ВИСУ, в которых указанные уровни управления территориально разделены.

Существенный научный интерес представляют задачи анализа ВИСУ (разработка формальной модели, аналитического аппарата и средств автоматизации) и их синтеза (разработка процедуры построения и итеративного уточнения синтезируемой модели, а также разработка соответствующих средств автоматизации).

В методическом смысле значимой является задача подготовки специалистов, способных выполнять разработку ВИСУ для технических объектов в кооперации со специалистами смежных предметных областей (как правило, в процесс разработки вовлекаются специалисты целевой предметной области, конструкторы, специалисты по электронике, автоматике, вычислительным системам и др.).

Таким образом, обучение будущих специалистов в области ВИСУ следует вести, сообразуясь с примерами предметных областей, актуальных в настоящем и имеющих перспективу в будущем, характеризующихся достаточной общностью используемых подходов, позволяющей специалистам адаптироваться к конкретным разноплановым практическим задачам. При этом такие предметные области должны обладать отме-

ченными выше чертами междисциплинарности и сложности.

В достаточной мере указанной постановке удовлетворяет предметная область робототехники [4]; для аргументации данного утверждения следует выделить некоторые значимые особенности этой предметной области.

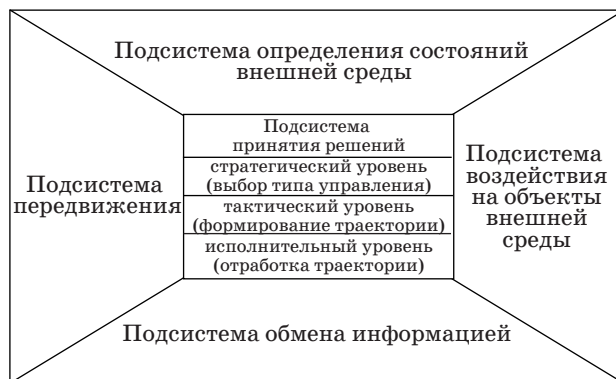
Развитие робототехники характеризуется существенным расширением области практического применения робототехнических систем (РТС). Помимо решения задач автоматизации технологических процессов в промышленности, РТС все шире применяются для решения задач, характеризующихся высокой степенью неопределенностей разного рода (относящихся к целевым объектам, внешней среде и пр.). Дополнительным фактором является потребность в автономном функционировании робототехнической системы (и, следовательно, в автономном принятии ею решений). Очевидна тенденция к ужесточению существующих и появлению принципиально новых требований к функциональным возможностям РТС, что, в свою очередь, приводит к возрастанию сложности их архитектурной организации; кроме того, в подавляющем большинстве случаев задача разработки РТС носит существенно междисциплинарный характер.

В постановке задач автоматизации для целей робототехники предполагается проектирование систем, характеризующихся простотой и высокой надежностью, минимизированными массогабаритными, стоимостными, энергетическими показателями, пригодных для конструктивного объединения с РТС (относящихся, таким образом, к классу встраиваемых систем управления), при этом обладающих способностью к интеллектуальному управлению (т. е. управлению в не полностью определенных условиях, в том числе с применением различных методов адаптации). На этом основании можно заключить, что проблемная область РТС хорошо согласуется с целями и задачами ВИСУ.

Таким образом, весьма актуальным представляется рассмотрение задач автоматизации (и, в частности, проектирования ВИСУ) на примере проблемной области робототехники.

Помимо механических и электромеханических подсистем, реализующих непосредственное взаимодействие РТС с объектами и внешней средой (рис. 2), не меньшую значимость имеют подсистемы определения состояния внешней среды (разнообразные датчики, например, системы технического зрения) и подсистемы принятия решений о качественных и количественных характеристиках управляющих воздействий.

Для подготовки специалистов в области ВИСУ необходимы профильные курсы, обеспеченные



■ Рис. 2. Обобщенная структура робототехнической системы

лабораторной базой, организованные на кафедрах, специализирующихся в области автоматике, управления и вычислительных систем.

В качестве примера рассмотрим организацию лаборатории ВИСУ кафедры автоматике и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Взаимосвязь учебных дисциплин, поддерживаемых лабораторией, со смежными дисциплинами показана на рис. 3.

Цель курса «Программно-аппаратные средства встраиваемых систем» — дать студентам знания методов и средств проектирования, отладки и диагностирования встраиваемых вычислительных систем на базе микроконтроллеров, основных принципов разработки встраиваемых систем управления исполнительными устройствами, основных принципов описания, разработки и применения адаптивных систем с элементами интеллектуального управления; привить практические навыки проектирования ВИСУ.

