

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения  
Кафедра «Мехатроника»

Б. М. Готлиб,  
А. А. Вакалюк

ВВЕДЕНИЕ  
В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ  
«МЕХАТРОНИКА  
И РОБОТОТЕХНИКА»

Курс лекций для студентов специальности  
221000 – «Мехатроника и робототехника»

Екатеринбург  
Издательство УрГУПС  
2012

УДК 621.865.8

**Готлиб, Б. М.**

Введение в специальность «Мехатроника и робототехника» : курс лекций / Б. М. Готлиб, А. А. Вакалюк. – Екатеринбург : УрГУПС, 2012. – 134 [2] с.

ISBN 978-5-94614-222-9

Курс лекций охватывает содержание дисциплины В.3.2 «Введение в специальность», которая читается студентам первого курса очного обучения специальности 221000 – «Мехатроника и робототехника» (квалификация бакалавр). Рассматриваются общие понятия, базовые определения, основные направления и технологическое обеспечение мехатронных и робототехнических систем. В лекциях также приводится описание современных мехатронных и робототехнических модулей и систем.

В курсе лекций отражены перспективные направления в развитии мехатроники и робототехники.

Курс лекций может быть полезен студентам специальности 220401.65 – «Мехатроника».

УДК 621.865.8

*Печатается по решению  
редакционно-издательского совета университета*

**Авторы:** Б. М. Готлиб, заведующий кафедрой «Мехатроника», доктор технических наук, профессор, УрГУПС

А. А. Вакалюк, аспирант кафедры «Мехатроника», УрГУПС

**Рецензенты:** С. В. Смирнов, заместитель директора по научной работе Института машиноведения УрО РАН, доктор технических наук, профессор;

В. И. Гребенников, ведущий научный сотрудник института физики металлов УрО РАН, доктор физико-математических наук, профессор

ISBN 978-5-94614-222-9

© УрГУПС, 2012

# Оглавление

---

---

Предисловие .....	4
Введение .....	6
<b>Лекция 1</b>	
<b>Общие понятия о мехатронике и робототехнике .....</b>	<b>9</b>
1.1. Назначение и область применения мехатроники .....	10
1.2. Назначение и область применения робототехники .....	13
<b>Лекция 2</b>	
<b>Базовые определения и основные направления развития мехатроники и робототехники .....</b>	<b>16</b>
2.1. Основные понятия и определения .....	16
2.2. Основные направления развития мехатронных и робототехнических систем .....	25
2.2.1. Интеграция .....	26
2.2.2. Интеллектуализация .....	27
2.2.3. Миниатюризация .....	30
<b>Лекция 3</b>	
<b>Технологическое обеспечение мехатронных и робототехнических систем .....</b>	<b>35</b>
3.1. Структурный и технологический базисы мехатроники .....	35
3.1.1. Гибридные технологии электромеханики и механики .....	37
3.1.2. Цифровые технологии управления движением .....	39
3.1.3. Технологии автоматизированного проектирования .....	48
<b>Лекция 4</b>	
<b>Современные мехатронные и робототехнические модули и системы .....</b>	<b>55</b>
4.1. Современные требования к мехатронным и робототехническим модулям и системам .....	55
4.1.1. Новые служебные и функциональные задачи мехатронных и робототехнических систем .....	57
4.1.2. Интегрированные приводы .....	70
4.1.3. Микроэлектромеханические машины и системы .....	74
4.1.4. Кинематические структуры многокоординатных машин .....	84
4.1.5. Многофункциональные металлообрабатывающие центры .....	91
4.1.6. Интеллектуальные мехатронные и робототехнические системы .....	94
4.1.7. Дистанционное управление мобильными мехатронными системами .....	107
4.2. Примеры реализации больших современных мехатронных систем .....	117
4.2.1. Управление движением автомобильного транспорта .....	117
4.2.2. Инновационные системы железнодорожной автоматики .....	122
4.2.3. Электроэнергетика .....	125
Литература .....	133

## Предисловие

---

---

**В** 2011–2012 учебном году кафедра «Мехатроника» УрГУПС перешла на двухуровневую систему образования «бакалавр – магистр» по направлению подготовки 221000 – «Мехатроника и робототехника». Нормативный срок обучения на первом уровне образования «бакалавр» составляет 4 года, на втором уровне образования «магистр» – 2 года.

Данный курс лекций по дисциплине «Введение в специальность» предназначен в первую очередь бакалаврам по направлению подготовки 221000 – «Мехатроника и робототехника», но может быть полезен также студентам специальности 220401 – «Мехатроника» при изучении дисциплин «Основы мехатроники» и «Применение мехатронных систем».

Область профессиональной деятельности бакалавров по направлению подготовки 221000 – «Мехатроника и робототехника» включает в себя мехатронику и робототехнику. При этом мехатроника традиционно воспринимается как часть общего с робототехникой научно-технического направления, которое официально зафиксировано в перечнях как научных, так и учебных направлениях. Однако все-таки точнее считать мехатронику и робототехнику относительно самостоятельными областями науки и техники, использующими общие принципы и методы проектирования мехатронных модулей и систем применительно к мехатронике и робототехнике.

Цель настоящего курса лекций – изложение современных принципов построения и применения мехатронных и робототехнических систем – магистрального направления развития науки и техники в различных областях машиностроения и других сферах деятельности.

Объектами профессиональной деятельности бакалавра по направлению подготовки 221000 – «Мехатроника и робототехника» являются:

- автоматические и автоматизированные системы;
- средства управления и контроля;

- математическое, алгоритмическое, программное и информационное обеспечение;
- способы и методы проектирования, производства, отладки и эксплуатации мехатронных и робототехнических модулей и систем различного назначения;
- научные исследования и производственные испытания в промышленности (в том числе оборонной) энергетике, транспорте, медицине и сельском хозяйстве.

На кафедре «Мехатроника» УрГУПС приняты следующие профили подготовки бакалавров:

1. Проектирование и конструирование мехатронных и робототехнических модулей и систем.
2. Мехатронные системы в автоматизированном производстве.

Изложенное показывает, что в целом мехатроника и робототехника, несмотря на некоторые отличия, действительно образуют единое комплексное научно-техническое направление, развивающееся на основе общих тенденций развития современной техники.

Данный курс лекций является базовым в системе образования специалиста в области мехатроники и робототехники. К курсу лекций прилагается набор видеоматериалов на электронных носителях.

Авторы выражают благодарность рецензентам и всем коллегам за советы и рекомендации при обсуждении материала лекций.

**В** настоящее время мехатроника наряду с информатикой, биоинженерией и нанотехнологиями оказывает существенное влияние на развитие производственной и бытовой техносфер в направлении все более широкого внедрения систем мехатронной автоматизации и роботизации в различные физико-технические процессы во всех сферах деятельности общества.

Целью мехатроники является создание интеллектуальных физико-технических изделий, систем и процессов, обладающих качественно новыми функциями, свойствами и возможностями. Частным случаем таких физико-технических изделий являются роботы и робототехнические системы различного назначения и размерностей.

Современная мехатроника и робототехника охватывает все размерные масштабы технических систем от «макро» до «микро» (размеры от 1 мк до 1 мм) с последующим переходом от микросистем к наносистемам (порядка ста нанометров –  $10^{-7}$  м): переход «макро-микронано-мехатроника и -робототехника».

Все вышесказанное о мехатронике и робототехнике нашло отражение в определениях, данных в Федеральном государственном стандарте высшего профессионального образования по направлению подготовки 221000 – «Мехатроника и робототехника» (Утверждено приказом Министерства образования и науки РФ от 9 ноября 2009 г., № 545) – квалификация «бакалавр».

**Мехатроника** – область науки и техники, основанная на системном объединении узлов точной механики, датчиков состояния внешней среды и самого объекта, источников энергии, исполнительных механизмов, усилителей, вычислительных устройств (ЭВМ и микропроцессоры). Мехатронная система – единый комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта.

**Робототехника** – область науки и техники, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, построенных на базе мехатронных модулей (информационно-сенсорных, исполнительных и управляющих). Роботы и робототехнические системы предназначены для выполнения рабочих операций от микро- до макро размеров, в том числе с заменой человека на тяжелых, утомительных и опасных работах.

В дальнейшем будут рассмотрены и другие определения мехатроники и робототехники [1]. В этих определениях особо подчеркивается интеграционная сущность мехатронных систем, в основу построения которых заложена идея глубокой взаимосвязи механических, электротехнических, электронных, компьютерных и информационно-измерительных компонентов, объединенных общей интеллектуальной системой управления. Все вышесказанное относится и к современной робототехнике. Поэтому наиболее распространенным графическим символом мехатроники стали три пересекающихся круга, помещенные во внешнюю оболочку «производство» – «менеджмент» – «требования рынка» (рис. 1).



Рис. 1. Определение мехатронных систем

В лекции 1 даны общие понятия о мехатронике и робототехнике, показаны назначение и области применения мехатронных и робототехнических систем.

В лекции 2 представлены основные направления развития мехатроники и робототехники: интеграция, интеллектуализация и миниатюризация сложных технических систем.

В лекции 3 описаны основные технологические процессы, применяемые при разработке мехатронных и робототехнических систем.

В лекции 4 сформулированы базовые требования к мехатронным и робототехническим модулям и системам, продемонстрированы способы удовлетворения этим требованиям и проиллюстрированы примеры реализации современных больших мехатронных систем.

# Лекция 1

## Общие понятия о мехатронике и робототехнике

---

Термин «мехатроника» (*Mechatronics*) введен в 1969 г. японским инженером Тецуро Мори (фирма *Yaskawa Electric*) применительно к механическим системам с электронным управлением. Возникнув в результате второй электронной революции, мехатроника явилась ответом на запросы практики: появление и резкий подъем производства микропроцессоров и больших интегральных схем существенно расширило возможности электронных устройств управления и позволило при малых габаритах и высокой надежности придать им такие новые свойства, как функциональная гибкость и перестраиваемость в соответствии с требованиями к управляемому механическому процессу.

За время своего непродолжительного существования мехатроника проникла во все сферы человеческой деятельности, оформилась в приоритетное направление развития науки и техники, вошла в перечень «критических технологий», определяющих уровень производства, конкурентоспособность продукции, качество жизни, обороноспособность и безопасность государства. При этом наибольшее применение мехатронные системы находят в таких отраслях машино- и приборостроения, как станко- и автомобилестроение, робототехника и вычислительная техника, а также железнодорожная, авиакосмическая, медицинская, офисная, военная и бытовая техника [2].

В последние годы была предложена физическая трактовка мехатроники как «средство принятия решения по управлению функционированием физических систем» или как «компьютерное управление передачей физической энергии в управляемых технических системах» (здесь энергия выступает в качестве количественной меры движения и взаимодействия всех видов материи — механической, тепловой, электромагнитной, ядерной, плазменной, гравитационной

и др.) [2]. Эти определения предполагают тесную связь мехатроники с информатикой и компьютерной техникой для обработки информации и управления: информатика составляет ее теоретическую, а компьютерная техника – техническую составляющую.

Следуя [1], дадим ответы на три ключевых вопроса, определяющих цель, предмет и методы мехатроники:

Что является предметом мехатроники и робототехники?

Почему эти направления столь быстро развиваются?

Как происходит создание мехатронных и робототехнических систем?

## 1.1. Назначение и область применения мехатроники

---

---

Ответы на три поставленных выше вопроса сформулируем исходя из расширенной физической трактовки мехатронных систем.

**Цель мехатроники** состоит в создании интеллектуальных машин и физико-технических систем и процессов различного назначения, обладающих качественно новыми функциями и свойствами.

**Предметом мехатроники** являются методы и процессы проектирования и производства качественно новых модулей и машин, а на их основе – интеллектуальных исследовательских и промышленных самоорганизующихся и самоуправляемых технических систем.

**Метод мехатроники** основан на системном сочетании (синергетическом объединении) таких ранее обособленных естественнонаучных и инженерных направлений, как точная механика, микроэлектроника, электротехника, компьютерное управление и информатика на всех этапах жизненного цикла изделий, начиная с маркетинга и проектирования и продолжая на этапах реализации (производства), эксплуатации и утилизации. Основой метода мехатроники является синергетическая интеграция (объединение) структурных элементов, технологий, энергетических и информационных потоков для достижения единой цели.

Синергетическая интеграция элементов при проектировании мехатронных изделий основана на трех базовых принципах:

- реализация создаваемых изделий минимально возможным числом структурных и конструктивных блоков за счет объединения двух и более элементов в единые многофункциональные модули (блоки);

- выбор интерфейсов (связей между блоками) в качестве локальных точек интеграции и исключение избыточных структурных блоков и интерфейсов как сепаративных элементов;
- перераспределение функций в мехатронной системе от аппаратных блоков к интеллектуальным (компьютерным, информационным, программным) компонентам.

Степень интеграции мехатронной системы является одним из основных классификационных признаков в мехатронике. Среди других классификационных признаков развития мехатронных систем выделяются интеллектуализация и миниатюризация. Более подробно все три указанных признака мехатроники будут рассмотрены в лекции 2.

**Мехатронные технологии** базируются на комплексном применении маркетинговых, проектно-конструкторских, производственных, технологических, компьютерных и информационных методов и технологий, которые обеспечивают полный жизненный цикл мехатронных изделий.

Метод мехатроники и мехатронные технологии носят универсальный характер и применимы как к прикладным инженерным разработкам, так и к разработке теоретической базы построения сложных физико-технических систем (техническое зрение, управление «с голоса», распознавание сцен, виртуальная инженерия и быстрое прототипирование, автоматические самоорганизующиеся и самоуправляемые системы и др.).

Стремительное развитие мехатроники в мире – закономерный процесс, который вызван принципиально новыми требованиями рынка к показателям качества технологических машин и сложным физико-техническим системам и процессам.

В машиностроении *целью и предметом мехатроники* является создание и производство качественно новых модулей движения и машин на их основе, для реализации заданных *функциональных движений* машин и механизмов.

**Функциональное движение** мехатронной системы предусматривает ее целенаправленное механическое движение (перемещение), которое координируется с параллельно управляемыми технологическими и информационными процессами. Таким образом, понятие «движение» трактуется в данном определении функционального движения расширительно [1].

Большие возможности открылись перед мехатроникой в результате ее сближения с микросистемными технологиями (микроэлектромеханические технологии, микроробототехника и др.).

Сформировалось самостоятельное направление в мехатронике – микромехатроника.

В последние годы намечилось проникновение мехатронных технологий в нанотехнологии. В основном это выражается в создании прецизионных устройств и приборов для исследования и создания наноструктур с уникальными свойствами (сканирующий туннельный микроскоп, атомно-силовой микроскоп, оптический лазерный силовой микроскоп, наноинженерия поверхности деталей и др.).

Сегодня мехатроника находит широкое применение в следующих областях:

- машиностроение (автоматизированное машиностроение, станкостроение, электронное и энергетическое машиностроение и др.);
- транспортное машиностроение (авиакосмическая техника, автотракторное машиностроение, железнодорожный транспорт, нетрадиционные транспортные средства и др.);
- робототехника различного назначения;
- приборостроение (контрольно-измерительные устройства и машины, офисная техника, навигационные приборы, вычислительная техника);
- микроэлектромеханические системы (микромашин, микро-роботы и др.);
- нанотехнологии (микроскопы, зонды, машины микромеханической обработки поверхностей деталей и др.);
- бытовая техника (автономные пылесосы, швейные, стиральные, посудомоечные машины, холодильные установки);
- медицинское и спортивное оборудование (биоэлектрические и экзоскелетные протезы для инвалидов, тренажеры, массажеры и вибраторы и др.);
- фото- и видеотехника (устройства фокусировки видеокамер, проигрыватели видеодисков и др.);
- полиграфические машины;
- интеллектуальные аттракционы для шоу-индустрии.

Этот список может быть расширен. Рынок мехатронной техники динамически развивается и имеет устойчивую тенденцию к росту.

Ради объективности необходимо все же признать, что в мехатронике еще не до конца сформулированы классификационные признаки по причине молодости этого научного направления. До сих пор мехатроника является в значительной степени делом практиков. Раз-

работка теоретических основ мехатроники находится в начальной стадии. Ей еще далеко, например, до такой аксиоматической науки, как теоретическая механика, хотя мехатроника и относится к группе междисциплинарных естественнотехнических направлений обучения, а не к инженерной группе.

## 1.2. Назначение и область применения робототехники

---

---

Термин «робототехника» (*Robotics*) придумал писатель К. Чапек в 1920 г., а затем использовал Айзек Азимов, но само понятие робототехники имеет более долгую историю. В древнегреческой мифологии упоминается механический человек по имени Талос, которого спроектировал и изготовил бог огня и кузнечного дела Гефест. В XVIII в. разрабатывались блистательные механические автоматы, сложное поведение которых, однако было полностью задано заранее конструктивом автомата. Робототехника, пройдя путь от манипуляторов (1940–1950 гг.), на рубеже XXI в. подошла к следующему этапу своего развития — созданию интеллектуальных макро- и микророботов. Однако одним из основных направлений развития робототехники все же является комплексная автоматизация производства, создание гибких автоматизированных производств, прежде всего, в машиностроении.

До 80-х гг. XX в. развитие робототехники происходило независимо от мехатроники. В дальнейшем мехатроника развивалась в основном на базе робототехники и в настоящее время мехатроника и робототехника объединены в одно направление инженерного образования. Мехатроника и робототехника различаются по классификационным признакам: мехатроника изучает новый методологический подход к созданию модулей и машин с качественно новыми характеристиками, роботы же представляют собой один из современных классов машин с компьютерным управлением.

Мехатронный подход охватывает все основные фазы жизненного цикла роботов (проектирование, производство, эксплуатация, утилизация) и принципы построения робототехнических систем. Один из таких принципов — модульное построение робототехники. Мехатроника стала базой для создания нового поколения модулей — конструктивно унифицированных функциональных компонентов робототехнических систем.

Для робототехники наиболее актуально создание следующих типов мехатронных модулей (в лекции 2 будет дано строгое определение термина «мехатронный модуль»):

- модули технического зрения, обеспечивающие распознавание в реальном времени сложных объектов и сцен;
- силометрические модули для манипуляторов (системы силового очувствления);
- приводные модули типа «искусственные мышцы», не уступающие по массогабаритным параметрам мышцам живых организмов (электроактивные полимеры, материалы с эффектом памяти и т. п.);
- микросистемные модули энергопитания, имеющие массогабаритные параметры несравненно лучше современных бортовых аккумуляторов, топливных и других источников электроэнергии, применяемых в робототехнике.

Создание такой самодостаточной системы модулей – основа для формирования нового поколения средств робототехники в течение 3–5 лет. Без использования интеграционного мехатронного подхода и без применения систем интеллектуального управления достигнуть современного уровня функционирования роботов практически невозможно.

В заключение перечислим основные перспективные области применения робототехники [3]:

1. Робототехника наземного и воздушного базирования. Сюда относятся создание автоводителей и автопилотов, робототехнические системы для действий в экстремальных условиях, в том числе для вооруженных сил и других силовых структур, групповое применение роботов и создание следующих интеллектуальных поколений таких роботов, ориентированных на автономное функционирование. Большие перспективы связаны с микроробототехникой. Летающие, плавающие, ползающие и тому подобные микророботы произведут качественные изменения во многих важнейших сферах человеческой деятельности.

2. Био- и медицинская робототехника. С ней связана как проблематика заимствования бионических решений, так и обратный процесс внедрения робототехники в живые организмы. Начало последнему положило протезирование конечностей, затем усиление физических возможностей человека для функционирования в экстремальных условиях (активные скафандры, биоуправляемые шагающие машины и т. п.). Наконец, появились новые поколения интеллектуальных про-

тезов и экзоскелетов, роботы-сиделки, робототехнические системы для реабилитации инвалидов, массажисты и т. п. Однако прежде всего – это новые области применения робототехники, такие, как хирургия, в том числе дистанционная, микророботы для внутрисосудистой и внутриполостной диагностики и хирургии.

3. Космическая робототехника. Сегодня это важнейшая часть очередного этапа развития исследований и освоения космоса. космическая робототехника открывает перспективы создания принципиально новых космических аппаратов и их систем, в том числе и в околоземном пространстве, включая наноспутники, монтажно-сборочные и регламентные работы на орбите и т. п.

4. Подводная робототехника. Наряду с космосом это второе направление «экспансии» человечества, в котором решающую роль должна играть робототехника. Если человек-амфибия – фантастика, то роботы-амфибии – уже реальность. Достаточно напомнить их работу по обследованию затонувших кораблей, использование подводных роботов-геологов. А ведь это, по существу, еще только предыстория подводной робототехники.

В настоящее время еще нет ни лунных, ни других космических баз, обслуживаемых роботами, нет и подобных подводных сооружений. Однако если сегодня основное направление развития современного машиностроительного производства – создание безлюдных комплексно-роботизированных предприятий, то тем более это должно относиться к освоению космоса и глубин океана.

Среди перечисленных перспективных областей применения робототехники не названа промышленная робототехника. Объясняется это тем, что, хотя в обозримом будущем основной мировой парк роботов по-прежнему будут составлять промышленные роботы, но этот уже сложившийся раздел робототехники будет определять ее развитие в рассмотренных ранее направлениях.

## Лекция 2

# Базовые определения и основные направления развития мехатроники и робототехники

---

---

В начале лекции 1 было отмечено, что современный термин «мехатроника» (*Mechatronics*) был введен в 1969 году японским инженером Тецуро Мори, работавшем в фирме *Yaskawa Electric*. В 1972 году этот термин был зарегистрирован в качестве торговой марки. В 1984 году японское общество инженеров-механиков (Никон кикай гаккай) выпустило в издательстве «Гиходо» семитомное издание, посвященное мехатронике и, таким образом, термин «мехатроника» окончательно утвердился в научных кругах [4]. Название получено комбинацией слов:

«МЕХАТРОНИКА» = «МЕХАника» + «элекТРОНИКА».

Специальность «Мехатроника» впервые вошла в классификатор Государственного комитета по высшему образованию в 1994 году.

### 2.1. Основные понятия и определения

---

---

Во введении к данному курсу лекций даны определения понятий «мехатроника» и «робототехника» согласно Федеральному государственному стандарту высшего профессионального образования по направлению подготовки 221000 – «Мехатроника и робототехника» (степень «бакалавр»), 2009.

В работе [1] приведено несколько интерпретаций понятия «мехатроника» и «робототехника» со ссылкой на ведущих специалистов в данной области:

Мехатроника – это:

– «...область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями» (Государственный образовательный стандарт РФ по направлению «Мехатроника и робототехника», 2000).

– «...междисциплинарная инженерная область, связанная с проектированием изделий, функции которых основаны на интеграции механических и электронных компонентов, координируемых системой управления».

– «...синергетическое сочетание точной механики, электронных систем управления и информационных технологий для проектирования, производства и эксплуатации интеллектуальных автоматических систем».

– «...новая область науки и техники, посвященная созданию и эксплуатации машин и систем с компьютерным управлением движением, которая базируется на знаниях в области механики, электроники и микропроцессорной техники, информатики и компьютерного управления движением машин и агрегатов» (Кулешов В. С. Образовательный стандарт 1995 г.).