В лабораторном практикуме курса рассматриваются задачи разработки и исследования нечетких систем принятия решений; проводятся исследования возможностей аппаратных средств встраиваемых систем управления на примере вычислителя нечетких логических функций; систем передвижения и интеллектуального управления локомоциями колесных, гусеничных и шагающих конструкций; манипуляционных систем и интеллектуального управления многосвязными манипуляторами; систем технического зрения (СТЗ), сбора и интеллектуальной обработки данных в СТЗ.

Цель курса «Современные проблемы автоматизации и управления» — дать студентам знания актуальных аспектов развития теории управления и теории систем; отличительных особенностей сложных систем и задач управления техническими объектами; математических моделей,



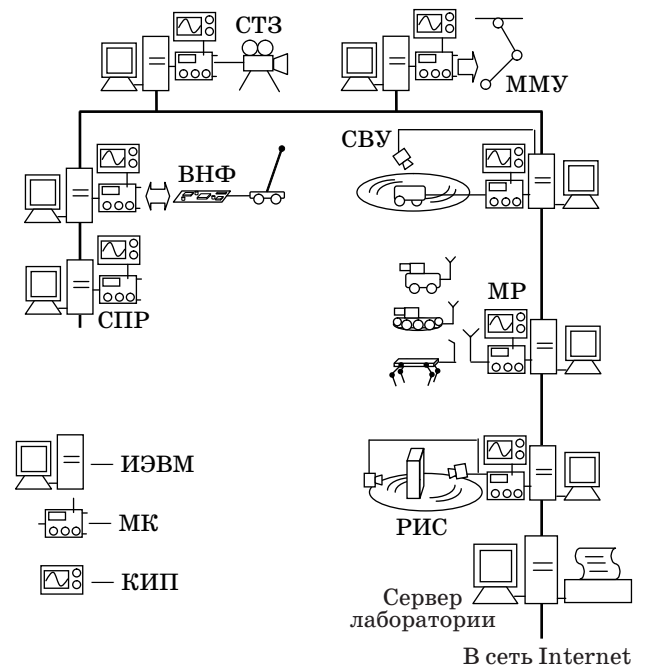
Рис. 3. Взаимосвязь учебных дисциплин

принципов описания, построения и применения элементов интеллектуальных систем; архитектурных решений, применяемых при их практической реализации; методов проектирования таких систем.

В лабораторном практикуме курса решаются задачи разработки и исследования ВИСУ с применением систем виртуальной реальности; моделирования ВИСУ; исследования распределенных ВИСУ; выполняются комплексные исследования ВИСУ на примере колесных, гусеничных и шагающих мини-роботов.

Кроме того, в лаборатории проводится ряд научных исследований, а также готовятся выпускные работы студентов.

Лаборатория (рис. 4) содержит семь автоматизированных рабочих мест (АРМ), представляющих собой многофункциональные аппаратно-программные комплексы для проведения



- СПР — системы принятия решений
- ВНФ — аппаратные вычислители нечетких логических функций
- СТЗ — системы технического зрения
- ММУ — многозвенные манипуляционные устройства
- СВУ — системы управления с супервизорным наблюдением
- МР — система управления мобильным роботом
- РИС — распределенная интеллектуальная система

- ИЭВМ — инструментальная ЭВМ
- МК — стенд микроконтроллера
- КИП — контрольно-измерительные приборы

Рис. 4. Структура лаборатории ВИСУ

учебных исследований каждого компонента РТС и выполнения научных экспериментов по тематике ВИСУ.

В качестве вычислительной аппаратной платформы исполнительного уровня выбраны микроконтроллеры (МК) семейства MCS-51. Как отмечалось, МК являются одним из широко применяемых видов аппаратного обеспечения встраиваемых систем, а семейство MCS-51 является классическим образцом МК и в то же время стандартом de facto подобных систем. Конкретным используемым подсемейством является InfineonC515 как известное студентам из предшествующих дисциплин.