– «...область науки о механических, энергетических и информационных процессах и их системном взаимодействии в машинах с компьютерным управлением, обеспечивающим получение новых свойств самой машины и качества исполнительных движений».

– «...область техники, обеспечивающая реализацию жизненного цикла мехатронных объектов, вплоть до интеллектуальных машин».

– «...область науки, которая сочетает основы механических, электронных и компьютерных инженерных наук».

– «...область науки, посвященная анализу исполнительных состояний мехатронных объектов и функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов между ними и с внешней средой, а также синтезу мехатронных объектов».

– «...технология, которая объединяет механику с электронными и информационными технологиями для получения, как функционального объединения, так и пространственной интеграции в компонентах, модулях, изделиях и системах».

– «...философия проектирования, которая использует синергетическую интеграцию механики, электроники и компьютерных тех-

нологий для производства качественно новых изделий, процессов и систем».

– «...метод принятия сложных решений для функционирования физических систем».

– «идеология пространственного и временного интегрирования функций в инженерных устройствах и технологических процессах».

Робототехника – это:

– «...область науки и техники, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, предназначенных для автоматизации сложных технологических процессов и операций, в том числе выполняемых в недетерминированных условиях, для замены человека при выполнении тяжелых, утомительных и опасных работ» (Государственный образовательный стандарт РФ по направлению «Мехатроника и робототехника», 2000).

– «...создание роботов, других средств робототехники и основанных на них технических систем и комплексов различного назначения» [3].

– «...система универсальных автоматов для осуществления механических действий, подобных тем, которые производит человек...» [3].

– «...универсальная механическая система, в которой распознавание и действия соединены интеллектуальными связями...» [4].

– «...система, обладающая набором функций, объединяющим функции распознавания, действия, мышления...» [4].

– «...техническое устройство, способное самостоятельно функционировать в неизвестных заранее, изменяющихся условиях внешнего мира...» [5].

– «...интеллектуальная машина, выполняющая комплексные задачи в изменяющихся и неопределенных средах при минимальном взаимодействии с человеком-оператором (профессор Саридис Г. Н. – *Saridis G. N.*).

Приведенный список свидетельствует, что концептуальные идеи мехатроники и робототехники выходят далеко за рамки отдельных традиционных технических наук, таких, как «Теория механизмов и механика машин», «Теория автоматического управления», «Информационно-измерительная техника». Прародительницей мехатроники и робототехники является кибернетика – наука об управлении, которая изучает всю совокупность процессов целенаправленного изменения форм вещества, энергии и информации, протекающих в физико-технических системах.

В последнее время кибернетика разделилась на два направления. Первое теоретическое направление отнесено к *информации*, второе – к *технической кибернетике*. Мехатроника и робототехника объединяют оба эти направления.

Приведенные выше разносторонние определения мехатронных и робототехнических систем нуждаются, на наш взгляд, в дополнительных комментариях.

I. Мехатроника и робототехника используют системный подход к исследованию, созданию и производству сложных технических систем.

В широком смысле системный подход – способ принятия решений в условиях, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной физической природы. В узком смысле принцип системного подхода заключается в рассмотрении частей сложной системы с учетом их взаимодействия. Системный подход включает в себя выявление функций и структуры системы, типизацию (группировку по характерным признакам) связей, определение свойств (атрибутов) системы, анализ влияния внешней среды, выбор системы управления.

Мехатроника и робототехника демонстрируют новый методологический подход к построению машин и систем с качественно новыми характеристиками. Например, разработка мехатронных систем и машин методом параллельного проектирования (одновременный и взаимосвязанный синтез всех компонентов системы), а сами интегрированные мехатронные компоненты выбираются еще на начальной стадии проектирования при разработке технических заданий и решений.

II. Базовыми объектами изучения мехатроники и робототехники являются мехатронные модули различного назначения. Проектирование современных мехатронных систем основано на модульных принципах и технологиях.

Общее определение модуля: «*Модуль* – это унифицированная функциональная часть машины (системы), конструктивно оформленная как самостоятельное изделие или подсистема».

Понятие *мехатронного модуля* (ММ) формулируется следующим образом: «Мехатронный модуль – это функционально и конструктивно самостоятельное синергетически, аппаратно и программно интегрированное изделие (или подсистема), состоящее из элементов различной физической природы и предназначенное для реализации определенных функций системы».

Модули могут состоять из отдельных мехатронных элементов (компонентов).

Мехатронные модули мехатронных систем по характеру выполняемых ими функций и по составу входящих в них устройств и элементов можно подразделить на три группы:

1. Исполнительные мехатронные модули движения.
2. Измерительно-информационные мехатронные модули.
3. Мехатронные модули систем управления различного уровня.

**Исполнительные мехатронные модули движения** по составу объединяемых устройств и элементов можно разделить:

- а) на модули движения (МД);
- б) мехатронные модули движения (ММД);
- с) интеллектуальные мехатронные модули движения (ИММД).

Следуя [6], введем понятия МД и ММД.

**Модуль движения (МД)** – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, включающее в себя механическую (гидравлическую, пневматическую) и электротехническую части, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

Примерами МД являются мотор-редукторы, мотор-колесо, мотор-барабан, электрошпиндель.

**Мехатронный модуль движения (ММД)** – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, включающее в себя механическую (гидравлическую, пневматическую), электротехническую, электронную и информационную части, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

В отличие от МД в ММД появились электронные и информационные устройства.

В последнее время наметилась реальная интеллектуализация исполнительных мехатронных модулей движения на приводном уровне машин и механизмов.

**Интеллектуальный мехатронный модуль движения (ИММД)** – конструктивно и функционально самостоятельное изделие с синергетической интеграцией механической (гидравлической, пневматической), электрической, электротехнической, электронной и компьютерной (микропроцессорной) частей, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

Таким образом, по сравнению с ММД в конструкцию ИММД дополнительно включены микропроцессорные вычислительные устройства и силовые электронные преобразователи, а также элементы,

обеспечивающие интеллектуальное управление со степенью интеллектуальности хотя бы в малом (раздел 2.2.2).

Примеры мехатронных модулей различного уровня приведены на рис. 2.1 [1].



Рис. 2.1. Классификация мехатронных модулей

**Информационно-измерительные мехатронные модули** предназначены для сбора, обработки, передачи, хранения и представления достоверной информации в удобном для вычислительной техники виде для реализации управления мехатронными системами.

**Мехатронные модули систем управления различного уровня** предназначены для управления сложными динамическими объектами и предполагают многоуровневую иерархическую структуру, включающую стратегический, тактический и исполнительный уровни управления, имеющие доступ к информационно-измерительному мехатронному модулю для решения задач управления на каждом иерархическом уровне управления мехатронной системы.

В общем случае сложность задач управления мехатронными системами обуславливает целесообразность и необходимость их реше-

ния с привлечением методов и технологий искусственного интеллекта (раздел 2.2.2).

III. В определении мехатронных систем подчеркнут синергетический характер интеграции разнородных элементов в мехатронных модулях и системах.

Термин «синергетика» был предложен в 70-х годах XX века немецким физиком Г. Хакеном и обозначал совместное действие и сотрудничество, направленное на достижение общей цели. Важно подчеркнуть, что синергетическое объединение (интеграция) предполагает не простое соединение отдельных частей системы, а достижение за счет объединения более высоких результатов. Практикуется конструктивное встраивание разнородных мехатронных элементов в конструкцию мехатронных модулей — создание встроенных систем.

IV. В определении мехатронных систем также декларируется необходимость интеллектуализации мехатронных и робототехнических систем в первую очередь за счет применения интеллектуальных систем управления.

В заключение данного раздела введем понятие интеллектуальной мехатронной машины, представляющей синтез ИММД и мехатронного модуля управления.

**Интеллектуальная мехатронная машина (ИММ)** — это интеллектуальная многомерная система, построенная на мехатронных принципах и технологиях, которая способна эффективно выполнять программы функциональных движений в условиях нечеткой и неполной информации о целях, эксплуатационных характеристиках машины и параметрах внешней среды.

Частным случаем такой машины является интеллектуальная робототехническая система. Обобщенная структура мехатронной машины, в основу построения которой положена структура автоматических роботов, показана на рис. 2.2 [1].

Внешней средой для машин рассматриваемого класса является технологическая среда, которая содержит различное основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку и объекты работ. Внешние среды укрупнено можно разделить на два основных класса: *детерминированные* и *недетерминированные*. К детерминированным относятся среды, для которых параметры возмущающих воздействий и характеристики объектов работ могут быть заранее определены с необходимой точностью. Некоторые среды являются недетерминированными по своей природе, например, экстремальные подводные и подземные среды.

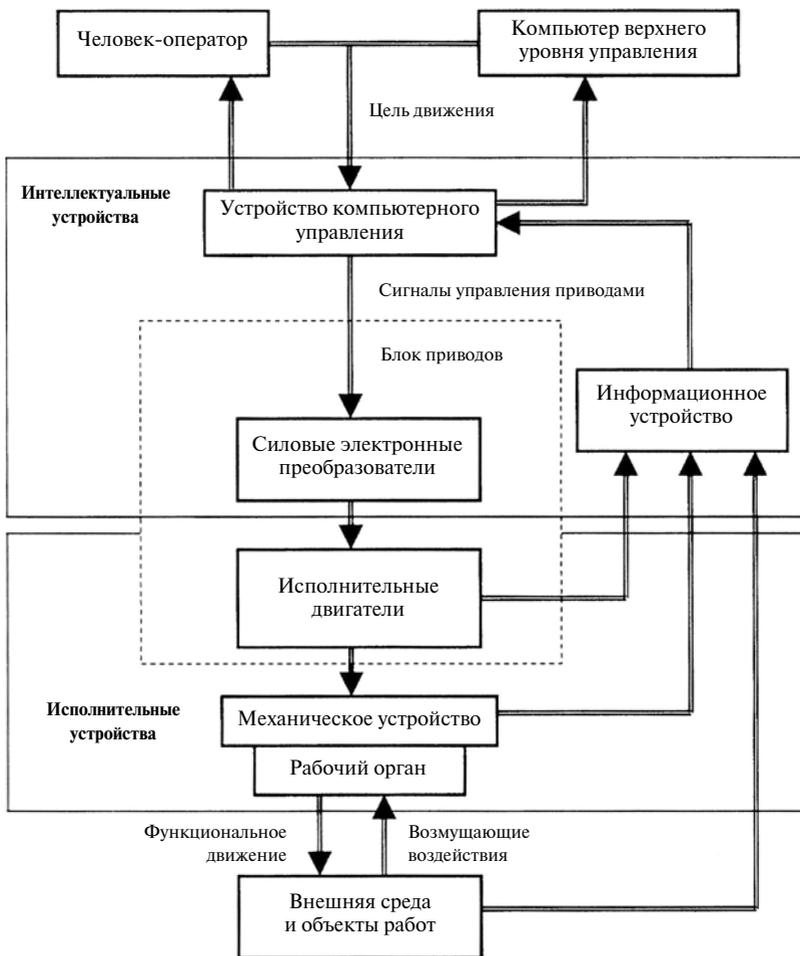


Рис. 2.2. Обобщенная структура мехатронных машин

Характеристики технологических сред, как правило, могут быть определены с помощью аналитико-экспериментальных исследований и методов компьютерного моделирования. При выполнении мехатронной системой заданного функционального движения объекты работ оказывают возмущающие воздействия на рабочий орган. Примерами таких воздействий могут служить силы резания для операций механообработки, контактные силы при сборке, реакция струи жидкости для гидравлической резки.

В состав мехатронной машины входят четыре основные части (рис. 2.2):

- *механическое устройство*, конечным звеном которого является *рабочий орган*;
- *блок приводов*, включающий в себя силовые преобразователи и исполнительные двигатели;
- *устройство компьютерного управления*, на вход которого поступают команды человека-оператора либо ЭВМ верхнего уровня управления;
- *информационное устройство*, предназначенное для получения и передачи в устройство компьютерного управления данных о реальном движении машины и о фактическом состоянии ее подсистем.

Механическое устройство и двигатели объединены в группу исполнительных устройств. В состав группы интеллектуальных устройств включены электронная, управляющая и информационная части машины.

*Устройством компьютерного управления* будем называть комплекс аппаратных и программных средств, вырабатывающий сигналы управления для блока приводов машины. В состав комплекса обычно входят задающие устройства (например, джойстики и рукоятки), пульт управления оператора, вычислительные и преобразующие устройства, периферийные устройства ввода-вывода информации.

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

- 1) управление функциональными движениями мехатронной машины в реальном масштабе времени;
- 2) координация управления механическим движением с сопутствующими внешними процессами;
- 3) взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс в режимах программирования (режим *off-line*) и непосредственно в процессе движения (режим *on-line*);
- 4) обмен данными с внешними устройствами (информационным устройством, блоком приводов, компьютером верхнего уровня, периферийными устройствами).

*Информационное устройство* предназначено для сбора и передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии внешней среды и движущейся мехатронной машины.

Согласно представленной блок-схеме в информационном устройстве можно выделить три группы сенсоров:

1) датчики информации о состоянии внешней среды и объектов работ (системы технического зрения, локационные датчики и дальномеры и т. д.);

2) датчики информации о движении механической части (датчики перемещений, скоростей, ускорений, сил и моментов);

3) датчики обратной связи блока приводов (дают информацию о текущих значениях электрических токов и напряжений в силовых преобразователях).

*Механическое устройство* мехатронной машины представляет собой многосвязный механизм, кинематическую цепь которого образуют движущиеся звенья, составляющие кинематические пары. Конечным звеном кинематической цепи является рабочий орган.

*Рабочий орган* мехатронной машины – это составная часть механического устройства для непосредственного выполнения технологических операций и / или вспомогательных переходов.

Примеры рабочих органов в робототехнике: механические захваты, вакуумные и электромагнитные захватные устройства, сварочные клещи (для точечной сварки), инструментальные головки для механообработки и лазерных операций, окрасочный пистолет. Таким образом, *рабочий орган* – это управляемый модуль, который может иметь несколько степеней подвижности и состоять из нескольких элементов, поэтому при его разработке также могут использоваться мехатронные принципы интеграции.

Далее необходимо заметить, что система интеллектуального управления машиной (комплекс верхнего уровня управления на рис. 2.2) в условиях неполной информации обычно реализуется в виде комплекса программных средств на компьютере верхнего уровня управления. При отсутствии такого комплекса ИММ превращается в интеллектуальный мехатронный модуль движения (ИММД). И, наконец, кратко определим две последние группы модулей мехатронных систем.

## 2.2. Основные направления развития мехатронных и робототехнических систем

---

Основными квалификационными признаками, определяющими направление развития мехатронных и робототехнических систем, являются интеграция, интеллектуализация и миниатюризация (см. Лекция 1).

Следуя [1] в соответствии с признаком синергетического объединения, исторически мехатронные модули можно разделить на несколько уровней.

Мехатронные модули первого уровня представляют собой объединение только двух исходных элементов (чаще всего механического и электрического или гидравлического, пневматического). Типичными примерами модулей первого поколения могут служить «мотор-редукторы», «мотор-колесо», где механический редуктор и колесо вместе с управляемым двигателем выпускаются как единый функциональный элемент.

Мехатронные модули второго уровня появились в 80-е годы в связи с развитием новых электронных технологий, которые позволили создать миниатюрные датчики и электронные блоки для обработки их сигналов. В этих модулях была достигнута интеграция трех устройств различной физической природы: механических, электротехнических и электронных. На базе мехатронных модулей данного класса созданы управляемые энергетические машины (турбины, генераторы), станки и промышленные роботы с числовым программным управлением.

Мехатронные модули третьего уровня возникли в связи с появлением на рынке сравнительно недорогих микропроцессоров и контроллеров на их основе. По сравнению с модулями второго уровня они дополнительно имеют аппаратно и программно-встроенную компьютерную часть, что позволяет называть их интеллектуальными мехатронными модулями движения. В результате достигается интеграция четырех и более компонентов: высокоточных и компактных механических узлов, прецизионных информационно-измерительных устройств, вычислительных средств и современных технологий управления.

На четвертом уровне интеграции из мехатронных модулей компонируются многокоординатные интеллектуальные мехатронные машины, роботы и робототехнические системы.

Пятый уровень интеграции предполагает создание самодостаточной системы интеллектуальных многофункциональных мехатронных машин для реконфигурируемого производства, построенного по принципу клеточного строения живых организмов из многофункциональных ячеек. Это, по существу, означает переход от основанного на декомпозиции модульного построения технических систем

к системно оптимизированным единым структурам. Процесс создания однородных структур уже начался с взаимного проникновения, а затем и слияния информационных компонентов в единую структуру, реализующую функциональные компоненты подобно мультиагентным системам в компьютерных сетях. Эта тенденция должна распространиться далее и на силовые компоненты [8], например, за счет использования в мехатронных технологиях «активных» материалов, которые способны трансформировать энергию определенного физического поля (электрического, магнитного, теплового и т. п.) в различные механические эффекты изменения геометрических размеров тел (пьезоэффект, сплавы с памятью формы, магнитоstrictionные и другие физические эффекты).

### 2.2.2. Интеллектуализация

---

---

Основой интеллектуализации мехатронных и робототехнических систем в первую очередь являются *интеллектуальные системы управления*. Они априорно ориентированы на работу в условиях неполной и нечеткой исходной информации, неопределенности внешних возмущений и среды функционирования. Такие повышенные требования к системам управления диктуют необходимость привлечения нетрадиционных подходов к управлению с использованием методов искусственного интеллекта и современных информационных технологий.

В отличие от традиционных систем управления интеллектуальные системы ориентированы на обработку и использование знаний. *Знания* – это закономерности предметной области (принципы, связи, законы), полученные в результате практической деятельности и профессионального опыта, позволяющие специалистам ставить и решать задачи в этой области. Современные информационные технологии обладают алгоритмами, позволяющими формировать, обрабатывать и использовать знания для решения задач управления сложными объектами. Построенные таким образом системы управления называются *интеллектуальными*. Класс интеллектуальных систем определяется тем, в какой степени система обеспечивает выполнение следующих пяти принципов организации интеллектуальных систем управления [7]:

- наличие тесного информационного взаимодействия управляющих систем с реальным внешним миром и использование специально организованных информационных каналов связи;

- принципиальная открытость систем для повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения;
- наличие механизмов прогноза изменений внешнего мира и собственного поведения системы в динамически меняющемся внешнем мире;
- построение управляющей системы в виде многоуровневой иерархической структуры в соответствии с правилом: повышение интеллектуальности и снижение требований к точности по мере повышения ранга иерархии в системе (и наоборот);
- сохраняемость функционирования (возможно, с некоторой потерей качества или эффективности) при разрыве связей или потере управляющих воздействий от высших уровней иерархии управляющей структуры.

Прокомментируем смысл выделенных пяти принципов, отметив их исключительную важность с точки зрения оценки поведения интеллектуальных систем управления.

*Первый принцип* подчеркивает непосредственную связь интеллектуальных управляющих систем с внешним миром. Находясь в непрерывном взаимодействии с внешним миром, интеллектуальные системы получают из него всю необходимую информацию для принятия решений и пополнения знаний. Сама управляющая система в свою очередь может оказывать на внешний мир активное воздействие в результате реализации собственного поведения.

Модель знаний о внешнем мире интеллектуальной системы должна предполагать возможность изменений внешнего мира и знаний о нем в результате воздействий на него системы. Выполнение принципа информационного взаимодействия системы с внешним миром означает, что любые упрощения модели состояний, вероятностных описаний, игр автоматов со средой для представления событий реального внешнего мира непригодны. Именно в этом и состоит специфика систем управления рассматриваемого класса.

Принципиальная открытость систем в соответствии со *вторым принципом* обеспечивается наличием таких подсистем высшего ранга в иерархической структуре, как самонастройка, самоорганизация и самообучение. Знания интеллектуальной системы управления состоят из двух частей – постоянных (проверенных) знаний, которыми система обладает и постоянно пользуется, и временных (проверяемых) знаний, в которых системы не уверена, с которыми она экспериментирует в процессе обучения. Знания второго типа либо отбрасываются системой, либо переходят в знания первого типа в зависимости от

результатов анализа своего поведения во внешнем мире. Выполнение второго принципа требует организации в управляющей системе процесса приобретения и пополнения знаний.

В соответствии с *третьим принципом* управляющую систему нельзя считать в достаточной мере интеллектуальной, если она не обладает возможностью прогноза изменений самого внешнего мира и собственного в нем поведения. Система без прогноза, функционирующая в динамически меняющемся внешнем мире, может попасть в критическую ситуацию, из которой не сможет найти выхода из-за временных ограничений на работу механизмов формирования управляющих воздействий, определяющих ее поведение, адекватное сложившейся ситуации.

*Четвертый принцип* позволяет наметить пути построения моделей сложных управляющих систем в тех случаях, когда неточность знаний о модели объекта или о его поведении можно компенсировать увеличением числа уровней интеллектуальности, а также использованием совершенных механизмов принятия решений в условиях неопределенности в соответствующих алгоритмах управления.

И, наконец, *пятый принцип* устанавливает лишь частичную потерю интеллектуальности (но не прекращение функционирования) при отказах в работе высших уровней иерархии системы. Сохранение автономного функционирования в рамках более простого (автономного) поведения системы, характерного для нижних уровней структуры управления, также чрезвычайно важно для автономно функционирующих систем в реальном внешнем мире.

Приведенные пять принципов организации структуры интеллектуальной системы управления определяют класс исследуемых систем. Можно уточнить теперь само понятие «интеллектуальность системы управления», а также ввести понятие «уровень» и «степень интеллектуальности».

Введем ряд определений.

Система управления, не имеющая базы знаний, неспособная к самообучению и адаптации, не умеющая прогнозировать события и построенная с использованием только методов классической теории автоматического управления (ТАУ), имеет степень интеллектуальности *в малом*.

Система управления, имеющая базу знаний, способная к самообучению и адаптации, но не умеющая прогнозировать события, имеет степень интеллектуальности *в большом*.

Система управления, имеющая базу знаний, способная к самообучению, адаптации и прогнозу событий называется интеллектуальной *в целом*.

Определение степени интеллектуальности в малом, в большом и в целом введено по аналогии с устойчивостью в малом, большом и целом для классических систем автоматического управления.

Известны два основных направления интеллектуализации мехатронных систем:

- разработка высокоскоростных аппаратных средств вычислительной техники;
- разработка специальных алгоритмов на основе современных методов и технологий обработки знаний.

Россия идет по пути использования в основном второго направления, в то время как Япония предпочитает в основном первый путь интеллектуализации.

---

---

### 2.2.3. Миниатюризация

Переходим к рассмотрению третьего квалификационного признака развития мехатронных и робототехнических систем – *миниатюризации*.

Сегодня вопросы миниатюризации являются ключевыми во всех отраслях промышленности – микроэлектронике, нанотехнологиях, генетике и др.

Микроэлектроника обеспечила существенное развитие мехатроники. Современные микроэлектронные устройства открыли принципиально новые возможности для объединения (интегрирования) механики и электроники, которые по своему уровню значительно превосходят существовавшую ранее электромеханику.