В состав каждого АРМ входят (рис. 5):

— инструментальная ЭВМ (позволяющая выполнять моделирование, проектирование и отладку нечетких систем, проектирование и отладку программного обеспечения (ПО) МК, а также



■ Рис. 5. Обобщенная структура АРМ

обеспечивающая решение задач стратегического управления и сбора данных);

— микроконтроллер МК (реализующий процесс интеллектуального управления реальным объектом);

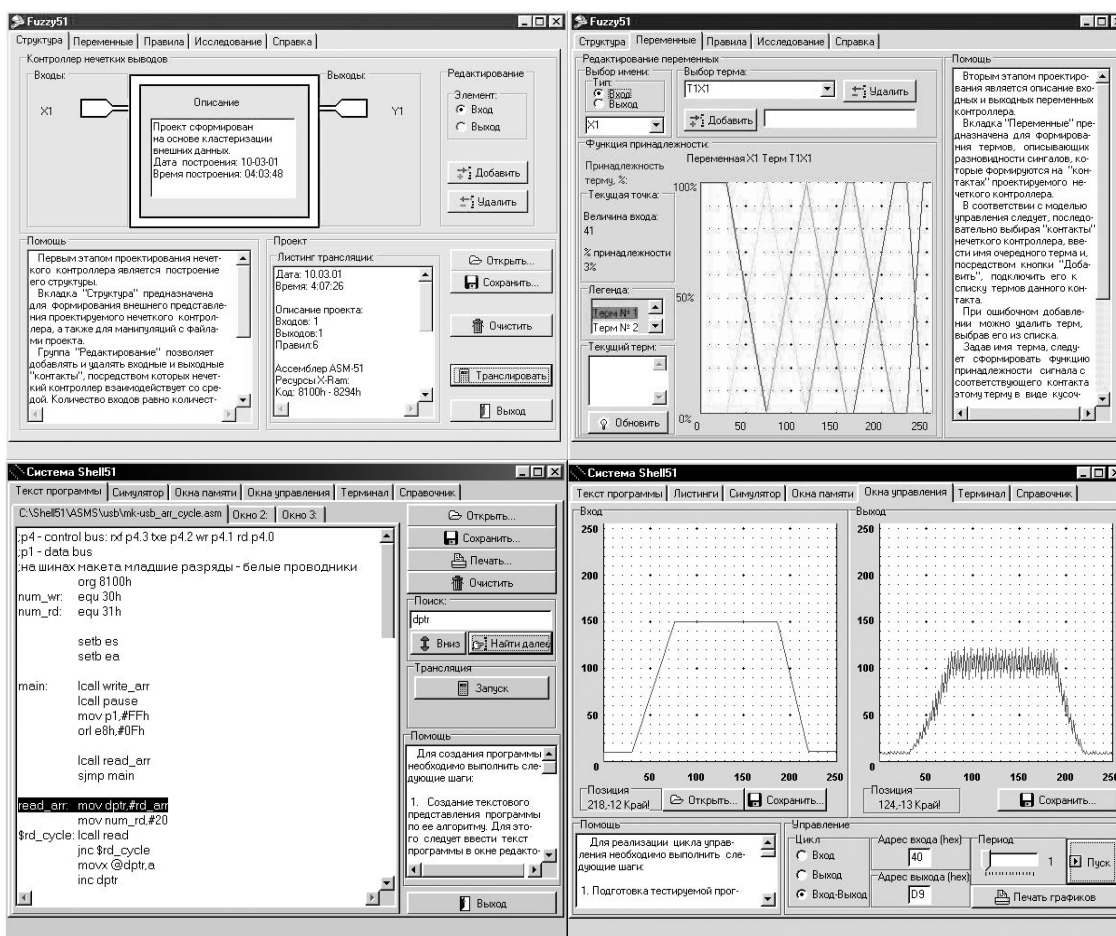
— целевой объект управления (обеспечивающий физическую достоверность эксперимента), снабженный блоком сопряжения с МК;

— контрольно-измерительные приборы (предоставляющие возможность регистрации физических процессов, протекающих на исполнительном уровне управления).

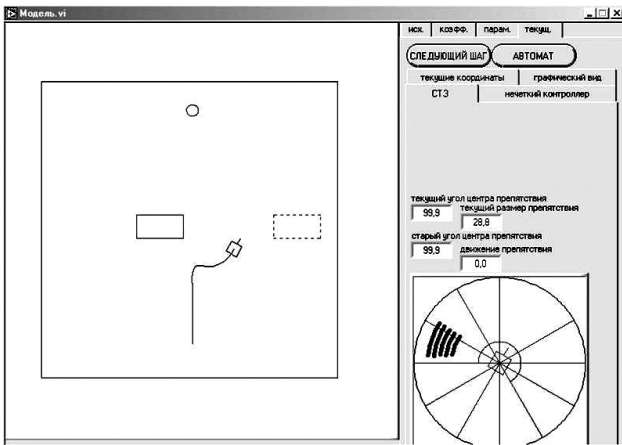
Основные компоненты авторского ПО показаны на рис. 6.

Краткие сведения об АРМ представлены ниже в таблице; рассмотрим более подробно некоторые их особенности.

Используемая в АРМ систем принятия решений модель нечеткого контроллера может быть построена на основе эвристически сформированной или автоматически сгенерированной базы нечетких знаний [5]. В последнем случае для ее формирования необходимо наличие репрезентативной базы данных, содержащей наборы эталонных реакций системы в различных ситуациях. Для накопления такой базы данных применимо моделирование функционирования системы в среде виртуальной реальности. Конкретным рассматриваемым примером является моделирование управления мобильным роботом в априорно неопределенной среде с препятствиями (рис. 7). Сформированная модель нечеткого контроллера



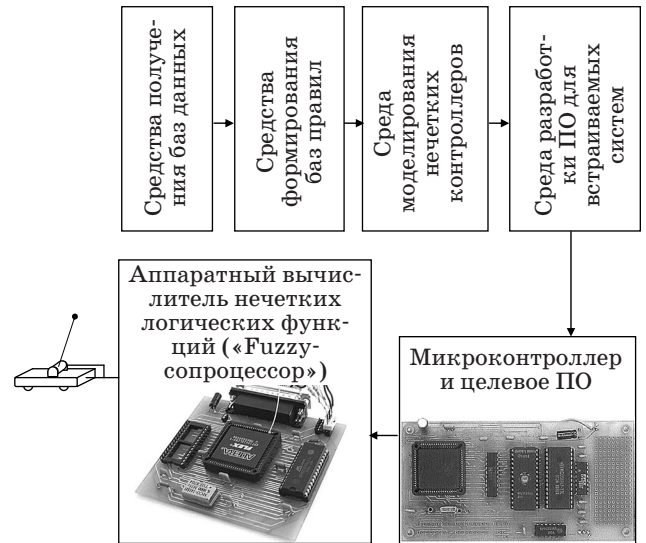
■ Рис. 6. Программное обеспечение проектирования и отладки встраиваемых систем



■ Рис. 7. Пример моделирования нечеткой системы принятия решений

автоматически преобразуется в эквивалентный программный код для встраиваемой системы на базе МК 51-й серии.

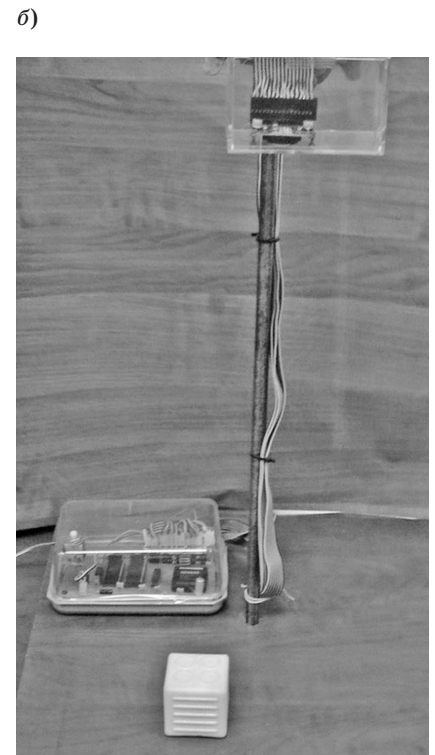
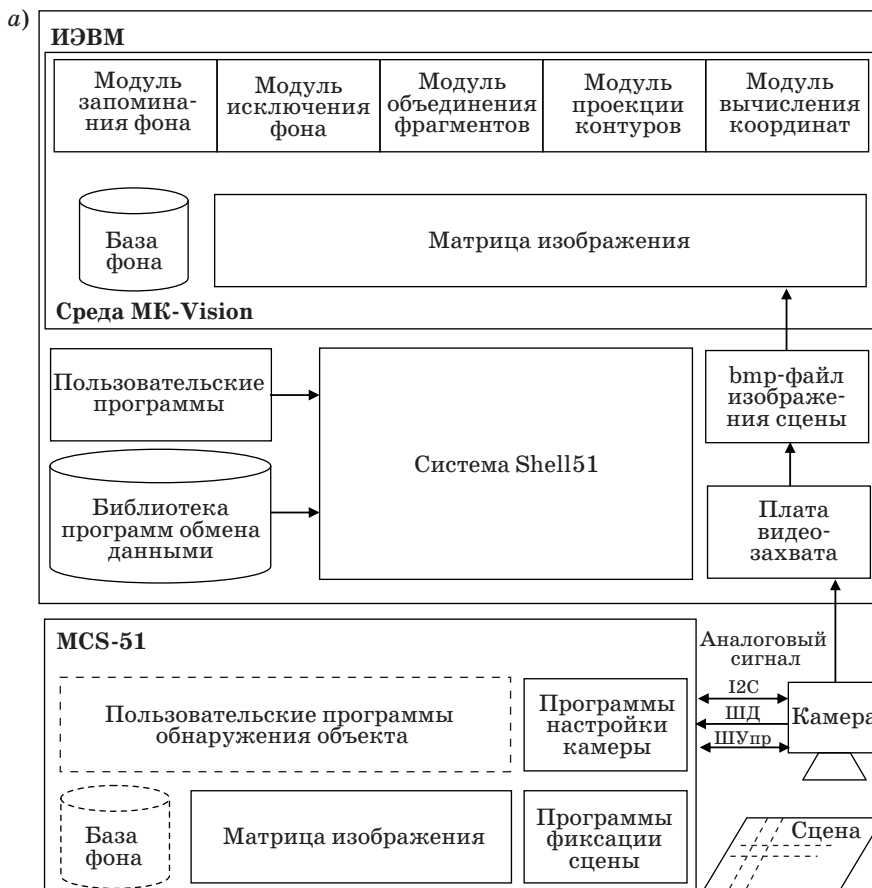
Логически связана с вышеуказанной группой вопросов проблема аппаратной реализации системы принятия решений с помощью нечеткого сопроцессора — аппаратного ВНФ. Данное АРМ позволяет выполнить сравнительный анализ производительности программных и аппа-