Микроэлектроника играет ключевую роль в реализации машин нового поколения – микроэлектромеханических систем (МЭМС) или микросистемных технологий (*MST*).

МЭМС (или *MEMS*) – конструктивно представляют сформированные на одной подложке датчики, исполнительные механизмы, устройства управления с размерами элементов до нескольких единиц микрон и менее, имеющие, как правило, трехмерную структуру. Они изготавливаются большей частью по полупроводниковой технологии: поверхностная и объемная микрообработка материалов (поликристаллический кремний), *LIGA* и *SIGA* – технологии, а также *MUMPs* – процесс [9].

Микрофотография фрагмента храпового механизма – 20 таких шестеренок равны примерно диаметру точки в конце предложения – приведена на рис. 2.3.

Микромашины не собирают из готовых деталей, а целиком выращивают слой за слоем на кремниевой подложке, применяя технологии осаждения слоев поликремния (поликристаллического кремния) и двуокиси кремния, фотолитографии, травления и планаризации (сглаживания), т. е. те технологии, что давно применяются для изготовления микроэлектроники. В конце технологического процесса изготовления микромашин все ее детали уже находятся на своих местах в правильном соединении между собой, но двигаться еще не могут, потому что как бы «утоплены» в толстом слое двуокиси кремния, которую необходимо вытравить кислотой. Толщина слоев поликремния 1–2 микрона, т. е. это – толщина шестерней, маховиков, шатунов, рычагов, собачек, храповиков, пружин и прочих составляющих механизма.

В 1994 году инженеры из университета Висконсин-Мэдисон создали микродвигатель с размером ротора 140 мкм (0,14 мм), дающий почти 150 тысяч оборотов в минуту в течение 24 часов и питающийся электростатическим электричеством.

Широкое применение *MST*-технологии нашли при разработке *микророботов*. Микророботы по внешнему виду могут быть копией макророботов, но чаще на них совершенно не похожи. По определению микроробот – это микроэлектромеханическое устройство с программируемой последовательностью действий и способностью выполнять основные операции с точностью от 0,1 мкм до 1 нм и занимающее объем кратный  $10^{-3} \text{ м}^3$  (1 мм<sup>3</sup>).

Микроробототехника теснейшим образом связана с нанотехнологиями, обеспечивая микроперемещение микрообъектов.

В настоящий момент основной проблемой в микротехнологиях и микросистемной технике является разработка единых технологических подходов к изготовлению всех подсистем. Только единый подход к производству различных по функциональному назначению и составу подсистем позволит реализовать задачи, на решение которых нацелено создание микророботов.



Рис. 2.3. Храповой микромеханизм

Наукой и техникой пройден пока только *первый этап* развития микросистем — создание микроустройств обработки информации, принятия решений и управления — микроэлектроники. Эти достижения явились базой для работ *второго этапа* построения микросистем — создания компактных микроустройств и микросистем с использованием единого технологического цикла при изготовлении сенсорной, управляющей и силовой подсистем. В последние годы в различных странах появилось большое количество экспериментальных микроустройств и микросистем, нацеленных на решение задач в различных областях науки и техники. Происходит их дальнейшая миниатюризация, расширение их функциональных возможностей, при этом создаются универсальные технические решения, которые можно без существенных изменений применять как в военной, так и в гражданской области. Но в то же самое время микроустройства второго этапа развития микросистемотехники строятся в виде модульных схем, где различные элементы подсистем могут быть выполнены в виде отдельных микросхем различного функционального назначения, соединенных между собой электрическими цепями.

На *третьем этапе* прогнозируется создание микроустройств распределенного типа, во многом копирующих структуры живых организмов (биоморфы). Работы по третьему этапу уже начались, и появились определенные успехи. При этом следует заметить, что работы на всех трех этапах могут идти как самостоятельно, так и во взаимодействии и взаимодополнении с другими этапами.

Второй этап развития микросистемной техники стал возможен лишь с появлением таких технических решений, как сканирующие туннельные микроскопы (СТМ). Основные положения нового направления научно-технической революции были намечены в хрестоматийной речи отца нанотехнологий Ричарда Фейнмана «*There's Plenty of Room at the Bottom*» («Там внизу — море места»), произнесенной им в Калифорнийском технологическом институте в 1959 году. Тогда его слова казались фантастикой, потому что не существовало технологии, позволяющей оперировать отдельными атомами. Такая возможность появилась лишь в 1981 году, когда в швейцарском отделении *IBM* был разработан сканирующий туннельный микроскоп — прибор, чувствительный к изменениям туннельного тока между поверхностью материала и сверхтонкой иглой.

*IBM, Fujitsu и Intel* за последние два года потратили на нанотехнологии миллиард долларов. Нанотехнологии в основном применяются для создания особых материалов — солнцезащитных экранов,

композитных материалов для автомобилей, устойчивых к загрязнению тканей, самоочищающихся оконных стекол и т. д. Уже не одно десятилетие обсуждается возможность создания самовоспроизводящихся машин.

В последнее время в области микро- и миниробототехники на стыке таких, казалось бы, разных областей знаний, как микроэлектроника, микросистемотехника, нейрокибернетика, бионика и биология появились новые направления, которые можно объединить под названием биоробототехника. Наиболее интенсивный характер этих работ наблюдается в основном применительно к военной робототехнике.

Основные исследования в данном направлении выполнялись в рамках программ «Управляемые биологические системы» и «Биоподобные системы», финансируемые агентством перспективных оборонных исследований ДАРПА министерства обороны США.

Одним из перспективных направлений современной биомикроминиробототехники является направление, связанное с созданием роботов-биогибридов.

Суть этого подхода заключается в том, что управление осуществляется живым организмом — насекомым или мелким животным, путем воздействия электрическими сигналами или иным способом на его нервную систему. Такие биомикро- или биоминироботы могут использоваться как мобильные устройства для решения целого спектра задач. В частности, они могут быть использованы для решения задач химической и радиационной разведки, поиска людей под завалами при ликвидации последствий аварий и катастроф, для охраны и наблюдения за объектами, а также для обнаружения взрывных устройств и разминирования.

В настоящее время для решения многих задач весьма перспективно использование мобильных биороботов, создаваемых на основе биоорганизмов, высокочувствительных сверхминиатюрных сенсорных устройств и управляющих электронных систем. При этом могут создаваться биотехнические или бионические системы разной степени сложности.

В наиболее простом случае биообъект может нести систему, отслеживающую его передвижения, и необходимый набор датчиков для оценки состояния окружающей среды, информация от которых или передается в стационарную систему сбора и обработки информации по проводным и беспроводным каналам связи, или может регистрироваться аппаратурой, размещаемой на биообъекте.

Больших успехов в области микромехатроники и нанотехнологий добились Германский институт микромеханики (созданный в рамках системы Фраунгоферовских институтов) и фирма *Klocke Nanotechnik* (Германия), разработавшие пьезоуправляемый двигатель (ход которого составляет несколько нанометров) для электронной микроскопии, микробиологии, микросборки, «интеллектуальный вал двигателя» и т. д.

В заключение данного раздела отметим, что все три признака развития мехатронных систем — синергетическое объединение элементов системы, ее интеллектуализация и миниатюризация — являются в известной степени взаимосвязанными и влияют друг на друга. Например, уровень миниатюризации элементов системы, безусловно, влияет на уровень синергетического объединения (интеграции) и интеллектуализации системы.

Обобщая изложенное, можно констатировать, что мехатроника как новое научно-техническое направление символизирует и воплощает общие тенденции развития техники в XXI в. — междисциплинарную интеграцию, интеллектуализацию и миниатюризацию.

## Лекция 3

# Технологическое обеспечение мехатронных и робототехнических систем

---

---

**Т**ехнологическое обеспечение является решающим фактором реального развития мехатроники и робототехники [1]. Жизненный цикл мехатронных систем состоит из нескольких этапов – проектирование, подготовка производства, производство и реализация, эксплуатация и утилизация. На всех этапах жизненного цикла системы имеются свои целевые установки. При этом участники жизненного цикла стремятся достичь поставленных целей с максимальной эффективностью. Специфика задач, решаемых на различных этапах жизненного цикла изделий, обуславливает разнообразие технологий для их решения, базирующихся на принципах системного подхода, как к каждому этапу, так и ко всему жизненному циклу мехатронной системы.

### 3.1. Структурный и технологический базисы мехатроники

---

---

Структурная пирамида мехатроники, учитывающая целостность мехатронного объекта, состоящего из трех главных частей – механической, электронной и информационной, наглядно показана в форме пирамиды (рис. 3.1) [1].

Оси координат (базовые направления) пирамиды – механика, электроника, информатика – соответствуют трем главным (базовым) частям мехатронной системы. На координатных осях отмечены современные уровни развития этих частей (прецизионная механика, микроэлектроника, информационные технологии). Попарная интеграция базовых направлений – грани пирамиды образуют три гибридных

направления (электромеханика, компьютерные системы управления, системы автоматизированного проектирования механических систем). На стыке гибридных направлений возникает мехатроника.



Рис. 3.1. Структурная пирамида мехатроники

Базовые и гибридные направления определяют технологический базис мехатроники (рис. 3.2) [1].



Рис. 3.2 Технологическая пирамида мехатроники

Пирамидальная форма и состав технологической пирамиды мехатроники полностью соответствует ее структурному базису.

Фундаментом технологического базиса мехатроники являются новые технологии всех базисных направлений – прецизионные и модульные технологии механики, микроэлектронные и информационные технологии. Объединения указанных технологий представляют комбинированные технологии, принадлежащие граням технологической пирамиды, к которым можно отнести:

- гибридные технологии электромеханики;
- цифровые технологии управления движением;
- технологии автоматизированного проектирования.

### 3.1.1. Гибридные технологии электромеханики

---

---

Все компоненты мехатронных модулей делятся на две большие группы:

1) исполнительные элементы, к которым отнесены механические и электротехнические элементы (двигатели, преобразователи движения, направляющие, тормоза и т. д.);

2) интеллектуальные элементы, куда входят силовые электронные блоки, информационные и управляющие элементы.

Гибридные технологии предполагают наличие двух этапов технологической интеграции элементов первой и второй группы элементов. К первому относятся операции изготовления *гибридных элементов*, а ко второму – *гибридная сборка* мехатронных модулей и машин из гибридных элементов. При этом допускается, что элементы обеих групп изготавливаются независимо и параллельно на различных технологических линиях, либо приобретаются у различных производителей (по заранее согласованным спецификациям). Гибридная же сборка соответствует конструкторской идее объединения (интеграции) разнообразных гибридных элементов в едином корпусе. Пример интеграции исполнительных элементов через гибридную сборку – интегрированный сервопривод СПШ 10 (ЗАО «Сервотехника») (рис. 3.3).

В состав СПШ 10 входят следующие сборочные единицы: гибридный шаговый двигатель, преобразователь

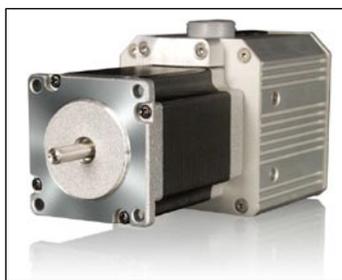


Рис. 3.3. Внешний вид интегрированного сервопривода СПШ 10

частоты на основе высокопроизводительного *DSP* процессора, датчик углового перемещения, программируемый логический контроллер (*PLC*), промышленный интерфейс *CAN*. Схема гибридной сборки СПШ 10 из гибридных элементов показана на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Схема гибридизации привода СПШ 10

Сервопривод СПШ 10 предназначен для максимально широкого применения в различных областях машиностроения.

Достоинства сервопривода СПШ 10:

- бесшаговое (векторное) управление на основе адаптированного для шаговых двигателей алгоритма;
- высокие динамические показатели за счет использования замкнутого контура регулирования тока;
- замкнутый контур скорости;
- низкая вибрация за счет динамически регулируемого усилия;
- простота монтажа;
- небольшие массогабаритные показатели.

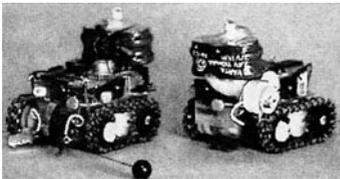
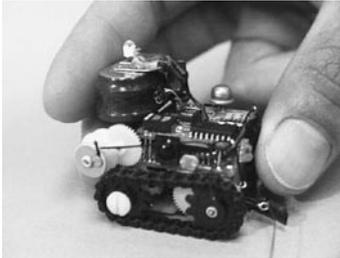


Рис. 3.5. Автономный мобильный микроробот *Ant* (*MIT Artificial Intelligence Lab*)

Гибридные технологии изготовления нашли широкое применение в производстве микроэлектромеханических систем (МЭМС). Типичными представителями МЭМС являются мобильные микророботы. В лаборатории искусственного интеллекта (США, Кембридж) создано несколько типов мобильных микророботов с использованием гусеничного движителя (рис. 3.5) [9].

Его основное преимущество — полная автономность, так как использование минидвигателей постоянного тока не требует мощных источников питания: вполне достаточно применение *Ni-Cd* аккумулятора. К преимуществу также относится его высокая маневренность: гусеничный привод позволяет разворачиваться практически на месте и реализовать одновременно линейное и вращательное движения.

К недостаткам следует отнести сложную механическую систему, наличие редуктора. Это приводит к необходимости бороться с зазорами и люфтами. Уменьшить их влияние на характер и качество движения возможно путем усложнения конструкции или парированием их программным путем в системе управления. Использование гусеничного привода влечет за собой потерю значительной доли энергии на преодоление силы трения.

Основное назначение таких «игрушек» — это отработка механизмов построения самоорганизованных колоний таких механизмов (за основу самоорганизации взяты механизмы поведения муравьев). Поэтому этот прототип и получил название *Ant* (англ. «муравей»). При завершении работ по этой тематике ученые надеются получить группу микророботов, способных выбирать самостоятельно стратегию достижения цели, решать вопросы централизации или, наоборот, децентрализации управления и т. д.

Развитие МЭМС-технологий позволило создать сенсоры, в конструкции которых реализовано объединение функций измерения текущих параметров механического движения, их преобразования и обработки по заданным алгоритмам в едином блоке — интеллектуальные сенсоры.

### 3.1.2. Цифровые технологии управления движением

---

---

Современные технологии управления движением мехатронных систем базируются на достижениях микроэлектроники и новых информационных технологиях. Аппаратные средства обычно конструктивно встраиваются в мехатронные модули. Технологически это достигается за счет высокой плотности схем, уменьшения монтажных соединений и использования твердотельных элементов.

Аппаратные средства управления включают в себя:

- силовые преобразователи, которые являются связующим звеном между устройством компьютерного управления и исполнительными органами (двигателями);

- цифровые сигнальные процессоры, устанавливаемые в информационно-измерительных каналах для нормирования фильтрации, аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования, оцифровки и кодирования аналоговых сигналов;
- программируемые интегральные микросхемы, позволяющие программно реализовать необходимые управляющие функции – декодирование сигналов, цифровую широтно-импульсную модуляцию, различные математические операции, необходимые для реализации управления;
- контроллеры движения.

В области микроэлектроники основными типами силовых электронных приборов являются силовые полевые транзисторы (*MOS-FET*), биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT*), коммутируемые тиристоры (*GTO*) и интеллектуальные силовые модули (*IPM*). Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (для транзисторов *MOSFET* частота коммутаций до 100 кГц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для транзисторов *IGBT* предельная сила коммутируемого тока до 2400 А, а предельное коммутируемое напряжение до 3300 В), малыми коммутативными потерями и малой мощностью управления.

В мехатронике интеллектуальные модули стали базой для создания новых силовых преобразователей в каналах управления движением, а также защитных и диагностирующих устройств.

В настоящее время ряд фирм INTEL, ANALOG DIVICES, ATMEL, MICROCHIP, TEXAS INSTRUMENTS и другие разработали широкую линейку **цифровых сигнальных процессоров** (*DSP – digital signal processors*). *DSP* – специализированный микропроцессор, предназначенный для цифровой обработки сигналов (обычно в реальном масштабе времени).

Архитектура сигнальных процессоров имеет некоторые важные особенности по сравнению с микропроцессорами настольных компьютеров. Сигнальные процессоры строятся на основе «Гарвардской архитектуры», отличительной особенностью которой является то, что программы и данные хранятся в различных устройствах памяти – памяти программ и памяти данных. Поэтому *DSP* может производить одновременные обращения как к памяти команд, так и к памяти данных в отличие от архитектуры фон Неймана, которая предполагает раздельное обращение к устройствам памяти (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Гарвардская архитектура *DSP*

Лучшие современные *DSP* имеют следующие параметры:

- тактовая частота – 1 ГГц и выше;
- многоядерность;
- наличие двухуровневой кэш-памяти (сверхоперативная буферная память для промежуточного хранения данных);
- встроенные многоканальные контроллеры прямого доступа к памяти;
- выполнение до 8 параллельных инструкций за такт;
- быстродействие порядка нескольких тысяч *MIPS* и *MFLOPS*;
- совместимость со стандартными шинами (*PCI* и др.).

Области применения *DSP*:

- управление динамичными технологическими процессами;
- коммуникационное оборудование;
- анализаторы спектра;
- распознавание речи и изображений;
- речевые и музыкальные синтезаторы;
- системы гидро- и радиолокации;
- другие области, где необходима быстродействующая обработка сигналов (в том числе в реальном времени).

По назначению *DSP* делятся на две группы:

1. *DSP* общего назначения.
2. Проблемно-ориентированные *DSP*.

«Проблемная ориентация» обычно относится к набору встроенных специализированных периферийных устройств. Например, *DSP*, предназначенные для управления электродвигателями, могут содержать на кристалле генераторы сигналов ШИМ, контроллеры локальной промышленной сети и т. д. В цифровых фото- и видеокамерах

применяются DSP с модулями кодирования / декодирования *MP3, JPG, AAC, MPEG1, MPEG4* и др. Среди проблемно-ориентированных *DSP* выделяются гибридные *DSP* – специализированные устройства, сочетающие в себе функцию микроконтроллера и цифрового сигнального процессора. Обычно такие изделия предназначены для выполнения одной функции – например, управления электрическими двигателями или другими объектами в реальном масштабе времени.

Американская компания *Texas Instruments* производила цифровые сигнальные микропроцессоры на двух *DSP* платформах *TMS320C2000* и *TMS320C6000* для встроенных приложений.

Блок-схема архитектуры цифрового сигнального процессора *TMS320F28335* платформа *C2000* приведена на рис. 3.7.

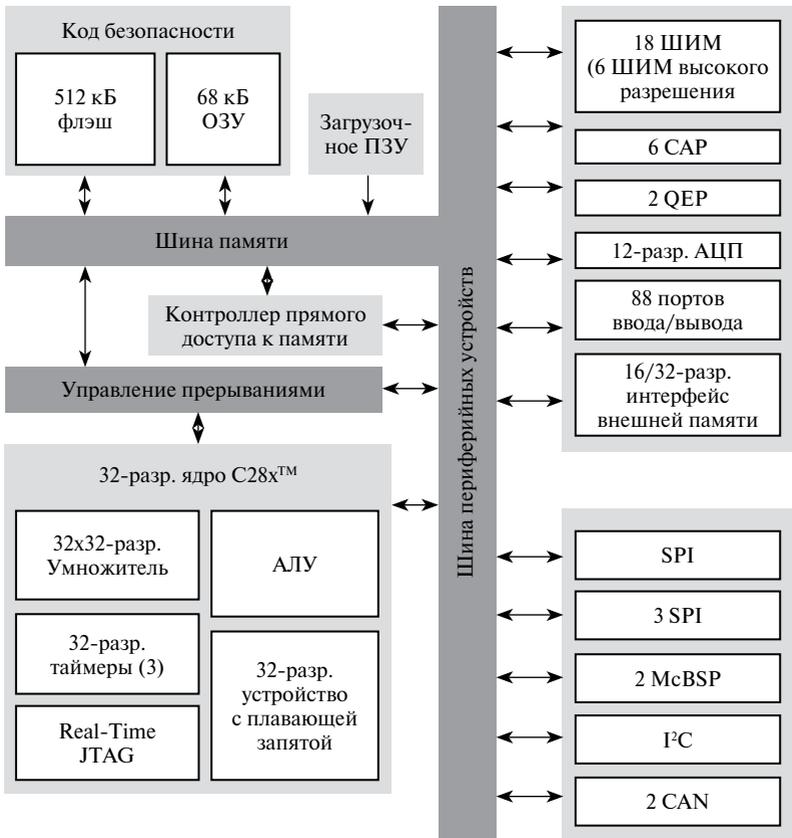


Рис. 3.7. Блок-схема архитектуры *TMS320F28335*

Производительность данного процессора достигает 300 миллионов инструкций с плавающей точкой в секунду (*MFLOPS*) при работе на тактовой частоте 150 МГц. Цифровой сигнальный микропроцессор *TMS320C6201* (платформа *C6000*) на тактовой частоте 200 МГц позволяет развить производительность 1600 миллионов инструкций с фиксированной точкой в секунду (*MIPS*).

**Программируемые вентиляльные матрицы** (*FPGA – Field Programmable Gate Arrays*) представляют собой интегральные микросхемы, обладающие уникальным сочетанием очень высокой производительности (скорость вычислений соизмерима с аппаратными вычислительными средствами) с возможностью программирования как обычных микропроцессорных устройств. На выходе блоков *FPGA* можно сформировать широтно-модулированный сигнал, который имеет цифровое представление.

Микросхема *FPGA* состоит из следующих основных блоков:

- блок ввода-вывода (*БВВ*), осуществляющий соединение внутренней логики кристалла с выводами корпуса микросхемы;
- конфигурируемые логические блоки (*КЛБ*), реализующие логические и регистровые функции;
- блочная память;
- модули управления синхронизацией (*DLL*);
- трассировочные ресурсы для соединения всех элементов.

Программирование микросхем *FPGA* в отличие от традиционных логических микросхем осуществляет пользователь. Для этого применяются специальное программное обеспечение, которое включает в себя: модули текстового и схемного ввода, моделирования, автоматической трассировки, создания и загрузки конфигурационных данных, специальные библиотеки макросов. Разработчик с внешнего устройства имеет возможность многократно загружать проект в микросхему и тестировать ее работу на реальном изделии [1].

В системах управления мехатронными и робототехническими системами преобладают встроенные контроллеры движения, которые технологически реализованы на отдельной плате. Лишь в некоторых случаях используются специализированные аппаратно оформленные сепаративные контроллеры.

На практике широко применяются микроконтроллеры семейства *AVR* фирмы *Atmel*. Это одна из самых популярных в наше время микропроцессорных серий. Микроконтроллеры серии *AVR* относятся к классу восьмиразрядных микроконтроллеров. Это означает, что подавляющее большинство операций процессоры производят с восьми-

разрядными двоичными числами. Все ячейки памяти и большинство регистров микроконтроллера также восьмиразрядные. Исключение составляет память программ, которая состоит из шестнадцатиразрядных ячеек. Микроконтроллеры AVR изготавливаются по КМОП – технологии, благодаря которой они имеют низкий ток потребления. Большинство команд микроконтроллера выполняются за один такт. Быстродействие составляет миллион операций в секунду (MIPS) при тактовой частоте 1 МГц. Программирование микроконтроллера ведется на языках Ассемблер и СИ [10].