■ Рис. 8. Структура АРМ по исследованию аппаратных нечетких вычислителей

ратных реализаций систем принятия решений (рис. 8).

Аппаратный вычислитель авторской разработки реализован на базе микросхем программируемой логики; команды загрузки баз правил



■ Рис. 9. Структура (а) и внешний вид (б) АРМ для исследований систем технического зрения

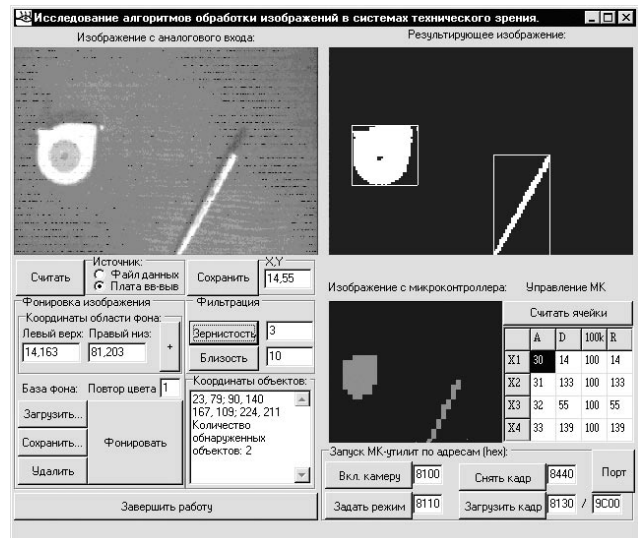
и выполнения функций нечеткого сопроцессора поступают от основного МК через порты ввода-вывода. Особенности функционирования (в том числе показатели производительности) аппаратной и программной реализаций нечеткого вычислителя исследуются на примере задачи поддержания неустойчивого равновесия перевернутого маятника.

В АРМ по исследованию систем технического зрения изображение с выхода видеокamеры передается как на инструментальную ЭВМ, так и на микроконтроллер (рис. 9, а, б). Это позволяет создавать и исследовать различные прототипные алгоритмы обнаружения и распознавания объектов на ЭВМ [6], переносить эти алгоритмы на микроконтроллер и оценивать их производительность. Пример обнаружения объектов на изображении, полученном с камеры, представлен на рис. 10.

Схожей проблематикой обладает АРМ СВУ (рис. 11, а, б). На вращающемся диске размещен объект управления (макет мобильного робота) и препятствия. Координаты местоположения объекта и препятствий на сцене вычисляются на основе анализа изображения, поступающего с видеокamеры в ИЭВМ. Вычисленные координаты используются нечеткой системой управления, реализованной на МК, для формирования управляющих воздействий, предотвращающих столкновение объекта с препятствиями. Угловую скорость диска можно регулировать для оценивания предельной производительности интеллектуальных вычислений.

Автоматизированное рабочее место по исследованию ММУ (рис. 12, а, б) содержит программную подсистему адаптивного (генетического) синтеза алгоритмов движения исполнительных механизмов в трехмерном пространстве. После получения на программной модели объекта управления предварительных результатов возможна автоматическая генерация кода для встраиваемой системы управления и проведение дальнейших испытаний на натурной модели отдельной конечности шагающего робота. Кроме того, возможна реализация координированного управления совокупностью конечностей, обеспечивающего передвижение шагающей платформы.