Более совершенным является микроконтроллер MSP-430 фирмы Texas Instruments. Система обозначений микроконтроллеров MSP-430 (production code), применяемая Texas Instruments, показана на рис. 3.8 [11].

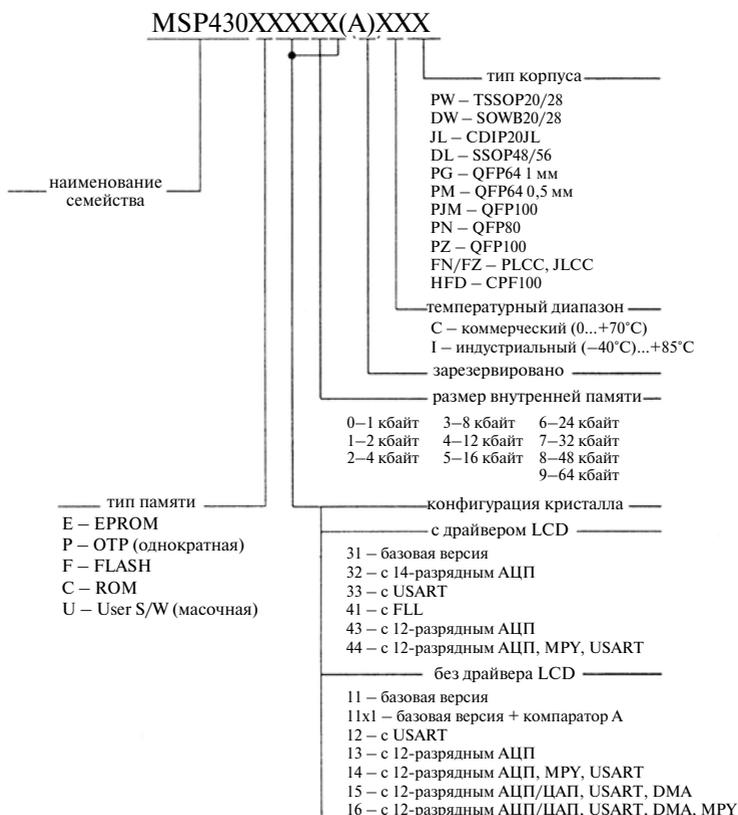


Рис. 3.8. Система обозначений MSP-430

Одно из преимуществ микроконтроллеров *MSP-430* – чрезвычайно простая и освоенная система команд. Предоставленные пользователю средства разработки программного обеспечения позволяют работать как в классическом ассемблеровском коде, так и на языках высокого уровня (например, на СИ). Фирма *Texas Instruments* выпускает отладочные средства (для отладки программ) – так называемые *Starter Kits* (стартовые наборы), в комплект которых входят: печатная плата с установленным микроконтроллером, ЖКИ-индикатор, кнопки, контактные разъемы для подключения других электронных компонентов. Еще одно направление отладочных средств – эмуляторы (программа или микросхема, позволяющая осуществить эмуляцию – точное выполнение микроконтроллером программы, записанной в системе другой ЭВМ).

Структура кристалла из «линейки» *MSP-430* показана на рис. 3.9. Архитектура *MSP-430* является дальнейшим развитием известной архитектуры ЭВМ *PDPI 1*, ныне ставшей достоянием истории. Буква «F» в обозначении на рис. 3.9 говорит о том, что микроконтроллер имеет встроенную внутреннюю *flash*-память (рис. 3.8), которая может быть электрически многократно перепрограммирована.

Структура *MSP-430* использует 16-битную упрощенную организацию системы команд *RISC*-типа (*Reduced Instruction Set Computer*), которая может производить операции не только над байтами, но и над словами (напомним, что машинное слово состоит из двух байт). Центральный процессор (*CPU*) идентичен для всех представителей семейства и состоит из трехступенчатого конвейера инструкций, 16-разрядного арифметик-логического (*ALU*) устройства, 16 внутренних регистров (четыре из которых используют в качестве счетчика команд – *PC*, указателя стека – *SP*, регистра состояния – *SR*, генератора констант – *CG*). Счетчик команд предназначен для фиксации текущего адреса исполняемой команды, указатель стека хранит данные о так называемой стековой памяти, регистр состояния сохраняет результаты выполнения команд, генератор констант формирует наиболее часто используемые целые числа. Остальные 12 регистров используются по усмотрению пользователя. *ALU* выполняет простейшие арифметические действия (сложение, вычитание, сравнение) и логические операции («и», «или», «исключающие «ИЛИ»»). В состав некоторых модификаций *MSP-430* входит 16-разрядный аппаратный множитель, осуществляющий аппаратное умножение (не в *ALU*). Умножать можно как комбинации 16-разрядных чисел, так и комбинации 8-разрядных и 16-разрядных чисел. При этом поддержива-

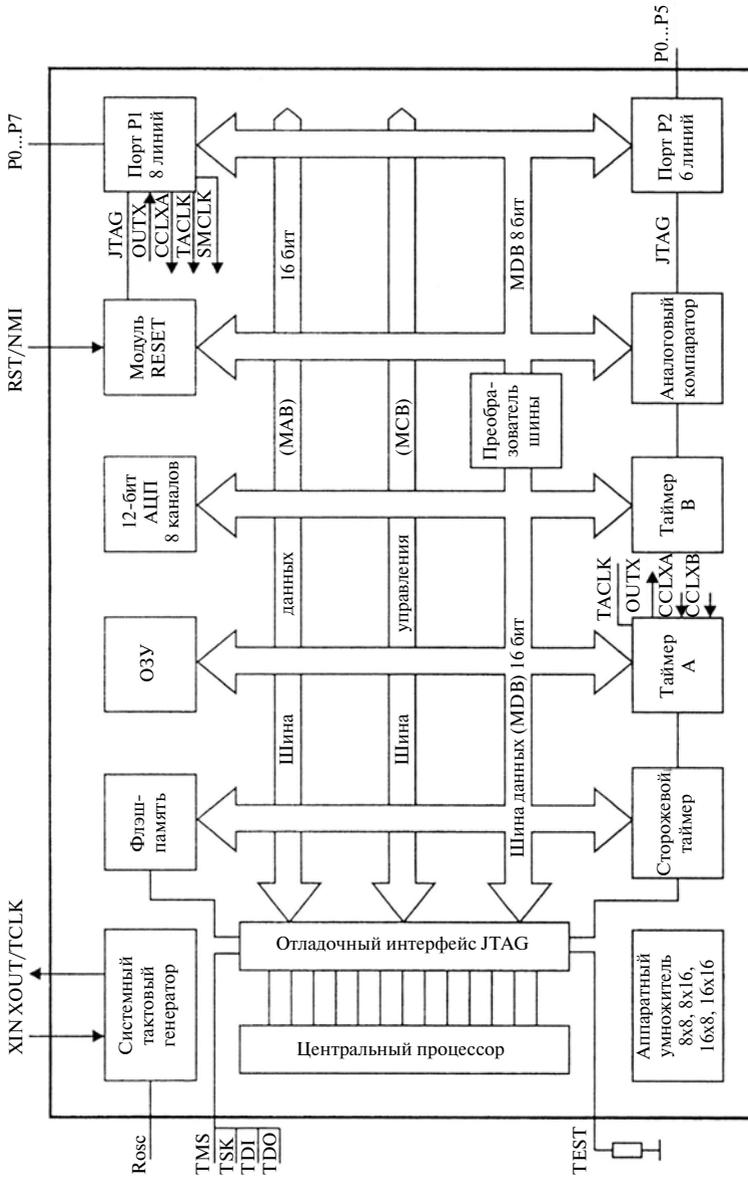


Рис. 3.9. Структура микроконтроллера MSP-430 Fxxx

ется умножение со знаком (*MPYS*) и беззнаковое умножение (*MPY*), знаковое умножение с накопителем (*MACS*) и беззнаковое умножение с накопителем (*MAC*).

Микроконтроллер *MSP-430* позволяет совмещать в одном адресном пространстве память программ, память данных и регистров периферийных устройств. Это означает, что одни и те же команды могут быть использованы как для работы с памятью, так и с периферийными устройствами.

Общение с «внешним миром» у микропроцессоров происходит с помощью портов ввода-вывода (порты *P1* и *P2* на рис. 3.9). Разные модификации семейства *MSP-430* имеют разное количество портов.

Микроконтроллеры серии *MSP-430* имеют в своем составе один или два универсальных таймера (*A* и *B*), сигналы которых используются в программах для прерывания или начала некоторых запрограммированных действий, например, таймер *A* позволяет формировать широтно-модулированный (ШИМ) сигнал.

Обязательным периферийным устройством сегодня является сторожевой таймер (*WDT*), который может спасти устройство от «зависания» микроконтроллера.

Традиционным периферийным устройством также считается аналоговый компаратор для сравнения различных величин с эталоном. Когда сигнал на выходе компаратора меняет свое значение, микроконтроллер опознает прерывание с соответствующим вектором системных данных для обработки *JTAG*. Этот интерфейс имеется на всех микроконтроллерах *MSP-430* и состоит из четырех сигнальных линий (*TMS*, *TCK*, *TDI*, *TDO*), пятая линия *TEST* включает *JTAG*-интерфейс подачей на соответствующий выход микросхемы логической единицы. Для доступа к *JTAG*-интерфейсу обычно используются линии порта 1.

Обмен по *JTAG*-интерфейсу осуществляется с помощью макросов доступа. После расстановки соответствующим образом данных в макросе он превращается в коммуникационную инструкцию (*JTAG communication instruction*) для работы с *flash*-памятью. Для передачи инструкций действуют три шины: шина адресов памяти (*MAB* – *memory address bus*), шина данных памяти (*MDB* – *memory data bus*) и шина управления контроллером (*MCB* – *memory control bus*) (рис. 3.9).

Более подробно устройство, работа и применение микроконтроллера серии *MSP-430* будут рассмотрены в курсе «Микропроцессорная техника». Микропроцессоры фирмы *Analog Devices* и микроконтроллеры фирмы *Googol Technology* рассмотрены в работе [1].

### 3.1.3. Технологии автоматизированного проектирования

---

---

Проектирование технического объекта – это процедура создания, преобразования и представления в принятой форме образца, еще не существующего объекта. Проектирование предполагает выполнение комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характера.

Проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека с ЭВМ, называется автоматизированным. Система, реализующая автоматизированное управление, представляет собой систему автоматизированного проектирования – САПР (*CAD – Computer Aided Design*). Технологии, которые используются при разработке САПР (*CAD*), называются технологиями автоматизированного проектирования.

Современные САПР, обеспечивающие сквозное проектирование (от конструкторской разработки до реализации производства изделия в промышленных условиях) сложных изделий, имеют многомодульную структуру. Модули различаются своей ориентацией на те или иные проектные задачи применительно к тем или иным типам устройств и конструкций. При этом возникают естественные проблемы, связанные с построением общих баз данных, с выбором протоколов, форматов данных и интерфейсов разнородных подсистем, с организацией совместного использования модулей при групповой работе. Эти проблемы усугубляются на предприятиях, производящих сложные изделия, в частности, с механическими и электронными подсистемами, поскольку САПР машиностроения и радиоэлектроники до недавнего времени развивались самостоятельно, в отрыве друг от друга [12, 13, 14]. В связи с этим стало очевидно, что эффективность автоматизации проектирования будет заметно выше, если данные генерируемые в одной из подсистем будут доступны в других подсистемах проектирования, поскольку принимаемые в них решения станут более обоснованными. Для достижения должного уровня взаимодействия систем требуется создание единого информационного пространства для всех участников процесса проектирования на основе *CALS*-технологии.

В настоящее время термин *CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support)* переводится как «непрерывное сопровождение и информационная поддержка всех этапов жизненного цикла изделий (ЖЦ)». Первая часть термина *CALS (Continuous Acquisition)* подчеркивает постоянное развитие, которое претерпевает как само изделие в течение

своего ЖЦ, так и процесс взаимодействия между потребителем и поставщиком. Вторая часть (*Life Cycle Support*) означает оптимизацию затрат на создание и эксплуатацию изделия на протяжении всего ЖЦ. Это чаще всего выливается в увеличение затрат на стадии создания изделия и их снижение на этапах эксплуатации, ремонта и обслуживания изделия (в целом на всем ЖЦ приводит к снижению стоимости и повышению конкурентоспособности изделия).

**Стратегия CALS** предполагает создание единого информационного пространства (ЕИП) для всех участников ЖЦ изделия. ЕИП предполагает представление всей информации об изделии в электронном виде и организацию совместного использования информации для всех участников ЖЦ изделия (в соответствии с правилами доступа) [12].

Главная задача создания и внедрения *CALS*-технологий – обеспечение единообразных описаний и интерпретации данных независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделенных во времени и пространстве и применяющих разные системы *CAE / CAD / CAM*. Одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация – адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства. Кроме того, упрощается эксплуатация систем.

*CALS*-технологии не отвергают существующие автоматизированные системы проектирования и управления, а являются средством их эффективного взаимодействия. Поэтому интеграция автоматизированных систем на современных предприятиях должна быть основана на *CALS*-технологиях. Внедрение их требует освоения имеющихся технологий и *CALS*-стандартов, развития моделей, методов и программ автоматизированного проектирования и управления. Важные проблемы, требующие решения при создании *CALS*-систем – управление сложностью проектов и интеграция программного обеспечения, включая вопросы декомпозиции проектов, распараллеливания проектных работ, целостности данных, межпрограммных интерфейсов и др.

*CALS*-технологии зародились в 1980-е годы в недрах военно-промышленного комплекса США в связи с их планами в области стра-

тегической оборонной инициативы (СОИ). Поэтому неудивительно, что среди имеющихся *CALS*-стандартов фигурирует большое число стандартов и рекомендаций *DoD* (Министерства обороны США). Для реализации планов СОИ требовались совместные усилия многих промышленных компаний и предприятий в проектировании, производстве и логистической поддержке сложных изделий, а это означало необходимость унификации представления данных об изделиях. Было осознано, что для взаимодействия автоматизированных систем разных предприятий нужна унификация не только формы, но и содержания (семантики) проектной, технологической, эксплуатационной и другой информации о совместно производимой продукции. Другими словами, требовалось создание единой информационной среды взаимодействия всех крупнейших фирм американского военно-промышленного комплекса.

Оказалось, что это чрезвычайно сложная проблема, решение которой требует длительной и многосторонней проработки в масштабах, выходящих за пределы одной страны. Выяснилось также, что создание единой информационной среды требуется не только для уникальных программ типа СОИ, но и для производства любых сложных систем, в первую очередь военной техники, если ее производство основано на взаимодействии многих предприятий.

В 1990-х годах разработан и к настоящему времени принят ряд серий международных стандартов, представляющих *CALS*-технологии, среди которых наиболее значимы стандарты *ISO 10303 STEP (Standard for Exchange of Product Data)*. В контрактах, заключаемых на поставку зарубежным заказчикам военной техники, требования к изделиям и документации на них, как правило, формулируются с позиций международных *CALS*-стандартов и стандартов *DoD* (последние имеют префикс *MIL*).

Развитие *CALS*-технологий стимулирует образование виртуальных производств, при которых процесс создания спецификаций с информацией для программно управляемого технологического оборудования, достаточной для изготовления изделия, может быть распределен во времени и пространстве между многими организационно автономными проектными организациями.

Ожидается, что успех на рынках сложной технической продукции будет немислим вне *CALS*-технологий. Так, уже сегодня фирмы, предлагающие военную технику без электронной документации, выполненной в соответствии с *CALS*-стандартами, не имеют никаких шансов на успех в конкурентной борьбе.

Итак, *CALS*-технологии призваны, в конечном счете, повысить эффективность создания и использования сложной техники (в том числе мехатронных систем). В чем выражается повышение эффективности?

Во-первых, улучшается качество изделий за счет более плотного учета имеющейся информации при проектировании и принятии управленческих решений. Так, обоснованность решений, принимаемых в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП), будет выше, если лицо, принимающее решение, и соответствующие программы АСУП имеют оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к базам данных других автоматизированных систем – системам автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированной системе технологической подготовки производства (АСТПП) и автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУТП), и, следовательно, могут оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т. п. Под оперативным доступом необходимо понимать не просто возможность считывания данных из баз данных, но и легкость их правильной интерпретации, т. е. согласованность по синтаксису и семантике с протоколами, принятыми в АСУП. То же относится и к другим системам, например, технологические подсистемы должны с необходимостью воспринимать и правильно интерпретировать данные, поступающие от подсистем автоматизированного конструирования. Последнего не так легко добиться, если основное предприятие и организации-смежники работают с разными автоматизированными системами.

Во-вторых, сокращаются материальные и временные затраты на проектирование и изготовление изделий. Применение *CALS*-технологий позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания ранее выполненных удачных разработок компонентов и устройств, многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю *CALS*-технологий. Доступность опять же обеспечивается согласованностью форматов, способов, руководств в разных частях общей интегрированной системы. Кроме того, появляются более широкие возможности для специализации предприятий, вплоть до создания виртуальных предприятий, что также способствует снижению затрат.

В-третьих, значительно снижаются затраты на эксплуатацию благодаря реализации функций интегрирования логистической поддер-

ки. Существенно облегчается решение проблем ремонтпригодности, интеграции продукции в различного рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации и т. п.

Выше было отмечено, что для реализации *CALS*-технологий необходимо обеспечить единообразное описание и интерпретацию данных, независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Это единообразие достигается за счет разработки системы *CALS*-стандартов, созданных под эгидой *ISO (International Standard Organization)* – международной организации стандартизации. Центральное место в системе *CALS*-стандартов занимает *ISO 10303* под названием *STEP (Standard for Exchange of Product Data)* – стандарт для обмена данными о промышленных изделиях), определяющий средства описания (моделирования) промышленных изделий на всех стадиях их ЖЦ. Для этого был разработан инвариантный к приложениям язык *Express*, введенный в *STEP*. Совокупность стандартов *STEP* составляет основу *CALS*-технологий.

*STEP* – это совокупность стандартов, состоящих из нескольких томов. Тома имеют свои номера № и обозначаются как «часть №» или *ISO 10303-№*. К настоящему времени разработано более сотни томов. Стандарты *ISO 10303* определяют средства описания (моделирования) промышленных изделий на всех этапах их ЖЦ.

**Том 1 (*ISO 10303-1*)** – вводный стандарт, выполняющий роль аннотаций всей совокупности томов. В этом стандарте вводится ряд терминов, используемых в других стандартах, например, таких как продукт (*product*), приложение (*application*), проектные данные (*product data*), модель (*model*), модели *AAM, AIM, ARM*, прикладной протокол (*AP*), интегрированный ресурс (*integrated resource*), элемент функциональности (*unit of functionality – UoF*).

**Тома 11–14** – методы описания (*description methods*).

**Тома 21–29** – методы реализации (*implementation methods*).

**Тома 31–35** – основы тестирования моделей (*conformance testing methodology and framework*).

**Тома 41–50** – интегрированные основные ресурсы (*integrated generic resources*).

**Тома 101–108** – интегрированные прикладные ресурсы (*integrated application resources*).

**Тома 201–236** – прикладные протоколы (*application protocols*).

**Тома 301–332** – абстрактные тестовые наборы (*abstract test suites*).

**Тома 501–520** – прикладные компоненты (*application interpreted constructs*).

Ряд томов переведен на русский язык и представлен в виде национальных стандартов России. Это, например, ГОСТ Р ИСО 10303-1-99, посвященный обзору и основополагающим принципам *STEP*, ГОСТ Р ИСО 10303-11-99 – справочное руководство по языку *Express*, ГОСТ Р ИСО 10303-21-99 – то же по обменному файлу, ГОСТ Р ИСО 10303-41-99 – описание интегрированных родовых ресурсов. Перечисленные документы соответствуют стандартам *ISO 10303-1*, *ISO 10303-11*, *ISO 10303-21*, *ISO 10303-41*. Подготовлены к утверждению ГОСТы, соответствующие томам 43, 44, 203 стандарта *ISO 10303*.

Таким образом, в томах *STEP* описаны основные принципы обмена данными, изложены правила языка *Express*, даны методы его реализации, а также модели, методы тестирования моделей, ресурсы как общие для приложений, так и некоторые специальные (например, геометрические и топологические модели, описание материалов, процедуры черчения, конечно-элементного анализа и т. п.), введены прикладные протоколы, отражающие специфику моделей в конкретных предметных областях. Вопросам взаимодействия АС в *STEP* уделяется основное внимание – выделена подгруппа томов, посвященных способам обмена данными между разными системами, созданными в рамках *STEP*-технологий.

Информационные обмены возможны через обменный файл и через базу данных *SDAI* (*Standard Data Access Interface*) – интерфейс к данным, представленным в соответствии с *CALS*-стандартами.

Обменный файл используется при связи моделей *A* и *B*, имеющих общие данные с различными обозначениями. Пользователь должен написать перекодировщик (например, на языке *Express-X*), с помощью которого отождествляются идентификаторы одних и тех же сущностей, имевших разные обозначения в моделях *A* и *B* (рис. 3.10).

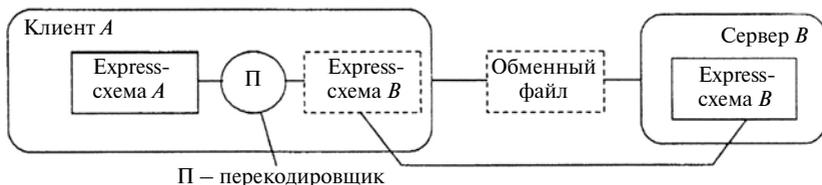


Рис. 3.10. Взаимодействие *Express*-приложений через обменный файл

Связь через интерфейс *SDAI* отличается от предыдущего способа обмена тем, что в *SDAI* имеет место не просто обмен, а разделение данных многими пользователями, и *SDAI* фактически выступает

в роли метамодели для разных САПР. Другими словами, *SDAI* представляет собой интерфейс, содержащий набор функций на языках C++ и C, для доступа к разделяемым моделям, которые могут быть представлены в виде обменного файла (рис. 3.11).

В *CALS*-технологиях рассматриваются не только вопросы представления данных и организации информационных обменов, но и вопросы моделирования приложений и проектирования сложных систем на базе концептуального проектирования.

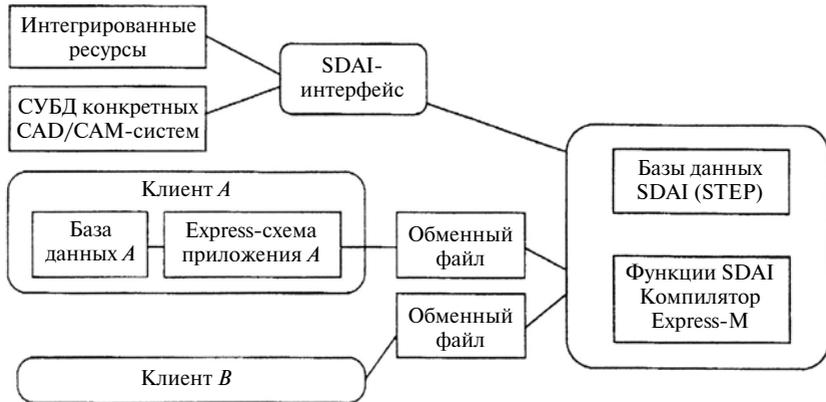


Рис. 3.11. Взаимодействие *Express*-приложений через базу данных *SDAI*

В заключение лекции отметим, что качество мехатронных систем в решающей степени зависит от применяемых мехатронных технологий, в основе которых лежат производственные, технологические и информационные процессы и их интеграция.

## Лекция 4

# Современные мехатронные и робототехнические модули и системы

---

---

Целевой задачей мехатроники и робототехники является создание качественно новых модулей и систем. Машины и системы нового поколения должны отвечать таким общим критериям, как отношение цена / качество, высокая надежность и безопасность функционирования, гибкость и быстрая реконфигурация в новых условиях, степень интеллектуализации эргатических систем управления.

### 4.1. Современные требования к мехатронным и робототехническим модулям и системам

---

---

В настоящее время происходит *мехатронизация техносферы* – решительный поворот развития производственной и бытовой техносферы в направлении все более широкого внедрения мехатронных и робототехнических систем, построенных с использованием мехатронных технологий.

Кроме того, можно констатировать, что происходит расширение классической механической парадигмы мехатроники, связанное с переходом от компьютерного управления механическими процессами к компьютерному управлению физическими процессами. Этот этап развития мехатроники отражает эволюцию взаимосвязей различных форм движущейся материи – переход от наиболее простых, механических, к более сложным, физическим, формам движения материи [2].

Отмеченные выше тенденции развития мехатроники могут быть реализованы только при условии выполнения новых современных требований к функциональным и структурно-конструктивным пока-

зателям мехатронных и робототехнических модулей и систем. Эти требования носят стратегический, тактический и прикладной характер.

К *стратегическим требованиям* можно отнести [8]:

- создание саморазвивающихся (самоусовершенствующихся) мехатронных, робототехнических и физико-технических систем различного назначения;
- развитие интеллектуальных систем в направлении технического освоения творческих способностей человека.

Выполнение стратегических требований в свою очередь базируется (определяется) на реализации *тактических требований*, к числу которых следует отнести:

- развитие систем с переменной структурой;
- разработка алгоритмов самоорганизации системы в процессе ее самоусовершенствования аналогичных эволюционному развитию живой природы;
- дополнительное развитие формальных методов искусственного интеллекта.

Изменение структуры систем может иметь одну из трех целей: расширение адаптивных и функциональных возможностей и совершенствование систем в процессе эксплуатации. Структурные изменения можно реализовать путем построения мехатронных систем из функциональных оперативно изменяющихся модулей, адекватно меняющейся обстановке и решаемым задачам. Структурные изменения могут быть и чисто информационными (алгоритмическими) без изменения материальной части системы.

Разработка алгоритмов самоусовершенствования (включая алгоритмы обучения, предусматривающие, в том числе и «обучение с учителем» под руководством человека), построение функционально гибких структурных схем – путь эволюционного развития мехатронных систем, подобный эволюционному развитию живой природы.

Дополнительное развитие формальных методов искусственного интеллекта, которые имитируют вербальное (логическое) мышление человека, пойдет по пути технического воспроизведения интуитивных способностей человека, основанных, прежде всего, на образном мышлении. Психологи и крупнейшие ученые в области информатики утверждают, что сознательное вербальное мышление человека составляет не более 10 % его мыслительной деятельности, а основной ее объем является подсознательным и в большей части образным [8]. Этим, по-видимому, объясняется известный парадокс – почему, чем сложнее задача, тем меньше человек полагается на логику и больше на

«здравый смысл», на интуицию, которая основана на образном мышлении, на визуализации задачи? Оказывается, логическое формализованное мышление связывает воображение, мешает ассоциативно-му поиску решения творческих задач.

И, наконец, *прикладные требования* к функциональным и структурно-конструктивным показателям мехатронных и робототехнических модулей и машин в значительной степени определяются уровнем и возможностями современной науки и техники.

Симбиоз имеющегося научного задела в мехатронике и реальных потребностях производства позволяет сформулировать современные прикладные требования к создаваемым в настоящее время мехатронным модулям, машинам и системам:

- выполнение машинами и системами качественно новых служебных и функциональных задач [1];
- интегрированные приводы;
- ультрапрецизионные микроэлектромеханические системы (MEMS) (в частности, микророботы);
- новые кинематические структуры и конструктивные компоновки многокоординатных машин [1];
- многофункциональные металлообрабатывающие центры;
- интеллектуальные мехатронные и робототехнические системы;
- дистанционное управление мобильными мехатронными системами.

#### 4.1.1. Новые служебные и функциональные задачи мехатронных и робототехнических систем

---

---

Характерным примером выполнения мехатронной системой новых служебных функций служит система группового управления в распределенных системах [15].

Проблемы группового управления группой объектов, объединенных одной целью, актуальны для многих сфер. В принципе любая распределенная система, состоящая из отдельных элементов, сталкивается с проблемой группового управления, т. е. с проблемой управления взаимодействием отдельных ее частей для оптимального решения задачи, поставленной перед системой в целом.

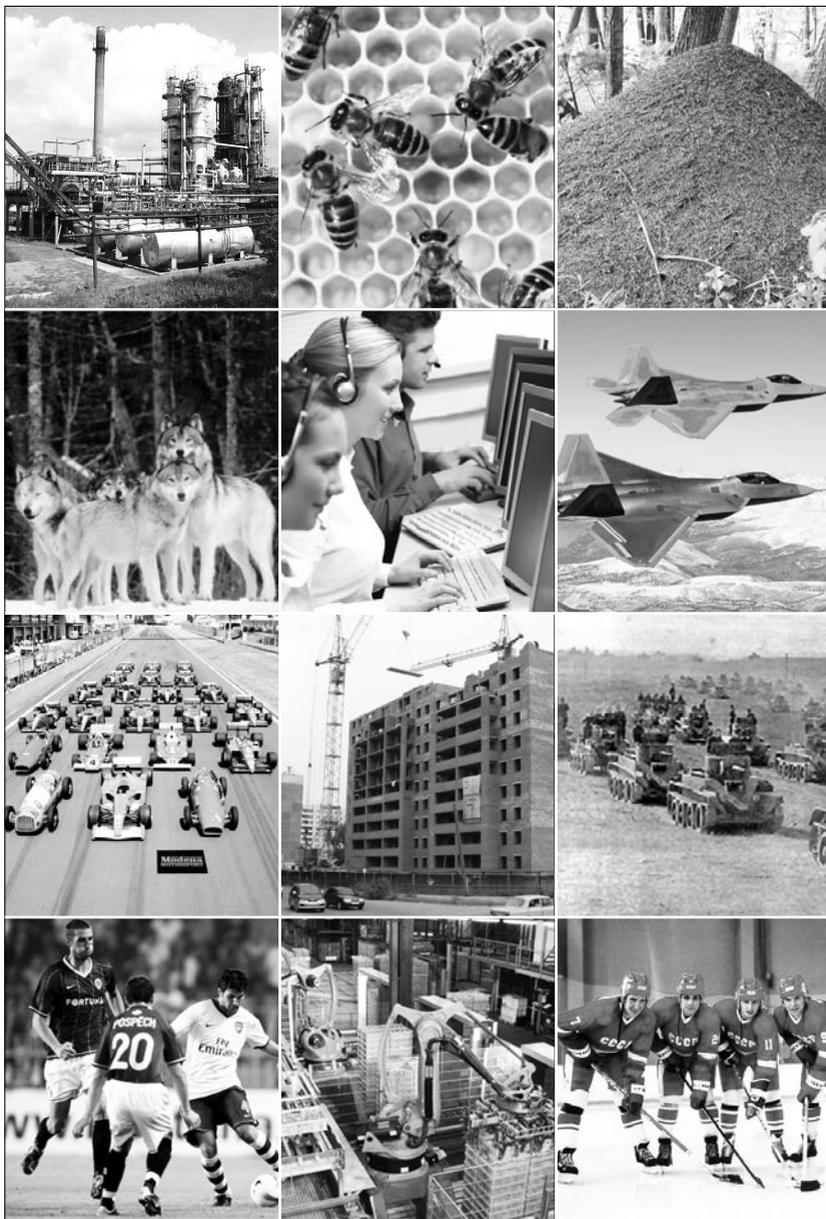


Рис. 4.1. Примеры задач группового управления в распределенных системах

Различные стратегии группового управления показаны на рис. 4.2.

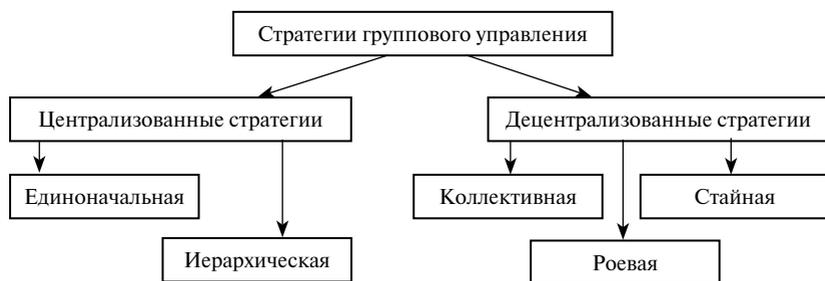


Рис. 4.2. Стратегии группового управления

Централизованная единоличная стратегия группового управления предполагает наличие центрального устройства управления (ЦУУ) – командира, принимающего единоличные решения.

Центральная иерархическая стратегия группового управления допускает несколько ЦУУ различного уровня: ЦУУ 1 – первого уровня и ЦУУ 2М – второго уровня, где  $M \geq 1$  (одного или более ЦУУ второго уровня).

Децентрализованная коллективная стратегия подразумевает отсутствие у группы центрального устройства управления (командира), но в то же время наличие некоторого канала обмена информацией между объектами группы, с помощью которого отдельные объекты могут координировать и оптимизировать свои действия для достижения общей цели.

Роевая стратегия наиболее эффективно может быть использована при управлении массовыми группами объектов, например, «облаками» микророботов. Данная стратегия подразумевает наличие у каждого отдельного объекта роя ограниченного набора простейших действий, а также ограниченной зоны обмена информацией с ближайшими объектами, входящими в состав роя.

В отличие от коллективной и роевой стратегий группового управления стайная стратегия подразумевает отсутствие не только командира в группе объектов, но и какого-либо прямого канала связи между ними. При этом объекты, входящие в группу, могут получать только опосредованную информацию о действиях других объектов группы путем анализа изменений, происходящих в среде.

Формальную постановку задачи группового управления распределенной системой можно сформулировать следующим образом. Пусть

некоторая распределенная система  $R$ , состоящая из  $n$  подсистем (объектов)  $R_i (i = \overline{1, n})$  функционирует в среде  $E$ , причем каждый объект  $R_i$  может выполнять некоторый набор действий  $A_i = \langle a^i_1, a^i_2, \dots, a^i_m \rangle$ . Набор действий всех объектов  $R_i \in R (i = \overline{1, n})$  обозначим вектором  $A = \langle A_1, A_2, \dots, A_n \rangle$ . В результате выполнения действий объектами  $R_i (i = \overline{1, n})$  изменяются состояния как самой системы  $R$ , так и среды  $E$ , т. е.

$$\begin{aligned} \dot{R} &= f_1(A, R, E), \\ \dot{E} &= f_2(A, R, E). \end{aligned} \quad (4.1)$$

Причем на состояние системы  $R$  и среды  $E$ , а также на действие объектов  $R_i (i = \overline{1, n})$  в той или иной ситуации налагаются ограничения вида

$$\begin{aligned} \varphi(A, R, E) &\leq 0, \\ \psi(A, R, E) &\leq 0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Состояние каждого объекта  $R_i \in R (i = \overline{1, n})$  в момент времени  $t$  описывается вектор-функцией  $r_i(t) = [r_{i,1}(t), r_{i,2}(t), \dots, r_{i,h}(t)]^T$  ( $h$  – число параметров состояния  $i$ -го объекта). Состояние группы объектов задается вектором  $R(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_n(t)]^T$ . Состояние среды вокруг  $i$ -го объекта в момент времени  $t$  описывается вектором  $e_i(t) = [e_{i,1}(t), e_{i,2}(t), \dots, e_{i,w}(t)]^T$  ( $w$  – число параметров состояния среды вокруг  $i$ -го объекта). Тогда состояние среды, в которой функционируют объекты рассматриваемой группы, при условии стационарности среды, в момент времени  $t$  описывается вектором

$$E(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)]^T.$$

Объекты и среда, взаимодействуя друг с другом, образуют систему «группа объектов – среда», под состоянием которой в момент времени  $t$  понимают состояние, описываемое парой  $S_c = \langle R, E \rangle$ . Множество различных состояний системы «группа объектов – среда» описывается точками  $n(h + w)$ -мерного пространства состояний  $\{S_c\}$ . Под начальным и целевым (конечным) состояниями системы понимают состояния  $S_o = \langle R_o, E_o \rangle$ ,  $S_k = \langle R_k, E_k \rangle$  соответственно. Необходимо определить такие действия  $A_i (i = \overline{1, n})$  всех объектов  $R_i (i = \overline{1, n})$ , входящих в систему  $R$ , в результате выполнения которых исходная (начальная) ситуация  $S_o = \langle R_o, E_o \rangle$  преобразуется в целевую (конечную) ситуацию  $S_k = \langle R_k, E_k \rangle$ , а также достигается экстремум некоторого функционала качества

$$Y = F(A_1, \dots, A_n, R, E). \quad (4.3)$$

Продолжим рассмотрение стратегий группового управления. Централизованная единоначальная стратегия группового управления приведена на рис. 4.3.

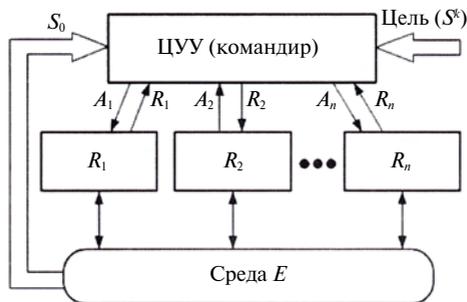


Рис. 4.3. Централизованная единоначальная стратегия группового управления

**Преимущества:**

- простота организации и соответственно алгоритмизации процедур группового управления;
- высокое качество решения задачи группового управления.

**Недостатки:**

- низкая живучесть системы;
- длительное время решений задачи группового управления.

Централизованная иерархическая стратегия группового управления приведена на рис. 4.4.

**Преимущества:**

- снижение времени решения задачи группового управления;
- возможность управления большим числом объектов;
- более высокая живучесть.

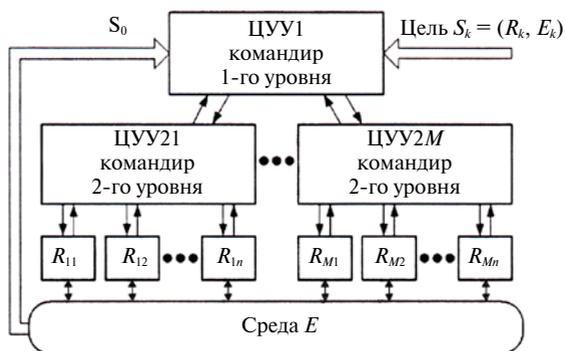


Рис. 4.4. Централизованная иерархическая стратегия группового управления

**Недостатки:**

- большая временная задержка и возможность искажений при передаче команд управления от верхнего уровня к нижнему;
- снижение качества решения задачи группового управления.

Децентрализованная коллективная стратегия группового управления приведена на рис. 4.5.

**Принципы управления:**

1. Каждый объект  $R_i (i = \overline{1, n}) \in R$  имеет полную модель взаимодействия со всеми другими членами группы и средой (4.1), а также информационный канал связи со всеми другими членами группы.

2. На основании модели (4.1) объект  $R_i \in R$  выбирает такое действие  $A_i^T$ , которое направлено на преобразование текущей ситуации  $S_0$  в целевую  $S_k$  и дает при этом экстремальное приращение функционалу  $Y$  (4.3) при фиксированных действиях и состояниях других членов группы и среды.

3. Если ни одно из возможных действий объекта  $R_i \in R$  не дает приращения функционалу  $Y$ , то объект переходит к исполнению ранее выбранного действия  $A_i^T$ .

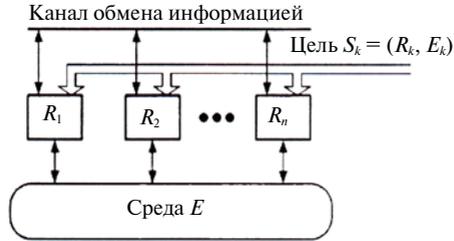


Рис. 4.5. Децентрализованная коллективная стратегия группового управления

4. В противном случае информация о новом выбранном действии  $A_i^T$  объекта  $R_i (i = 1, n)$  сообщается всем остальным членам группы, после чего объект переходит к п. 2.

**Преимущества:**

- малое время принятия решения задачи группового управления;
- повышенная живучесть.

**Недостатки:**

- невысокое качество решения задачи группового управления;
- высокие требования к надежности информационного канала связи.

Примеры программных моделей, использующих коллективную стратегию группового управления, приведены на рис. 4.6, 4.7, 4.8.

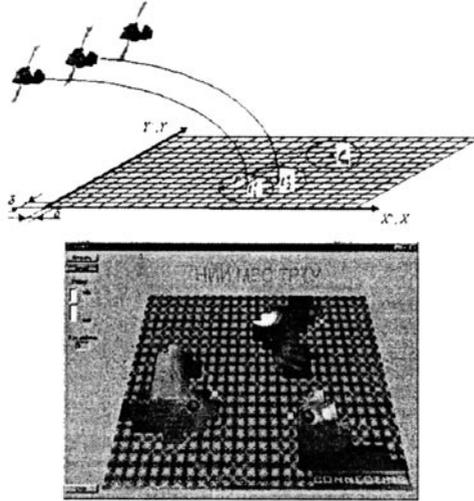


Рис. 4.6. Дистанционное зондирование поверхности группой БПЛА

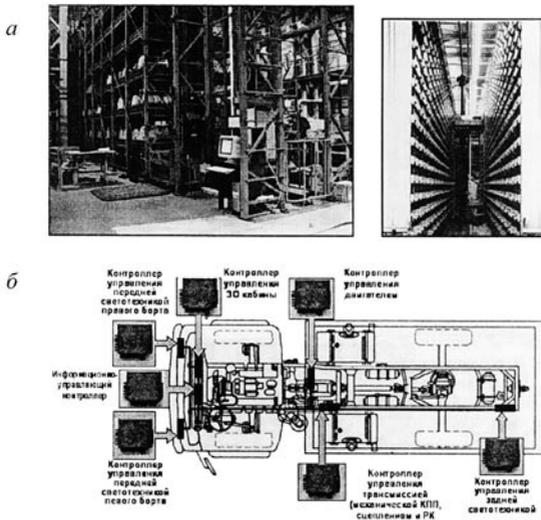


Рис. 4.7. Распределенные системы, использующие стратегию группового управления: *а* – система коллективного управления группой складских роботов-штабелеров; *б* – распределенная мультиплексная система управления автомобилем на базе унифицированных бортовых контроллеров

Децентрализованная роевая стратегия группового управления изображена на рис. 4.8.

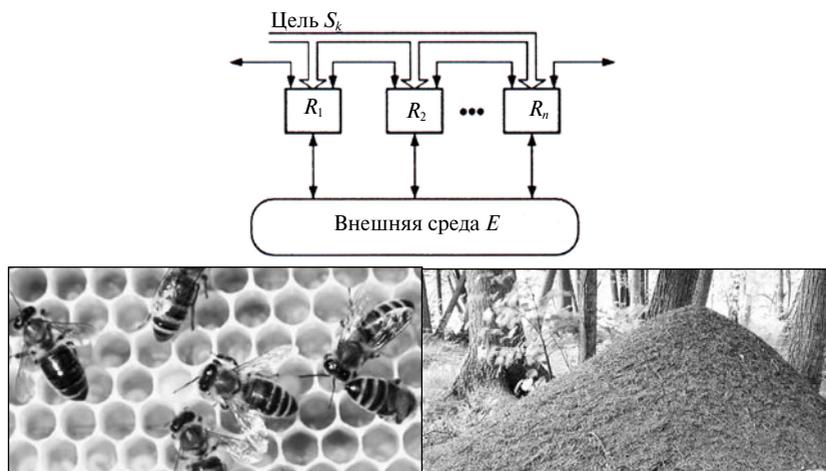


Рис. 4.8. Децентрализованная роевая стратегия группового управления

### Принципы управления:

1. Каждый объект  $R_i \in R$  обладает моделью взаимодействия с ограниченным подмножеством объектов  $R_B^i \leq R$  и средой (4.1) и информационным каналом связи с ограниченным подмножеством объектов  $R_B^i \leq R$ .

2. На основании модели (4.1) объект  $R_i \in R$  выбирает такое свое действие, которое при фиксированных действиях других объектов подмножества  $R_B^i \leq R$  направлено на достижение целевой ситуации  $S_k$  и дает экстремальное приращение функционалу  $Y$ .

3. Осуществляется итерационная оптимизация групповых действий в подмножестве  $R_B^i$  до тех пор, пока никакие новые действия объектов  $R_i$  не дают приращения функционалу  $Y$ .

### Преимущества:

- высокая живучесть;
- малое время принятия решения задачи группового управления;
- возможность управления массово-применяемыми объектами.

### Недостатки:

- невысокое качество решения группового управления;
- невысокая скорость реакции на внешние объекты.

Пример программной модели, использующей роевую стратегию группового управления, приведен на рис. 4.9.

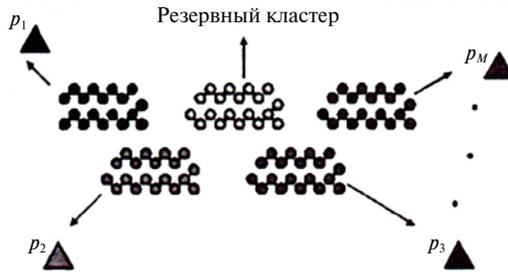


Рис. 4.9. Роевая стратегия группового управления

Децентрализованная стайная стратегия группового управления дана на рис. 4.10.

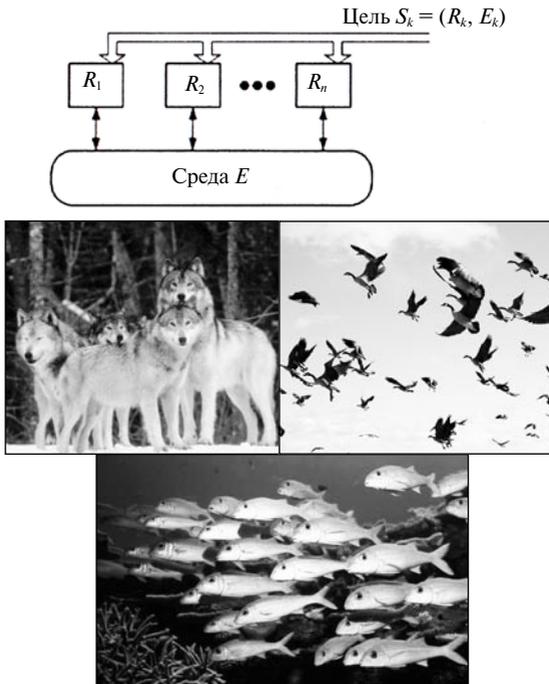


Рис. 4.10. Децентрализованная стайная стратегия группового управления

### **Принципы управления:**

1. Каждый объект  $R_i \in R$  имеет свою индивидуальную модель взаимодействия со средой

$$\begin{aligned}\dot{R}_i &= f_1^i(A_i, R_i, E_i), \\ \dot{E}_i &= f_1^i(A_i, R_i, E_i),\end{aligned}\tag{4.4}$$

причем какая-либо прямая информационная связь между объектом  $R_i$  и другими объектами множества  $R$  отсутствует.