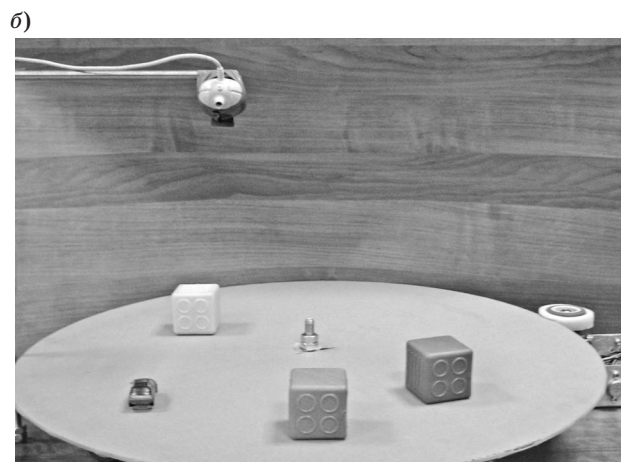
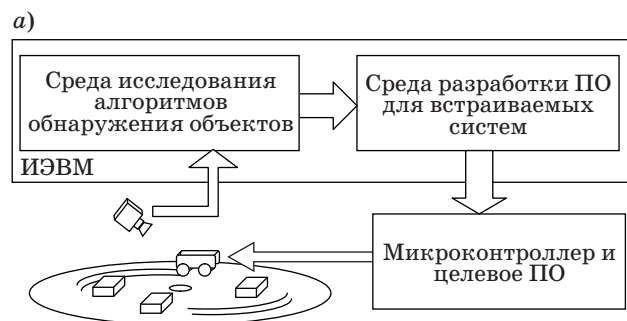
Автоматизированное рабочее место по исследованию РИС (рис. 13, а, б) имеет два ортогонально расположенных инфракрасных датчика дистанции с изменяемым посредством сервоприводов направлением наблюдения объекта (или совокупности объектов), расположенного на поворотном столе. Определение координат, ориентации и контура объекта (объектов) в общем случае возможно лишь при совокупной обработке информации, полученной от каждого из датчиков. Такая



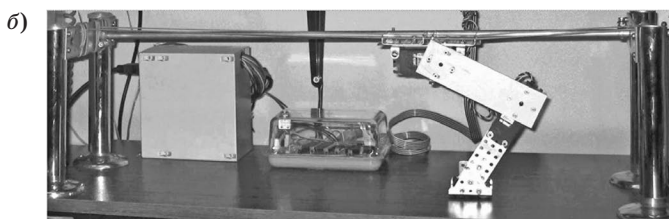
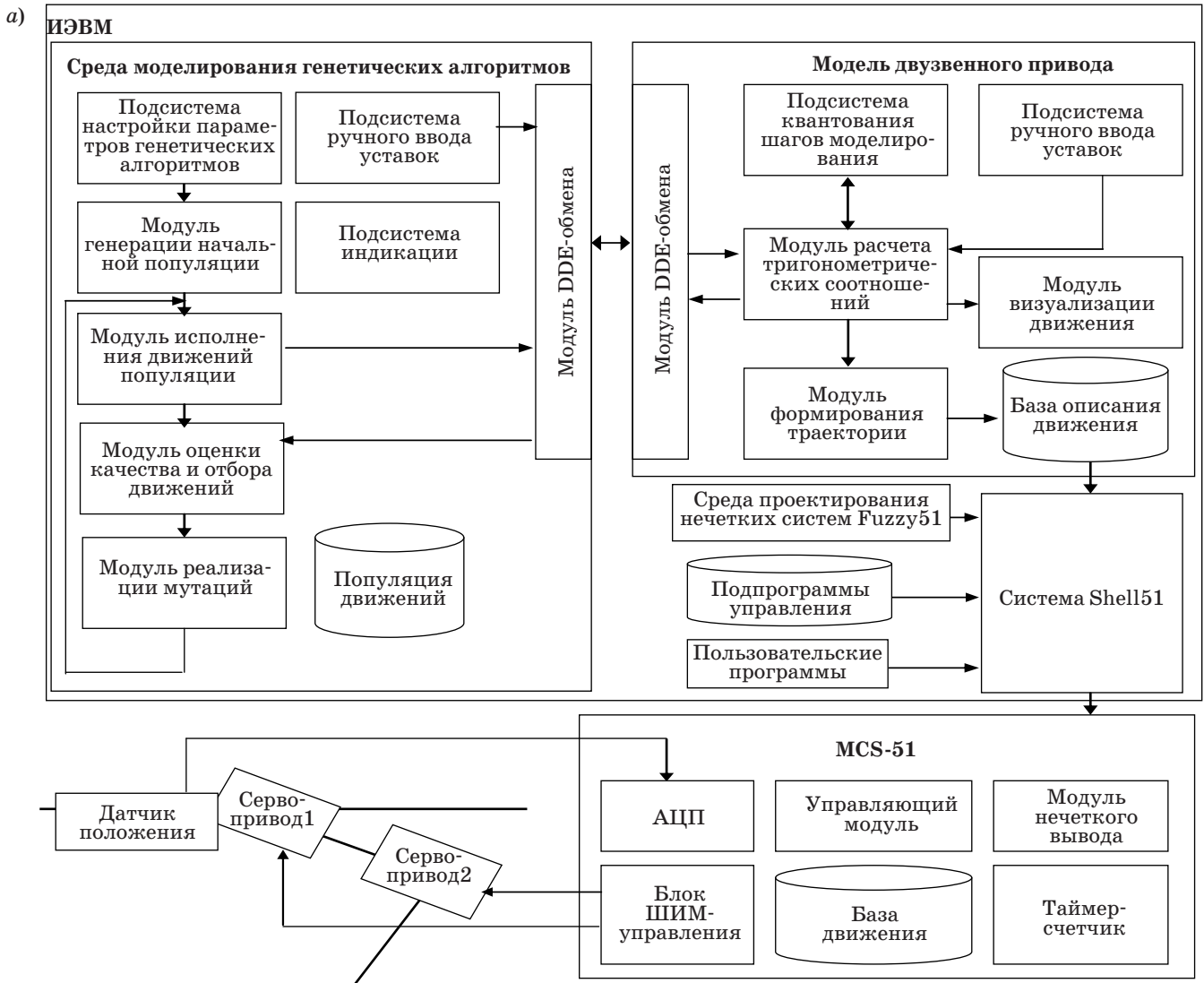
■ Рис. 10. Программное обеспечение для исследования алгоритмов обнаружения объектов на изображении

обработка проводится на аппаратной платформе микроконтроллерной ВИСУ.

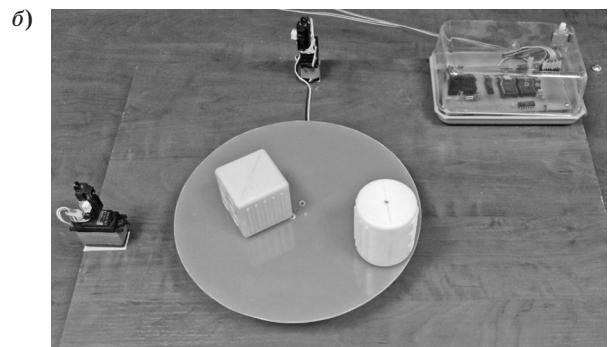
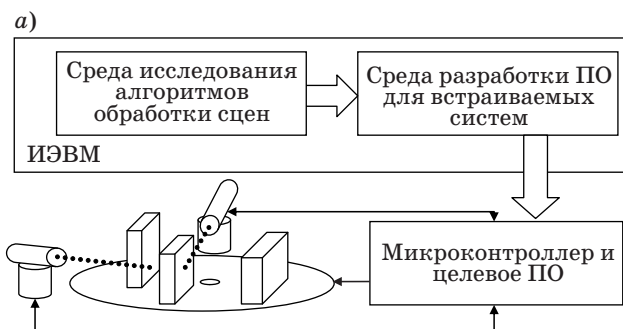
Автоматизированное рабочее место по исследованию ВИСУ МР позволяет реализовать и испытать опробованные в предыдущих работах мо-



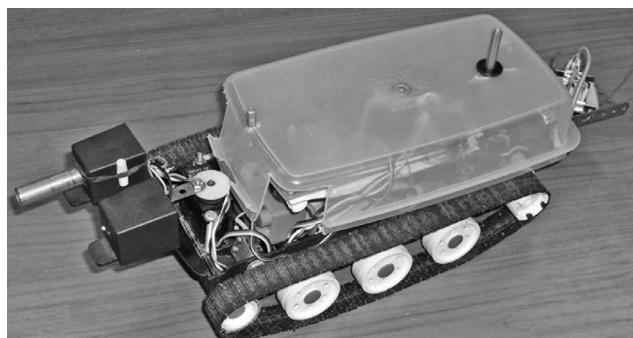
■ Рис. 11. Структура (а) и внешний вид (б) АРМ для исследований систем супервизорного управления



■ Рис. 12. Структура (а) и внешний вид (б) АРМ для исследования многосвязных манипуляционных устройств