2. На основании модели (4.4) объект  $R_i \in R$  выбирает такое свое действие  $A_i^T$ , которое при фиксированных действиях других объектов подмножества направлено на достижение целевой ситуации  $S_k$  и дает экстремальное приращение функционалу  $Y$ .

3. После выполнения действий  $A_i^T$  объект  $R_i$  сравнивает ожидаемую согласно модели (4.4) ситуацию в среде  $S_{ож}$  с реальной ситуацией  $S_p$  и на основании разницы между ними осуществляет коррекцию модели (4.4).

#### **Преимущества:**

- малое время принятия решения задачи группового управления;
- максимальная живучесть.

#### **Недостатки:**

- низкое качество решения;
- длительное время адаптации к изменениям, происходящим в группе.

Программная модель стайной стратегии группового управления показана на рис. 4.11.

Качественное сравнение различных стратегий группового управления лучше всего осуществлять с точки зрения минимизации времени группового решения задачи, а также живучести распределенной системы и качества решения задачи.

Результаты сравнительного анализа различных стратегий группового управления приведены на рис 4.12.

В заключение этого раздела рассмотрим примеры группового управления промышленными роботами [16].

Проблема группового управления роботами возникла практически сразу, как только первые роботы появились на производственных предприятиях. Действительно, применение роботов эффективно только в случае, если их много и они выполняют, по крайней мере, большинство технологических операций. При этом они должны ра-

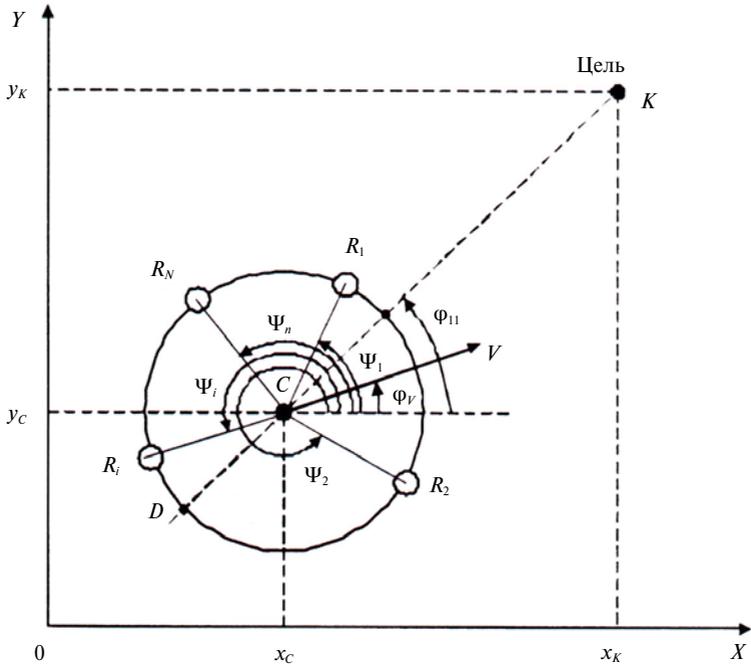


Рис. 4.11. Программная модель стайной стратегии группового управления

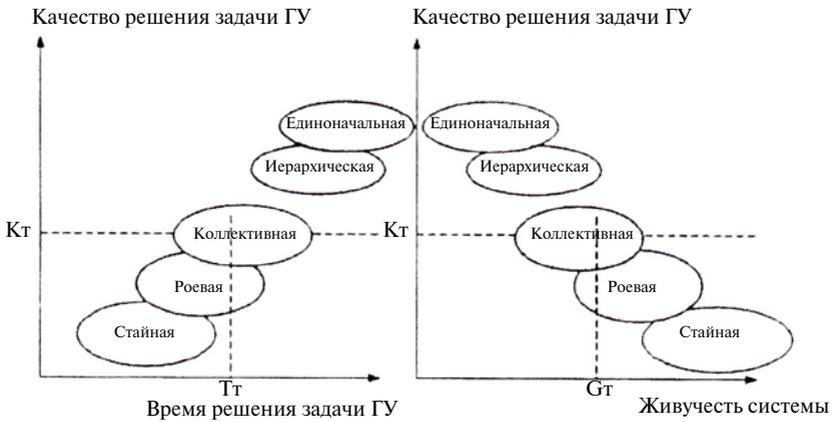


Рис. 4.12. Сравнительные характеристики различных стратегий группового управления

ботать согласованно друг с другом и с другим технологическим оборудованием.

Простейший случай группового управления в робототехнике — это управление системой приводов одного манипулятора в целях обеспечения заданных перемещений его рабочего органа. На первых порах для этого использовалось централизованное, разомкнутое управление приводами. С ростом требований к точности изменения положений рабочего органа чаще всего используется централизованное управление непосредственно по его координатам, т. е. манипулятор оснащается соответствующими сенсорами. Управляющие воздействия на отдельные приводы рассчитываются в этом случае путем решения обратной задачи кинематики или динамики в зависимости от требуемого быстродействия манипулятора. В результате происходит переход к управлению «с ведущим», где роль последнего играет рабочий орган манипулятора (захват, звено с закрепленным инструментом и т. п.).

С развитием адаптивного и интеллектуального управления роботами все более четко просматривается тенденция децентрализации за счет распределения между отдельными подсистемами робота или отдельными роботами группы задач обработки сенсорной информации, формирования моделей среды, базы знаний, т. е. тенденция применения методов распределенных вычислений и распределенного управления [4–8].

Следующая по сложности задача группового управления роботами — это координация их движения в пространстве. Простейший пример — предотвращение столкновений манипуляторов или мобильных роботов. Предельный случай — это работа манипуляторов на общем рабочем месте, например, в составе сборочного центра. В этом случае помимо обеспечения рабочих движений роботов система группового управления должна обеспечивать их безопасность, заключающуюся в исключении столкновений.

Более сложная задача группового управления — обеспечение совместной работы нескольких манипуляторов с координацией их движений одновременно и в пространстве, и во времени, т. е. координация производственных траекторий движения манипуляторов в реальном масштабе времени. Примером может быть операция сборки различных узлов путем механического соединения деталей, одновременно перемещаемых несколькими манипуляторами.

Далее по сложности следует задача группового управления гибкими производственными системами, где промышленные роботы функ-

ционируют совместно с различным технологическим оборудованием, транспортной и складской системами. Общая тенденция развития систем управления такими комплексами заключается в прогрессивном ослаблении централизованного начала и переходе к распределенным гибким производственным системам, состоящим из объединенных локальной сетью технологических модулей и функциональных модулей, выполняющих общесистемные функции. В таких системах может отсутствовать единое планирование и диспетчеризация, а последовательность изготовления каждого очередного изделия определяется в процессе выполнения технологических операций исходя из текущей ситуации.

Наиболее сложная задача группового управления – управление группой роботов в естественной неорганизованной среде (на поверхности Земли или других планет, в воде, воздухе, космосе) и особенно в условиях организованного противодействия со стороны объектов среды или других групп роботов (борьба двух или более групп).

Достижение цели, стоящей перед группой, осуществляется путем выполнения роботами некоторых действий. Для наиболее эффективного, оптимального достижения цели действия отдельных роботов группы, очевидно, должны быть согласованы, т. е. определенным образом скоординированы.

В дальнейшем именно задачу определения (распределения) групповых действий, направленных на оптимальное достижение групповой цели, для краткости будем называть задачей группового управления.

#### 4.1.2. Интегрированные приводы

---

---

В лекции 3 был описан интегрированный высокопроизводительный электросервопривод СПШ-10 (рис. 3.3, 3.4).

В качестве второго примера рассмотрим интегрированный привод транспортного мини-робота [7]. Общий вид и компоновка транспортного мини-робота (ТР) с двумя ведущими колесами ( $I$ ), симметрично расположенными на поперечной оси шасси и управляемыми независимо друг от друга (рис. 4.13).

В приводах ведущих колес ТР использованы двигатели постоянного тока (ДПТ) типа ДПМ-20 ( $5$ ), которые через редукторы ( $4$ ) соединяются с ведущими колесами ( $I$ ). Для определения скорости и направления вращения на их валах установлены инкрементальные датчики с синусным и косинусным выходами (коэффициент передачи инкре-

ментального датчика 512 меток / об, коэффициент передачи редуктора – 50). Оптоэлектронные датчики слежения (6) определяют положение ТР относительно светоотражающей полосы, нанесенной на полу. Микропроцессорная система управления (МПСУ), входящая в состав ТР, осуществляет расчет и формирование управляющих воздействий на приводные двигатели ДПТ в зависимости от показаний инкрементальных датчиков вращения и оптоэлектронных датчиков слежения (6). Кроме того, набор унифицированных интерфейсов, входящих в состав системы управления роботом (7), обеспечивает подключение к системе управления приводом (7) системы технического зрения, лазерных и ультразвуковых дальномеров, а также других средств очувствления, необходимых для отработки режимов управления движением ТР в условиях неопределенной рабочей среды (внешней среды).

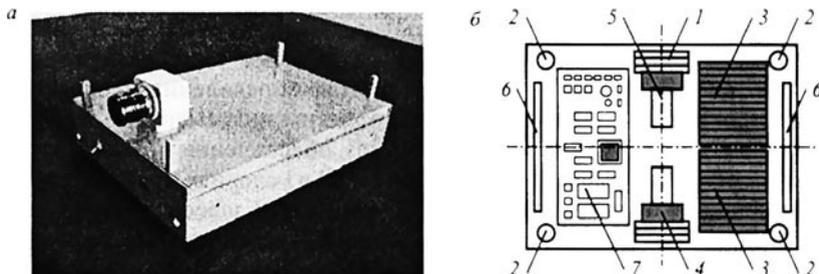


Рис. 4.13. Общий вид и компоновка транспортного мини-робота:

1 – два независимых друг от друга ведущих колеса; 2 – четыре неуправляемых шаровых опоры; 3 – аккумуляторные батареи; 4 – два редуктора; 5 – два двигателя постоянного тока; 6 – оптоэлектронные датчики слежения за светоотражающей полосой; 7 – микропроцессорная система управления роботом (МПСУ)

Для повышения интеллектуальных возможностей ТР используется персональная ЭВМ в качестве управляющей машины верхнего (стратегического) уровня. При программировании ТР связь между МПСУ и ПЭВМ осуществляется через последовательный канал RS-232C в дуплексном режиме со скоростью передачи данных 9600 бод, а при управлении движением ТР – через радиомодем, обеспечивающий устойчивую передачу данных на расстояние до 50 м при скорости 2400 бод. Аппаратная реализация этих функций производится модулем интерфейсов.

Функциональная схема МПСУ приведена на рис. 4.14.

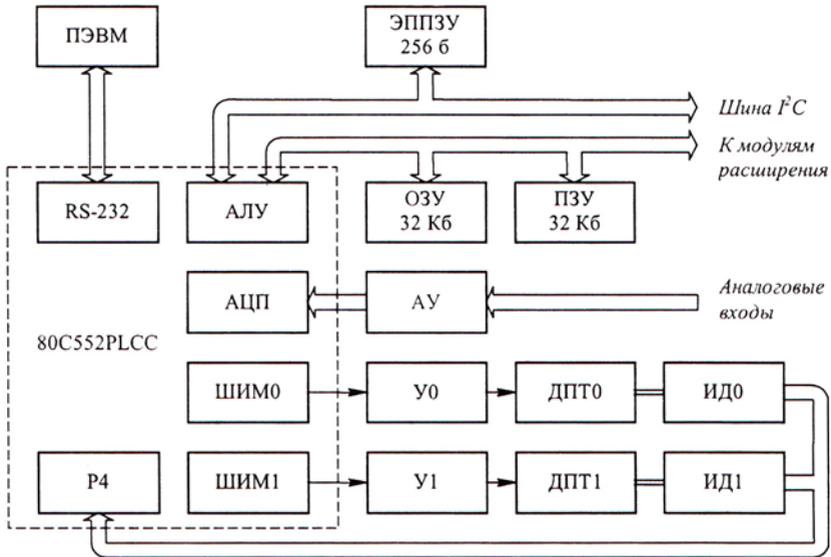


Рис. 4.14. Функциональная схема МПСУ ТР

Система управления представляет собой специализированную плату, разработанную на базе широко распространенного универсального микроконтроллера *80C552PLCC* фирмы *Philips*. Данный микроконтроллер ориентирован на построение систем управления приводами, поэтому его использование позволило не только существенно упростить схемотехнику МПСУ, но и снизить ее энергопотребление до 150 мА в рабочем режиме и 30 мА в ждущем.

Для управления скоростью и направлением вращения валов двигателей ТР ДПТ-0 и ДПТ-1 использован широтноимпульсный сигнал, формируемый восьмиразрядными модуляторами ШИМ-0 и ШИМ-1 и усиливаемый усилителями У-0 и У-1 соответственно. Кроме функции усиления сигнала, усилители У-0 и У-1 также выполняют функцию гальванической развязки цифровых и аналоговых цепей контроллера от цепей питания двигателя, что необходимо для обеспечения помехоустойчивой работы МПСУ.

Определение скорости и направления вращения двигателей ТР осуществляется с помощью двух однотипных импульсных датчиков ИД-0 и ИД-1, закрепленных на валах. Сигналы от датчиков поступают на схему быстрого ввода (*HSI*) *80C552PLCC* и обрабатываются программно. Ресурсы контроллера позволяют при скорости враще-

ния вала двигателя от 0 до 2000 об / мин измерять период или частоту следования импульсов от датчиков, обеспечивая тем самым необходимую точность измерения.

Сигналы от оптических датчиков слежения за полосой (на рис. 4.14 не показаны) формируются в позиционном двоичном коде и поступают непосредственно на порты *P1* и *P2* микроконтроллера.

Для хранения абсолютного модуля исполняемой программы и другой информации в состав контроллера включены:

- постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) емкостью 32 Кб;
- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) емкостью 32 Кб, обеспечивающее хранение информации при работе МПСУ в режиме пониженного энергопотребления;
- запоминающее устройство на базе ЭППЗУ с емкостью 256 байт, обеспечивающее хранение данных при полностью выключенной МПСУ.

Для подключения к МПСУ дополнительных устройств, расширяющих ее функциональные возможности, могут быть использованы интерфейс *I<sup>2</sup>C*, обеспечивающий полудуплексную передачу данных со скоростью до 100 Кбод, или параллельная 8-разрядная шина микроконтроллера. Следует отметить, что последний случай, при котором обеспечивается наибольшая скорость передачи данных (до 1 Мб/с), требует внесения незначительных изменений в принципиальную схему контроллера.

Аппаратные средства МПСУ позволяют обрабатывать сигналы от датчиков с аналоговым выходом. Для этого в состав МПСУ включен аналоговый нормирующий усилитель (АУ), с выходов которого сигнал поступает на входы встроенного 10-разрядного АЦП микроконтроллера *80C552PLCC*.

Использование персонального компьютера типа *IBM PC* в качестве управляющей машины верхнего уровня обусловлено в первую очередь необходимостью обработки больших объемов информации при решении поведенческих задач. Компьютеры данного класса обладают мощными ресурсами, позволяющими эффективно решать сложные вычислительные задачи и производить их отладку, а также обладают развитым интерфейсом. Наличие последовательного интерфейса *RS-232C* обеспечивает совместимость ПЭВМ с исполнительным уровнем системы управления, а унифицированные высокоскоростные каналы передачи данных (такие, как, например, внутрисистемные шины *ISA*, *RCA* и др.) обуславливают возможность подключения различных средств внешнего очувствления. Если решаемые задачи требуют су-

шественного расширения имеющихся ресурсов, персональная ЭВМ может быть включена в состав локальной компьютерной сети.

Другой важный фактор, определивший выбор типа управляющего компьютера в пользу ПЭВМ, связан с ее аппаратной и программной совместимостью с вычислительными машинами фирмы *Octagon Systems*, выполненными в стандарте *Micro PC* и ориентированными на создание систем промышленного применения. Такое решение позволяет разрабатывать и отлаживать алгоритмы управления ТР и его программное обеспечение на ПЭВМ, а исполнять их (при проведении натуральных испытаний) на установленной на грузовой платформе ТР вычислительной машине *Micro PC* на базе процессора *Intel 486DX66*, при этом какая-либо модификация программного обеспечения при его переносе с ПЭВМ на *Micro PC* не требуется.

#### 4.1.3. Микроэлектромеханические машины и системы

---

В лекции 3 (раздел 3.1.1) были даны основные определения микроэлектромеханических систем (*MEMS*). Создание *MEMS* – это сложная комплексная задача, которую не удастся свести просто к уменьшению массогабаритных показателей. При создании микросистем и микроустройств для манипуляций, перемещений или выполнения каких-либо действий в микрометровом диапазоне приходится сталкиваться с рядом особенностей поведения микросистем: снижение влияния гравитационных и инерциальных сил по сравнению с силами сцепления (электростатическими, Ван-дер-Ваальса и поверхностного натяжения), которые пропорциональны площади поверхности; наибольшая надежность выполнения операций захвата и элементарных операций по перемещению обеспечивается устройствами, основанными на использовании механических, гидравлических, электростатических и электромагнитных сил; повышенные требования к точности изготовления компонентов микросистем порядка 1 мкм. Эти особенности необходимо учитывать при разработке исполнительных механизмов (приводов) для различного рода микросистем. Довольно часто конструирование приводов сводится к выбору физического эффекта, выходом которого является механическая энергия. С точки зрения габаритов, точности и массы наибольший интерес представляют следующие типы приводов: пьезоэлектрические, магнитострикционные, биметаллические и приводы на базе металлов с памятью.

Из всего широкого класса *MEMS* в качестве примеров рассмотрим микроэлектродвигатели и микророботы.

*Микроэлектродвигатели.* Многие фирмы, занимающиеся разработкой мини- и микроустройств, используют микродвигатели. Один из таких двигателей представлен на рис. 4.15.

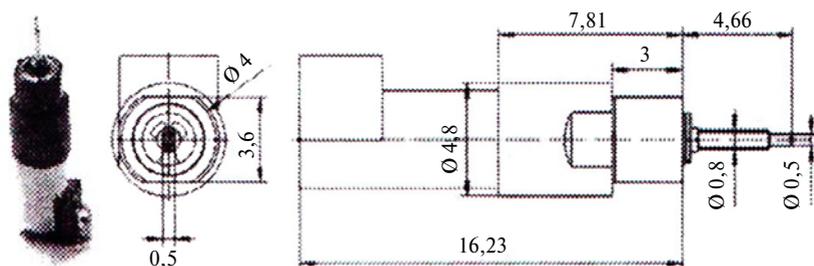


Рис. 4.15. Микродвигатель и его габаритные размеры

КПД таких двигателей очень высок и приближается к 85–90 % за счет снижения количества трущихся пар, уменьшения размеров, а, следовательно, снижения сил трения.

Напряжение питания от 0,2 до 3 В при максимальных токах потребления около 50÷250 мА. Номинальная частота вращения вала до 32 500 об/мин. Поэтому часто встречаются двигатели со встроенными планетарными редукторами с различными коэффициентами редукции.

Для реализации прямолинейных перемещений выпускаются шариковинтовые передачи. Размеры шариков лежат в диапазоне от 1,5 до 0,5 мм. Внешний вид и характеристики микромотора со встроенным редуктором *SPH39004* приведены на рис. 4.16 и в табл. 4.1.



Рис. 4.16 Микро-мотор со встроенным редуктором *SPH39004*

Таблица 4.1

Характеристики микродвигателя *SPH39004*

Тип микродвигателя	<i>SPx39003</i>	<i>SPx39004</i>
Коэффициент редукции	1:125	1:25
Максимальный момент (непрерывный), мН·м	2,2	0,5
Максимальный момент (краткий, до 10 сек.), мН·м	3,0	0,7
Число ступеней редуктора	3	2
КПД, %	60	70
Максимальная радиальная нагрузка, Н	25	25
Максимальная осевая нагрузка, Н	40	40
Мертвый ход без нагрузки, °	2	1

Тип микродвигателя	SPx39003	SPx39004
Мертвый ход при нагрузке 10 м Нм, °	4	–
Мертвый ход при нагрузке 2 м Нм, °	–	3
Скорость вращения двигателя, об / мин	15 000	15 000
Габариты двигателя	диаметр 3 мм длина 6,87 мм	
Габариты редуктора	диаметр 3,4 мм длина 5,37 мм	

В разделе 2.2.3 описаны микродвигатель, сконструированный в университете Висконсин – Мэдисон (США), и пьезоуправляемый микродвигатель для электронной микроскопии, микробиологии, микроборки, созданный на фирме *Klocke Nanotechnik* (Германия), ход которого составляет несколько нанометров.

*Микророботы.* Классификация микророботов по области применения, способам перемещения и т. д. приведена на рис. 4.17.

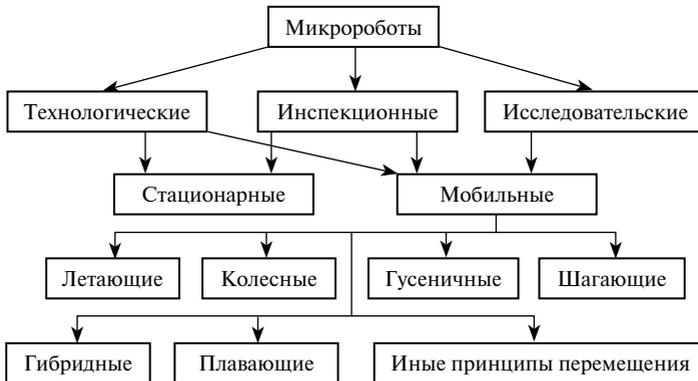


Рис. 4.17. Классификация микророботов

Вышеприведенная классификация не претендует на полноту описания существующих конструкций микророботов, так как некоторые прототипы трудно бывает отнести к какому-либо классу. Это связано, в первую очередь, с условиями функционирования микросистем.

К технологическим микророботам относятся конструкции, предназначенные для автоматизации технологических процессов производства микромеханических систем, в основном это сборочные

процессы и процессы механической обработки отдельных компонентов. Чаще всего стационарные роботы представляют собой копирующие манипуляторы, но работающие в диапазоне микроперемещений и с усилиями, измеряемыми несколькими мН и меньше. Мобильные технологические роботы оснащаются осязательными микросхватами и выполняют задачи транспортировки микрообъектов или микроузлов как в зону сборки, так и готовых изделий на выгрузку. Мобильность реализуется использованием колесного, гусеничного или шагающего принципов перемещения.