■ Рис. 13. Структура (а) и внешний вид (б) АРМ для исследований распределенных систем



■ Рис. 14. Внешний вид АРМ для исследования встраиваемых систем управления мобильными роботами

дели алгоритмов интеллектуального управления на автономной мобильной платформе на базе натурального четырехколесного, шагающего или гу-

сеничного шасси (рис. 14). Данные платформы снабжены специализированными инфракрасными СТЗ и воспринимают по радиointерфейсу команды телеуправления от ИЭВМ. Рассматриваемые системы управления мобильными объектами построены в соответствии с трехуровневой моделью ВИСУ и позволяют практически применять принципы иерархического и модульного подходов к построению сложных робототехнических систем [7, 8].

В таблице представлено краткое описание АРМ, применяемых в настоящее время в учебном процессе лаборатории ВИСУ.

Авторам представляется, что подобная организация научно-исследовательской лаборатории позволяет придать большую проблемную ориентированность процессу подготовки специалистов в области автоматизации и вычислительной техники, повысить потенциальное качество результа-

Наименование АРМ (рисунок)	Цель исследований	Задачи исследований
1. Системы принятия решений (рис. 7)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для разработки нечетких контроллеров движения мобильных роботов с применением компьютерных моделей	Проектирование, отладка и исследования программного эмулятора нечеткого контроллера на основе эвристически сформированных баз нечетких знаний для управления моделью объекта в среде виртуальной реальности
2. Аппаратные вычислители нечетких логических функций (рис. 8)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для создания систем управления динамическими объектами с применением аппаратных нечетких регуляторов	Проектирование, отладка и исследования программной и аппаратной реализации нечеткой системы поддержания неустойчивого равновесия объекта колебательной природы (перевернутого маятника)
3. Системы технического зрения (рис. 9 и 10)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для разработки программно-аппаратных средств фиксации, обнаружения и классификации объектов на визуальной сцене	Проектирование, отладка и исследования алгоритмического и программного обеспечения встраиваемых микроконтроллерных систем технического зрения оптического диапазона
4. Системы супервизорного управления (рис. 11)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для разработки систем управления передвижением на основе комбинации средств нечетких вычислений и супервизорного наблюдения	Проектирование, отладка и исследования тактического и исполнительного уровней ВИСУ адаптивного управления мобильным роботом в динамически изменяющейся обстановке внешней среды
5. Многозвенные манипуляционные устройства (рис. 12)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для создания устройств адаптивного и генетически синтезируемого управления исполнительными механизмами мобильных роботов	Генетический синтез алгоритма движения манипулятора. Проектирование, отладка и исследования нечетких средств адаптации алгоритмов движения манипулятора
6. Распределенные интеллектуальные системы (рис. 13)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для создания системы координированно функционирующих узлов сбора, интеллектуальной обработки данных и принятия решений	Проектирование, отладка и исследования средств решения задачи определения координат и формы объектов по данным от совокупности независимых подсистем технического зрения инфракрасного диапазона
7. Системы управления мобильными роботами (рис. 14)	Приобретение знаний и развитие навыков создания целевой адаптивной системы управления подвижным объектом на примере колесного, гусеничного и шагающего шасси	Проектирование, отладка и исследования комплекса подсистем стратегического, тактического и исполнительного уровня ВИСУ натурального макета мобильного робота для решения задач формирования и отработки траекторий движения в априорно не полностью определенной обстановке внешней среды

тов их деятельности и обеспечить таким специалистам дополнительную значимость на рынке труда.

Более детально с результатами работы можно ознакомиться на кафедре автоматки и вычисли-

тельной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Кроме того, авторы ответят на вопросы по электронной почте visulab@mail.ru (Васильев Алексей Евгеньевич).

Литература

1. **Proceedings Embedded World 2004 Conference** / Published by Caspar Grote, Renate Ester. — Poing, Germany: Design&Electronic, 2004. — 825 p.
2. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: Современный подход: Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2006. — 1408 с.
3. **Джонс М. Т.** Программирование искусственного интеллекта в приложениях: Пер. с англ. — М.: ДМК Пресс, 2006. — 312 с.
4. **Юревич Е. И.** Основы робототехники. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 416 с.
5. **Обработка нечеткой информации** в системах принятия решений / А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, Г. В. Меркурьева и др. — М.: Радио и связь, 1989. — 304 с.
6. **Форсайт Д., Понс Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2004. — 928 с.
7. **Батенко А. П.** Управление конечным состоянием движущихся объектов. — М.: Сов. радио, 1997. — 256 с.
8. **Васильев А. Е.** Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 304 с.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.