Инспекционные стационарные микророботы предназначены для проведения операций контроля размеров или других параметров, тестирования функциональных возможностей микросистем, автоматизации операций при работе с электронным микроскопом. Мобильные роботы этого класса чаще всего называют роботами-разведчиками. Основная их задача – инспекция труднодоступных мест, неразрушающий контроль, сбор данных и т. д. Миниатюризация позволяет создавать и использовать при изготовлении таких микророботов СТЗ, приемопередатчики радиодиапазона, блоки питания и другие компоненты, конструктивно оформленные в виде отдельных микросхем, размеры которых не превышают  $1 \text{ см}^2$ . Таким образом, возможно создание инспекционного микроробота, способного автономно перемещаться в течение нескольких десятков часов, передавая при этом на удалении до нескольких сот метров видеоинформацию, данные с регистрирующих приборов и т. д.

К исследовательским роботам следует отнести те микророботы, которые предназначены для отработки новых элементов конструкции, проверки новых узлов связи, управления и т. д. На базе таких роботов часто проводят эксперименты по проверке работоспособности систем управления и планирования, ставят эксперименты по групповому управлению, изучают механизмы взаимодействия с окружающей средой.

В настоящее время проводятся работы по созданию системы микроманипулирования, которая может использоваться для сборки гибридных микросистем. Система должна быть установлена внутри сканирующего электронного микроскопа, который лучше всего подходит для высокоточного позиционирования в силу большой величины сканируемого пространства и значительной глубины резкости получаемого изображения. Другое преимущество электронного микроскопа – отсутствие микроскопических частиц в рабочей зоне (создается вакуум). Рабочей поверхностью в этой системе (рис. 4.18) является

координатный стол электронного микроскопа, отдельные элементы которого могут нагреваться до  $1000^{\circ}\text{C}$  из-за воздействия пучка электронов.

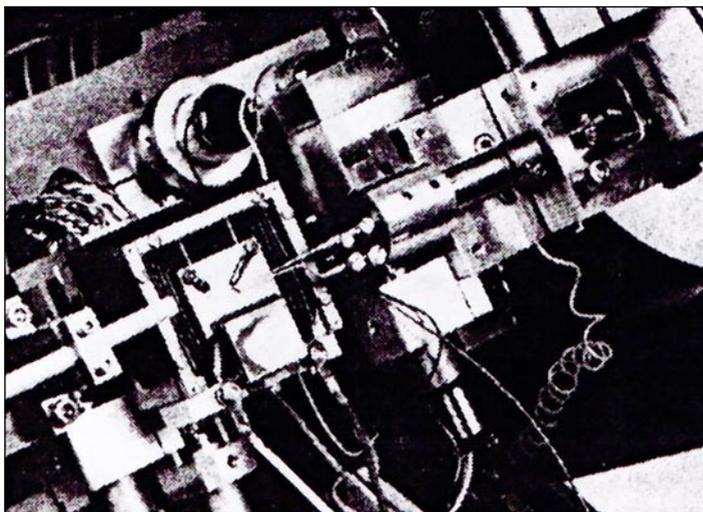


Рис. 4.18. Микроманипулятор для сканирующего электронного микроскопа

Координатный стол микроскопа может перемещаться с точностью до  $1\text{ мкм}$  вдоль осей  $X$  и  $Y$ . В микроскопе используется закрытое вакуумное пространство размером  $200 \times 150 \times 150\text{ мм}^3$ . В качестве рабочего органа используется пьезоэлектрический микропинцет, предназначенный для точного позиционирования микрообъектов. Расстояние между губками пинцета в открытом состоянии  $200\text{ мкм}$ . Пинцет может развивать усилия до  $0,3\text{ Н}$ . Микропинцет прикреплен к модулю позиционирования, который имеет четыре степени свободы и отвечает за грубое позиционирование. Он оснащен двигателями постоянного тока. Для следующего прототипа этой системы разрабатывается модуль позиционирования, который будет иметь шесть степеней свободы, а точность позиционирования будет лежать в субмикрометровом диапазоне. Это даст системе возможность собирать трехмерные микросистемы. Дополнительный манипулятор может использоваться для задач измерения или как вспомогательный инструмент для обеспечения процесса сборки. Данная система использует пьезоэлектрик в качестве приводов схвата.

*Мобильные микророботы.* Ученые лаборатории SNL (*Sandia National Laboratories*) – подразделение Минэнерго США – сконструировали достаточно маленькие, реально работающие автономные роботы. Их размер не превышает одного кубического сантиметра. Скорость перемещения робота – полметра в минуту, энергии батарей (три батарейки для часов) хватает на 15 минут движения.

Вычислительная мощность процессора такого робота аналогична мощности первых ПК (тактовая частота до 1 МГц и ПЗУ порядка 8 Кб). Пока действующая модель робота снабжена только датчиками температуры. В дальнейшем планируется оснастить ее микрофоном, радиопередатчиком, устройствами дистанционного управления и инфракрасными датчиками движения. Установить же видеокамеру и получать изображения в масштабе реального времени из-за технической сложности пока не удастся, хотя отдельные кадры от микрофотокамеры принимать можно.

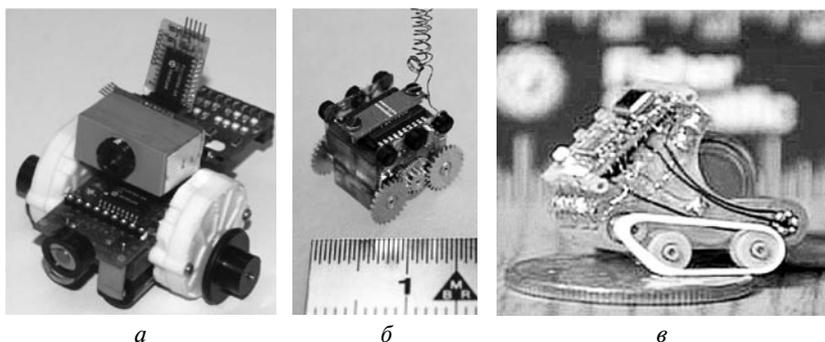


Рис. 4.19. Микророботы:

*a – Swibot; б –  $\mu R$ ; в – Sandia National Laboratories*

Первые модели роботов создавались на колесном ходу (рис. 4.19, *a* и *б*), но теперь используются гусеницы (рис. 4.19, *в*). Это позволяет роботам более устойчиво передвигаться по неровной местности. Основная проблема при создании таких устройств – это источники питания. По заявлению разработчиков размеры робота определялись только размером батареек и сроком их жизни. И если им бы удалось найти другие малогабаритные источники питания, то эффективность данного класса микророботов значительно повысилась бы.

*Микротехнологические модули и комплексы.* Современные микротехнологические модули и комплексы должны отвечать следующим требованиям:

- допустимая погрешность формы при обработке микроизделий – 0,01...0,1 мкм;
- шероховатость обрабатываемой поверхности  $Ra = 0,002...0,01$  мкм;
- дискретность перемещения при выполнении микросборочных операций до 5 нм;
- исключение тепловых и вибрационных воздействий на микротехнологические модули.

Примером могут служить электроэрозионные станки фирмы *Sodick*, которые применяются при обработке деталей в микрооптике и микроэлектронике. Этим требованиям также удовлетворяют стационарные и мобильные робототехнологические модули и комплексы, участвующие в реализации технологических процессов обработки и сборки микроизделий.

Использование мобильных микророботов в составе микросборочных и микротехнологических станций позволит реализовать многооперационную обработку и сборку, транспортировку объекта, тестирование и контроль конечного продукта, рационально распределить нагрузку между сборочными единицами, повысить эффективность всего комплекса.

При проектировании микророботов необходим конструктивно новый подход к выбору базовых физических эффектов, на основе которых строятся приводы перемещения мобильных роботов. Основное требование к исполнительным механизмам, применяемым в микробототехнике, – это отсутствие механических передач или преобразователей видов движения. Перемещения, которые должны реализовываться этими приводами, более чем на порядок ниже величины люфта механических передач, поэтому в качестве приводов чаще используются так называемые преобразователи рода энергии, наиболее распространенными из которых являются обращенные электромеханические преобразователи.

Микросистемы находят применение в медицине, биологии, промышленности. Однако при сборке микросистем возникают проблемы, связанные с размерами микрообъектов. В настоящее время недостаточно развиты технические устройства, позволяющие осуществлять с высокой точностью манипуляции над микрообъектами, размеры которых могут быть соизмеримы с размерами моле-

кул. Для такого рода устройств не могут быть применены методы и механизмы реализации сборки, разработанные для систем обычных размеров.

Основным техническим устройством, на базе которого строится микросборочная станция (МСС), является пьезоэлектрический микробот класса «МикРоб». В настоящее время для создания МСС предлагается использование наиболее совершенного варианта микроботов данного типа – пьезоэлектрических микроботов «МикРоб III».

Различные типы мобильных пьезоэлектрических микросборочных роботов семейства «МикРоб» (рис. 4.20, 4.21) были разработаны в лаборатории микробототехники кафедры технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета.

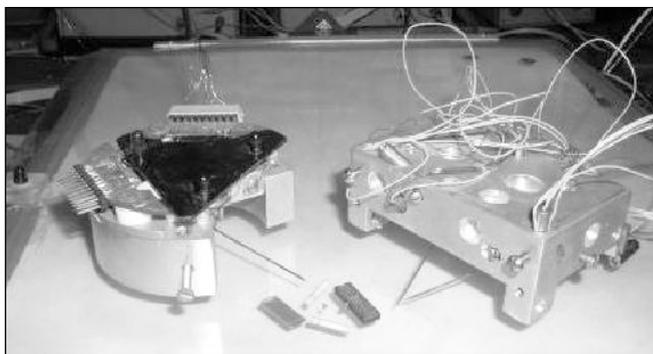


Рис. 4.20 Пьезоэлектрические микроботы: «МикРоб I» (справа) и «МикРоб II» (слева)

Каждый робот оснащен узлом микроманипуляций (два у робота «МикРоб I», и один у роботов «МикРоб II» «МикРоб III»), установленным на подвижной платформе с тремя пьезоэлектрическими приводами. Микроманипулятор робота имеет сферическую основу, приводимую в движение также тремя пьезоэлектрическими приводами. Микроманипулятор может оснащаться различным микроинструментом или пьезоэлектрическим микросхватом (рис. 4.21, а).

Губки микросхвата приводятся в движение с помощью двух параллельно расположенных биоморфных пьезопроводов и вычажного механизма, обеспечивая захват микрообъектов размером до 2 мм. Разработанная конструкция робота обеспечивает при выполнении манипуляций точность позиционирования микрообъектов не ниже 10 нм.

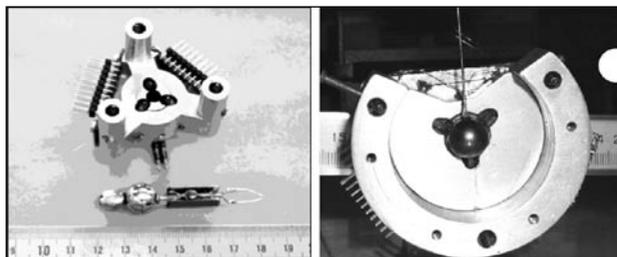


Рис. 4.21. Пьезоэлектрические микророботы:  
*а* – «МикРоб II» (вид сверху); *б* – «МикРоб III» (вид спереди)

Рассмотрим более подробно конструкцию мобильного пьезоэлектрического микроробота (рис. 4.22).

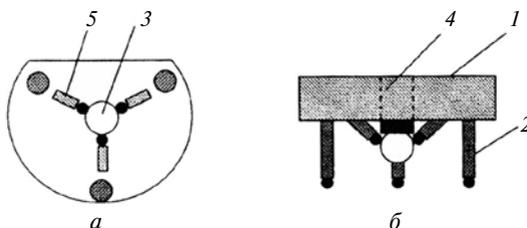


Рис. 4.22. Мобильный пьезоэлектрический микроробот:  
*а* – вид снизу; *б* – вид сбоку

Микроробот содержит подвижную платформу *1*. Для реализации его перемещения по плоскости используются три пьезоэлектрических преобразователя *2*, расположенных в вершинах равностороннего треугольника. Пьезоэлектрические преобразователи *2* представляют собой пьезокерамический трубчатый элемент с внутренним и четырьмя внешними симметрично расположенными электродами. К свободному концу пьезопривода приклеен рубиновый шарик для обеспечения постоянной величины площади контакта привода с поверхностью.

Под действием электрического напряжения, приложенного между внутренним и одним из внешних электродов, пьезокерамический трубчатый элемент деформируется. При подаче на сегменты внешних электродов соответствующих напряжений пьезопривод *2* можно удлинить, укоротить или согнуть в любом из направлений, что позволяет реализовывать требуемые движения и повороты подвижной платформы *1* микроробота.

Для перемещения платформы используется шагоподобное движение, основанное на скоростных свойствах пьезоэлементов и инерции платформы, которые обеспечивают возможность направленного движения пьезоэлектрического преобразователя при выполнении одного шага, прежде чем под действием силы тяжести платформа потеряет свое устойчивое состояние. Для выполнения одного шага используется определенная последовательность управляющих пилообразных напряжений. Величина шага задается амплитудой подаваемого напряжения, скорость движения – частотой пилообразного напряжения.

Для выполнения манипуляций с микрообъектами микроробот снабжен системой микроманипулирования, которая представляет собой шаровую основу 3 из магнитопроводящего материала с приспособлением для крепления микросхвата. На подвижной платформе 1 (рис. 4.22) установлена магнитная система, состоящая из постоянного магнита 4, компенсирующего силу тяжести и обеспечивающего постоянную силу прижатия шаровой основы 3 манипулятора к пьезоэлектрическим преобразователям 5. Движение манипулятора генерируется с помощью трех пьезоэлектрических преобразователей 5 (идентичных преобразователям 2), оси которых пересекаются в центре шаровой основы под углом  $90^\circ$  друг к другу, то есть образуют декартову систему координат с началом отсчета, расположенным в центре шаровой основы. Прикладывая напряжение на соответствующие противоположные сегменты внешних электродов двух пьезоприводов 5, можно добиться поворота шаровой основы относительно оси третьего пьезопривода.

В связи с тем что величина одного шага пьезоэлектрического преобразователя меньше диаметра шаровой основы манипулятора более чем на шесть порядков, то управление перемещением микросхвата осуществляется аналогично управлению пьезоприводами 2 подвижной платформы. При этом используются три типа движения манипулятора: во-первых, подъем и опускание манипулятора; во-вторых, движение манипулятора влево и вправо и, в-третьих, вращение манипулятора вокруг собственной оси. Последнее движение может быть выполнено с помощью поворота шаровой основы вокруг одного из пьезоприводов. Первые два типа требуют более сложного составного движения, которое генерируется с помощью чередующихся последовательностей простейших движений – вращения вокруг соответствующих пьезоприводов.

#### 4.1.4. Кинематические структуры многокоординатных машин

Типичными представителями многокоординатных (многозвенных) механизмов являются *манипуляторы* – механизмы, обладающие несколькими степенями подвижности (свободы), которые предназначены для перемещения и ориентации объектов в рабочем пространстве. Манипулятор является базовым элементом робота.

Типовые кинематические схемы манипуляторов приведены на рис. 4.23 [5].

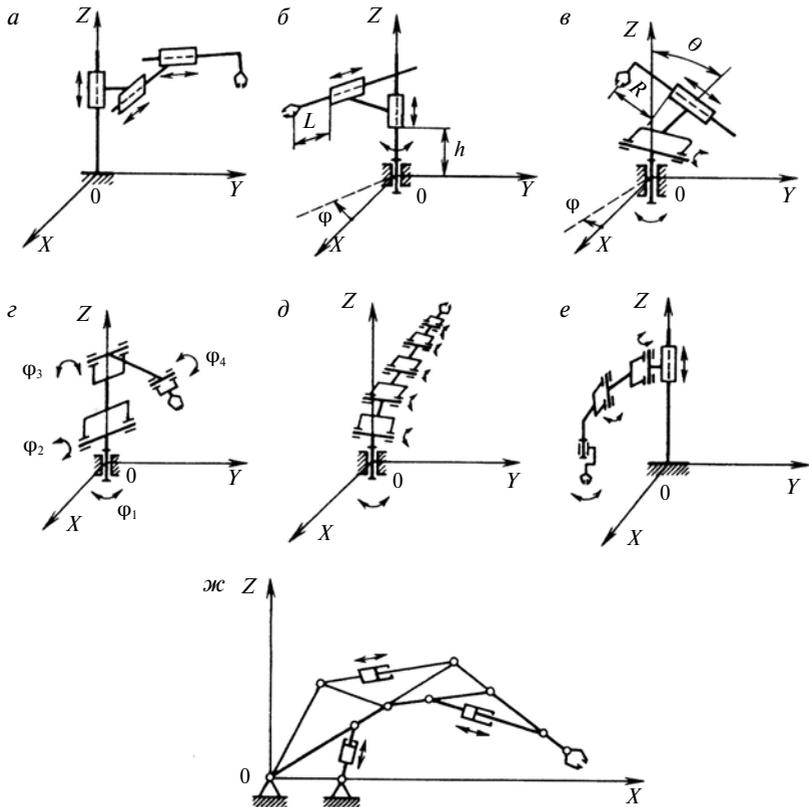


Рис. 4.23. Типовые кинематические схемы манипуляторов:

*a* – прямоугольная; *б* – цилиндрическая; *в* – сферическая; *г* – антропоморфная; *д* – с избыточностью; *е* – SCARA; *ж* – схема гидравлического манипулятора с ветвлением кинематической сети

Конструктивные компоновки манипуляторов *PUMA-560*, *UNIMATE* и *SCARA* показаны на рис. 4.24.

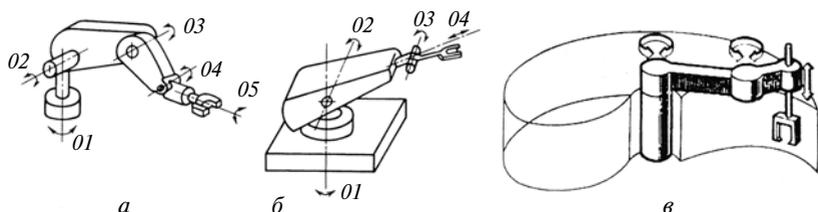


Рис. 4.24. Конструкции промышленных манипуляторов:

*a* – *PUMA-560*; *б* – *UNIMATE*; *в* – *SCARA*

Селективная податливая рука сборочного робота (*SCARA* – *selective compliance assembly robot arm*) разработана в университете Яманаси (Япония). Звенья манипулятора взаимно поворачиваются в одной плоскости, а рабочий орган совершает поступательные движения вверх и вниз.

Кинематика *SCARA* подобна схемам в угловой системе координат, однако вращающиеся соединения звеньев расположены в горизонтальной, а не в вертикальной плоскости с использованием вертикальной оси для подъема захватного устройства. В такой конструкции сочетаются свойства схем в угловой и цилиндрической системах координат. За счет жесткости конструкции в вертикальном направлении манипуляторы *SCARA* могут нести повышенные нагрузки на рабочем органе. Высокая точность позиционирования рабочего органа и большая рабочая зона позволяют особенно эффективно применять компоновку *SCARA* при сборке [18].

Приведенные на рис. 4.23 и 4.24 манипуляторы обеспечивают промышленным роботам высокую степень манипуляции, но имеют и ряд недостатков:

- низкий показатель грузоподъемность / масса манипулятора;
- относительно низкая точность позиционирования в связи с суммированием погрешностей по всей цепи звеньев манипулятора;
- относительно низкая жесткость манипуляторов.

Один из новых и эффективных методов преодоления перечисленных недостатков – создание машин с параллельной кинематикой (МПК). В основе их конструктивной схемы лежит обычно подвижная «платформа Стюарта», соединенная с основанием несколькими

стержнями управляемой длины. Для обеспечения шести степеней свободы платформы необходимо соответственно шесть стержней. Такие машины называются «гексаподы» (от греч. hex – шесть). Если управляемых стержней три, то МПК называется «трипод». Примеры кинематических схем гексаподов приведены на рис. 4.25 [17].

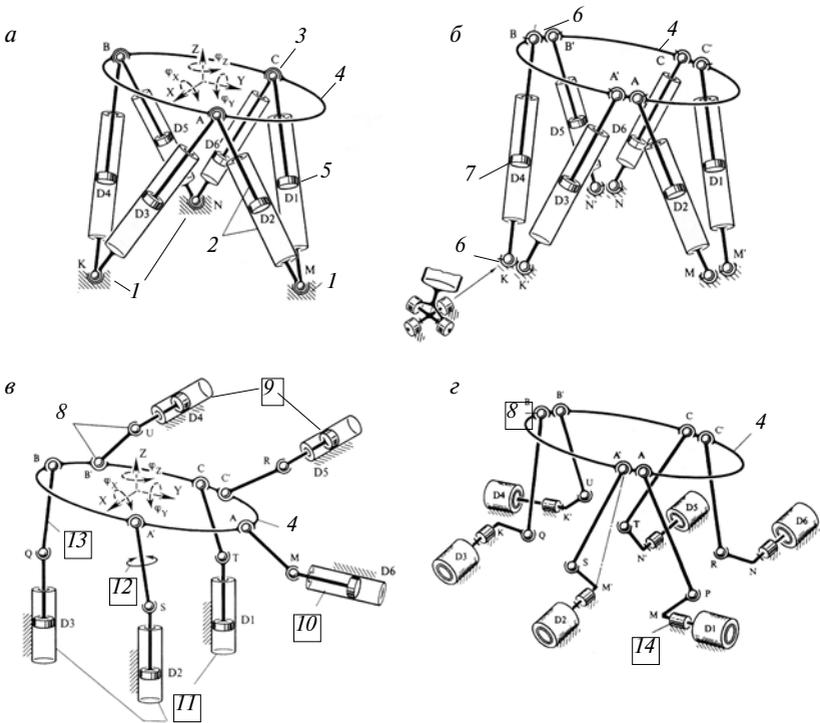


Рис. 4.25. Варианты кинематических схем гексаподов

1 – основание; 2 – свободные вращения – самоустановка штоков и цилиндров; 3 – двойной сферический шарнир ( $III_s+III_s$ ) или ( $IV_s+IV_s$ ) или ( $III_s+IV_s$ ) с общим центром; 4 – выходное звено (платформа/стол); 5 – одноподвижная (поступательная, винтовая) или двухподвижная (поступательно-вращательная) пара; 6 – двухподвижный сферический цилиндр (карданное соединение)  $IV_s$ ; 7 – поступательная пара с возможностью вращения ( $IV_s$ ); 8 – сферические трехподвижные шарниры ( $III_s$ ); 9 – приводы для воспроизведения перемещений в основном вдоль оси  $X$  и поворота  $\varphi_x$ ; 10 – привод для воспроизведения перемещений в основном вдоль оси  $Y$ ; 11 – приводы для воспроизведения перемещений в основном вдоль оси  $Z$  и поворотов  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$ ; 12 – свободное вращение (самоустановка шатуна); 13 – шатун; 14 – одноподвижная вращательная пара ( $V_s$ ).

Нормальное функционирование гексаподов возможно при следующих условиях:

- по крайней мере, три стержня не должны быть параллельны между собой;
- все стержни должны быть расположены не менее чем в трех непараллельных (и несовпадающих) плоскостях.

Эти условия определены недопустимостью так называемых «особых положений», при которых дальнейшее движение либо неопределенно, либо невозможно. В действительности не следует даже приближаться к такому положению. В то же время при определенных условиях особое положение можно пройти по инерции, подобно прохождению «мертвой точки» в кривошипно-ползунном механизме.

Общая схема станка-гексапода показана на рис. 4.26.

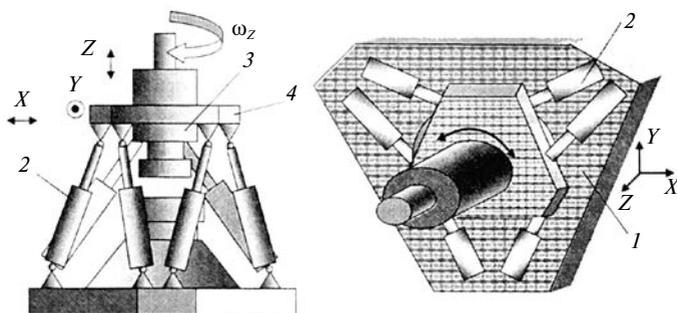


Рис. 4.26 Схема станка-гексапода

Станок-гексапод выполнен на базе шести ШВП-2 с соответствующими датчиками перемещения и высокомоментными двигателями, осуществляющими осевое перемещение винтов. Одним концом ШВП шарнирно соединены с основанием 1, а другим – шарнирно с подвижной верхней платформой 4, на которой расположен исполнительный орган – инструментальная головка 3. Инструментом могут служить фрезы, сверла, резцы, шлифовальные круги, измерительные наконечники. Программно перемещая винты, можно управлять положением исполнительного органа: перемещать его в вертикальном и горизонтальном направлениях, поворачивать в трех плоскостях.

Рассмотренные технические решения мехатронных технологических систем на базе механизмов параллельной кинематики обеспечивают существенные преимущества по сравнению со станками традиционной компоновки по технологическим возможностям об-

работки изделий сложной конфигурации и точности исполнительных движений.

Наиболее перспективной областью их применения является прецизионное станкостроение. Результаты структурного анализа систем параллельной кинематики могут быть использованы при проектировании нового типа автоматизированных технологических систем.

Основные преимущества гексаподных машин:

- сокращение времени подготовки производства и повышение его рентабельности за счет объединения обрабатывающих, разметочных и измерительных функций в единой мехатронной системе;
- высокая точность измерений и обработки, которая обеспечивается повышенной жесткостью стержневых механизмов (до 5 раз), применением прецизионных датчиков обратной связи и лазерных измерительных систем, использованием компьютерных методов коррекции (например, тепловых воздействий);
- повышенная скорость движений (скорость быстрых перемещений достигает 10 м/с, рабочих движений – до 2,5 м/с);
- отсутствие направляющих (в качестве несущих элементов конструкции используются приводные механизмы), отсюда улучшенные массогабаритные характеристики и материалоемкость;
- «высокое качество управления движением благодаря малой инерционности механизмов, применению линейных меха-



Рис. 4.27. Вид снизу на конструкцию платформы стенда-имитатора

тронных модулей движения как объектов управления, использованию методов автоматизированной подготовки и исполнения в реальном времени управляющих программ, наличию дружелюбного интерфейса «человек – машина»».

Гексаподы могут быть как вертикальные (рис. 4.26), так и горизонтальные (университет Аахена, Германия).

Механизмы с параллельной кинематикой (МПК) не обязательно должны иметь шесть штанг. Их может быть и три и восемь. Важно, что пространственные движения платформе передают путем изменения длин штанг. В отли-

чие от традиционных последовательных многокоординатных систем, в которых погрешности позиционирования по каждой из осей суммируются, погрешности МПК могут взаимно компенсироваться, так что общая неточность может достигать доли микрона.

Одно из наиболее интересных исполнений МПК предусматривает закрепление рабочего инструмента на подвижной платформе. В другом варианте подвижная платформа является рабочим столом станка. Оба этих варианта показаны соответственно на рис. 4.27 и 4.28.

Внешний вид первого отечественного гексапода (Новосибирск, 1984 г.) показан на рис. 4.29.

Благодаря повышенной точности МПК могут применяться не только как обрабатывающее оборудование, но и в качестве измерительных машин. Примерами могут служить трипод-сканер для измерения геометрических параметров костей (рис. 4.30).

Полученная цифровая информация и геометрии эталонного образца передается затем в *CAD / CAM*-систему для автоматического производства его копий. Эта же МПК может выполнять и технологические операции по обработке заготовки.

Высокая жесткость МПК позволяет применять их на силовых технологических операциях. Так, на рис. 4.31 показан пример гексапода, выполняющего гибочные операции в составе технологического комплекса «HexaBend» для производства сложных профилей и труб.

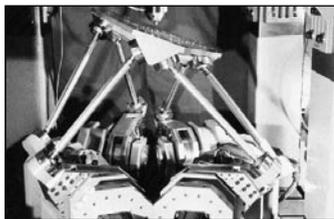


Рис. 4.28. Компоновка: рабочий стол с механизмом типа «гексапод»

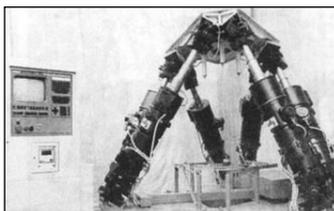


Рис. 4.29. Первый отечественный гексапод

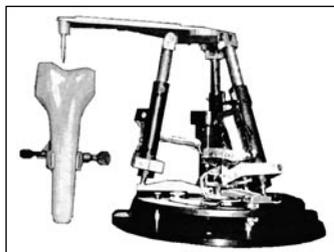


Рис. 4.30. Трипод, сканирующий поверхность кости



Рис. 4.31. Технологический комплекс «HexaBend» (Институт станков и прессов *IWU*, Германия)

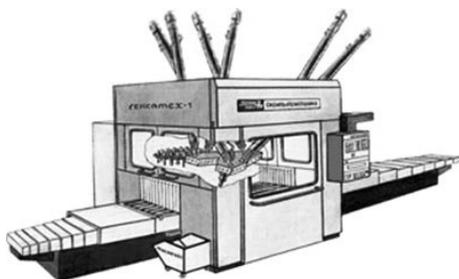


Рис. 4.32 Общий вид гексапода модели ГЕКСАМЕХ-1

(НИИАТ-САВМА) (рис. 4.32). Станок предназначен для обработки изделий сложной пространственной формы в авиакосмической, автомобильной, судостроительной промышленности. Типовые обрабатываемые изделия: балки, нервюры, лонжероны, панели, литейные и мастер-модели, оснастка.

Станок представляет собой гексапод с подвешенным на шести штангах электрошпинделем и продольно подвижным столом.

Он имеет высокоскоростной (до  $24\,000\text{ мин}^{-1}$ ) электрошпиндель, который позволяет выполнять обработку деталей с повышенной производительностью и высоким классом чистоты поверхности. Точность позиционирования –  $\pm 0,05\text{ мм}$ . Цифровые приводы подачи фирмы *INDRAMAT* с интерфейсом *SERCOS* и мультипроцессорная система управления *POWER AUTOMATION* обеспечивают высокую динамику и надежность управления гексаподом. Технические характеристики перемещения по координатам: по  $X$  –  $3000\text{ мм}$ , по  $Y$  –  $800\text{ мм}$ , по  $Z$  –  $700\text{ мм}$ ;  $A$  –  $\pm 30^\circ$ ,  $B \approx \pm 25^\circ$ . Скорости подач – до  $30\text{ м/мин}$ , ускорения – до  $10\text{ м/с}^2$ .

На базе созданного образца гексапода предполагается разработка серии обрабатывающих центров с перемещением по координате  $X$ , т. е. стола, до  $30\text{ м}$ .

К числу наиболее важных конструктивных элементов можно отнести штанги с встроенным электродвигателем, шарниры, а также электрошпиндели. Пока конструктивное исполнение с линейными электродвигателями фирмы разработчики не раскрывают.

Наряду с очевидными преимуществами опыт внедрения машин с параллельной и гибридной кинематикой в реальное производство выявил ряд актуальных научно-технических проблем. К ним можно отнести следующие вопросы:

Следует особенно подчеркнуть, что все МПК построены на мехатронных принципах: они являются гибридными машинами со встроенными интеллектуальными системами управления – наиболее сложный вариант мехатронной системы.

В 2003 году в России был создан первый серийный станок типа МПК – Гексамех-1

- сложность системной интеграции, необходимость дополнительного времени для анализа и поиска неисправностей;
- большая трудоемкость обслуживания и программирования машины по сравнению с традиционным оборудованием;
- сложность и неотработанность процедуры калибровки машины;
- необходимость знаний как в области станков с ЧПУ, так и промышленных роботов для обучения персонала методике программирования;
- неоднородность (анизотропия) характеристик машины в различных областях рабочей зоны, наличие особых конфигураций.

На эффективность решения этих задач, поставленных практикой производственного применения, необходимо обратить особое внимание при создании машин нового поколения.

#### 4.1.5. Многофункциональные металлообрабатывающие центры

---

В настоящее время ряд мощных машиностроительных фирм заняты разработкой многофункциональных металлообрабатывающих центров. К числу таких фирм можно отнести: *OKUMA OKAMOTO* (Япония), *Niles-Simmons Hegenscheidt*, *MIKROMAT*, *DMG ECOLINE* (Германия) и др.

Большинство современных обрабатывающих центров различного назначения (многофункциональные, вертикальные, горизонтальные, токарные, порталные и др.) оборудованы высокоскоростными шпиндель-двигателями (мотор-шпинделями) с частотой вращения до 18000 мин<sup>-1</sup>, встроенными системами измерения и сканирования инструмента и точностью позиционирования осей обработки, системами управления скоростью резания без увеличения уровня вибрации (программа *Machining Navi* (Япония)), системами компенсации температурных изменений (увеличение температуры прогнозируется и при необходимости компенсируется – фирма *OKUMA*), системами предупреждения столкновениями для автоматического и ручного режимов работы станков (*Collision Avoidance System* – *OKUMA*), современными системами ЧПУ (*PCNC*) (например, *OSP* – *Okuma Sampling Path Control*).

В качестве примера рассмотрим вертикальный обрабатывающий центр фирмы *DMG ECOLINE* серии *DMC V* (рис. 4.33).

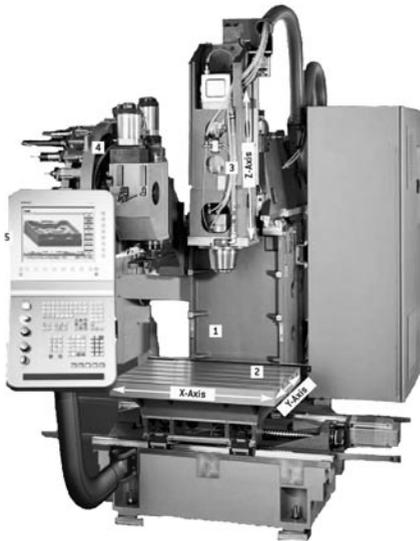


Рис. 4.33. Вертикальный обрабатывающий центр *DMC 635 V eco*

*MENS*, большим цветным экраном до 15<sup>11</sup>, полноцветной клавиатурой и электронным маховичком. Эргономичная панель управления *DMG SLIMine* обеспечивает операторам с ростом от 1,50 м до 1,90 м оптимальное удобство в работе.

Математическое обеспечение осуществляет поддержку оператора в сфере *ShopFloor*. Эту поддержку, прежде всего, обеспечивает интегрированное математическое обеспечение *ShopMill* устройства управления от *SIEMENS*, текстовый диалог и программатор *MAPPS IV* от *MORI SEIKI*. Математическое обеспечение ускоряет путь от чертежа до готовой детали, кроме того, оно обеспечивает режим управления инструментом и режим наладки с графической поддержкой, и обширные функции диагностики, также имеющие графическую поддержку.

Дополнительные устройства обрабатывающего центра – шпиндель-двигатель, устройство для измерения деталей, стеклянная измерительная линейка перемещений по осям *X/Y/Z*, система сканирования инструментов для измерения и диагностирования качества инструментов (рис. 4.34).

Станок имеет высокостабильную конструкцию *C-Frame* (рамы) 1 повышенной жесткости, изготовленной из чугуна с осью *X* в столе 2.

Мощный фрезерный водоохлаждаемый шпиндель-двигатель на 8000 мин<sup>-1</sup> 3 с крутящим моментом 83 НМ, инструментальный магазин 4 на 20 позиций, скорость подачи инструмента 25 м/мин, время смены инструмента 1,6 с. Центр оснащен современной системой управления 5 с 3D-симуляцией и графической поддержкой при настройке и диагностике. Система управления оснащена современными 3D-CNC-устройствами управления от *SIE-*

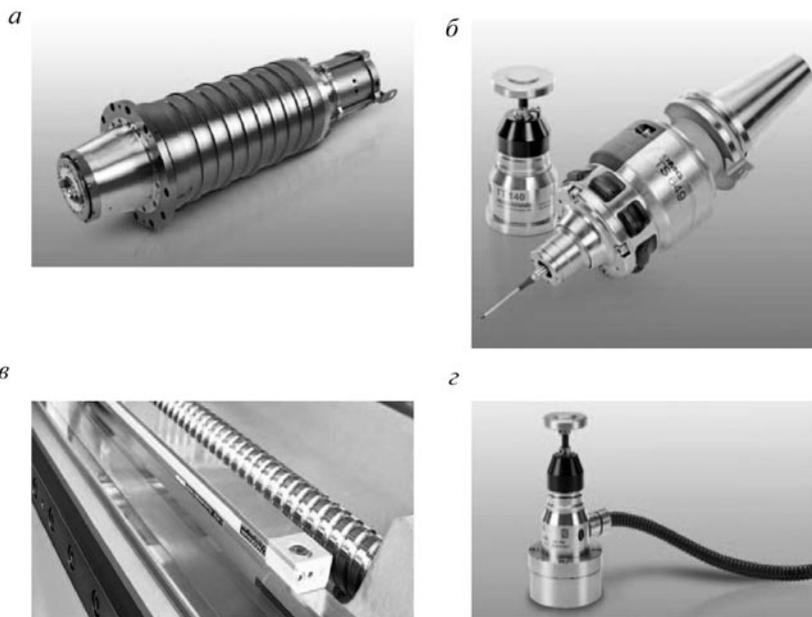


Рис. 4.34. Дополнительные устройства обрабатывающего центра:  
*а* – шпиндель-двигатель; *б* – устройство для измерения деталей; *в* – стеклянная измерительная линейка; *г* – система сканирования инструментов

Сравнительные графики мощностных характеристик стандартного шпинделя и шпиндель-двигателя приведены на рис. 4.35.

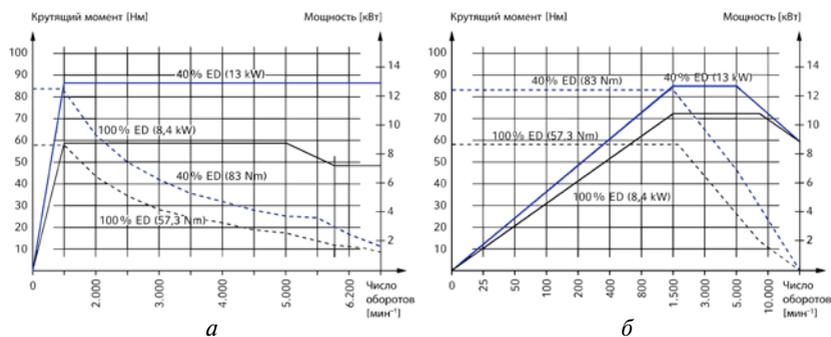


Рис. 4.35 Графики мощностных характеристик:  
*а* – стандартный шпиндель; *б* – шпиндель-двигатель

Технические характеристики обрабатывающего центра *DMC V eco* приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

### Технические характеристики

Тип станка		<i>DMC 635 V eco</i>	<i>DMC 1035 V eco</i>
Диапазон измерений			
Перемещение по оси <i>X</i>	мм	635	1035
Перемещение по оси <i>Y</i>	мм	510	560
Перемещение по оси <i>Z</i>	мм	460	510
Подача			
Усилие подачи	н	4000	4000
Скорость подачи	м/мин	20	20
Ускоренный ход	м/мин	25	25
Точность позиционирования			
<i>R</i> тах согл <i>VDI/DGO 3441</i> (непрямая/прямая система измерения перемещений)	мм	0,020/0,008	0,020/0,008
<i>R</i> тах согл <i>JSB6330-1980</i> (непрямая/прямая система измерения перемещений)	мм	0,010/0,005	0,010/0,005
Рабочий шпиндель			
Диапазон числа оборотов, тах	мин <sup>-1</sup>	8000/10 000	8000/10 000
Мощность привода (40/100% ЕД)	кВт	13/8,4	13/8,4
Крутящий момент (40/100% ЕД)	Нм	83/57	83/57
Управление			
Панель управления <i>DMG SLIMine</i> с <i>Siemens 8100 powerline</i> и <i>ShopMill</i>			
Панель управления <i>DMG SLIMine</i> с <i>HEIDENHAIN TNC 620</i> и текстовым диалогом			
<i>MAPPS IV</i> от <i>MORI SEKI</i>			

#### 4.1.6. Интеллектуальные мехатронные и робототехнические системы

Интеллектуализация мехатронных и робототехнических систем подразумевает построение технических систем, способных выполнять функции, которые, если бы их выполнял человек, считались бы интеллектуальными, т. е. требовали бы от человека его естественного интеллекта. Интеллект технических систем принято называть «искусственный интеллект». В последние годы все более четко прорисовываются области конкретного применения и реальные возможности интеллектуальных технологий – это, прежде всего, сложные (меха-

тронные) объекты и большие физико-технические и организационные системы, для которых доступно описание только на вербальном (или семиотическом) уровне.

Для таких объектов и систем характерны следующие признаки [19]:

- сложность формального описания объекта и задач управления с учетом погрешностей необходимых вычислений и измерений;
- нечеткость целей функционирования и задач управления;
- нестационарность параметров объекта и условий функционирования;
- невозпроизводимость поведения объектов и систем при повторных испытаниях;
- наличие случайных воздействий внешней среды;
- искажение поступающей входной информации в каналах дистанционной передачи данных.

Поэтому интеллектуализация сложных (мехатронных) систем осуществляется путем использования широкого класса физических эффектов для разработки встроенных сенсорных, измерительно-информационных систем и приводов различной физической природы, а также создания интеллектуального человеко-машинного интерфейса. Однако основным направлением интеллектуализации является создание *интеллектуальных систем управления*, априорно способных функционировать в условиях неполноты и нечеткости исходной информации, неопределенности внешних возмущений и среды функционирования за счет работы со специальными знаниями (п. 2.2) в той или иной предметной области. Для решения неформальных задач интеллектуального управления целесообразно и необходимо привлекать методы и технологии искусственного интеллекта.

Общая проблематика и круг прикладных задач теории искусственного интеллекта отображены на рис. 4.36 [19].

Предложенные формы представления знаний, способы их извлечения и пополнения, варианты организации логического вывода успешно реализуются в широком спектре различных практических приложений — экспертных и диагностических системах, системах планирования и поддержки принятия решений, вопросно-ответных и обучающих системах, средствах аннотирования и перевода естественно-языковых текстов, шахматных программах и ряде других.

Интеллектуальные системы управления мехатронными системами базируются на двух основных идеях: управление на основе анализа внешних ситуаций (*ситуационное управление*) и использование со-

временных *информационных технологий обработки знаний*. Существует, по крайней мере, пять различных информационных технологий: *экспертные системы, нечеткая логика, нейронные структуры, эволюционные (генетические) алгоритмы и ассоциативная память*.



Рис. 4.36. Общая проблематика теории искусственного интеллекта

Суть метода ситуационного управления состоит в том, что каждому классу ситуаций, возникновение которых считается допустимым в процессе функционирования системы, ставится в соответствие некоторое решение по управлению (управляющее воздействие, программно-алгоритмическая управляющая процедура и т. д.). Тогда сложившаяся ситуация, определяемая текущим состоянием как самого объекта, так и его внешней среды и идентифицируемая с помощью измерительно-информационных средств, может быть отнесена к некоторому классу, для которого требуемое управление уже считается известным (рис. 4.37).

Таким образом, практическая реализация концепции ситуационного управления на основе современных интеллектуальных технологий предполагает наличие развернутой базы знаний о принципах построения и целях функционирования системы, специфике исполь-

зования различных алгоритмов, особенностях исполнительных механизмов и управляемого объекта. В этом случае классификационный анализ имеющихся знаний с учетом текущих показаний измерительно-информационных средств должен обеспечивать параметрическую и структурную настройку управляющих алгоритмов, модификацию программы достижения целей управления или их коррекцию.

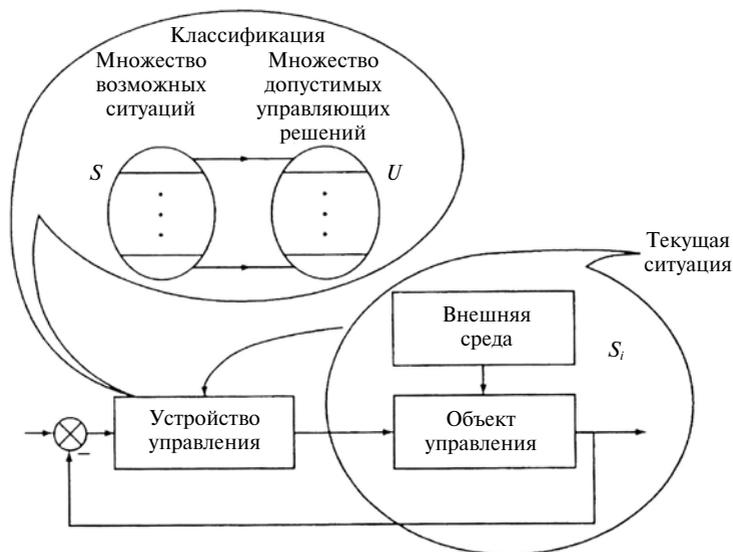


Рис. 4.37. Реализация принципов ситуационного управления

Важно отметить, что главная архитектурная особенность, которая отличает интеллектуальную систему управления (рис. 4.38) от построенной по «традиционной» схеме, связана с подключением механизмов хранения и обработки знаний для реализации способностей по выполнению требуемых функций в неполнозаданных (или неопределенных) условиях при случайном характере внешних возмущений. К возмущениям подобного рода могут относиться непредусмотренное изменение целей, эксплуатационных характеристик системы и объекта управления, параметров внешней среды и т. д. Кроме того, состав системы при необходимости дополняется средствами самообучения, обеспечивающими обобщение накапливаемого опыта, и на этой основе – пополнение знаний.

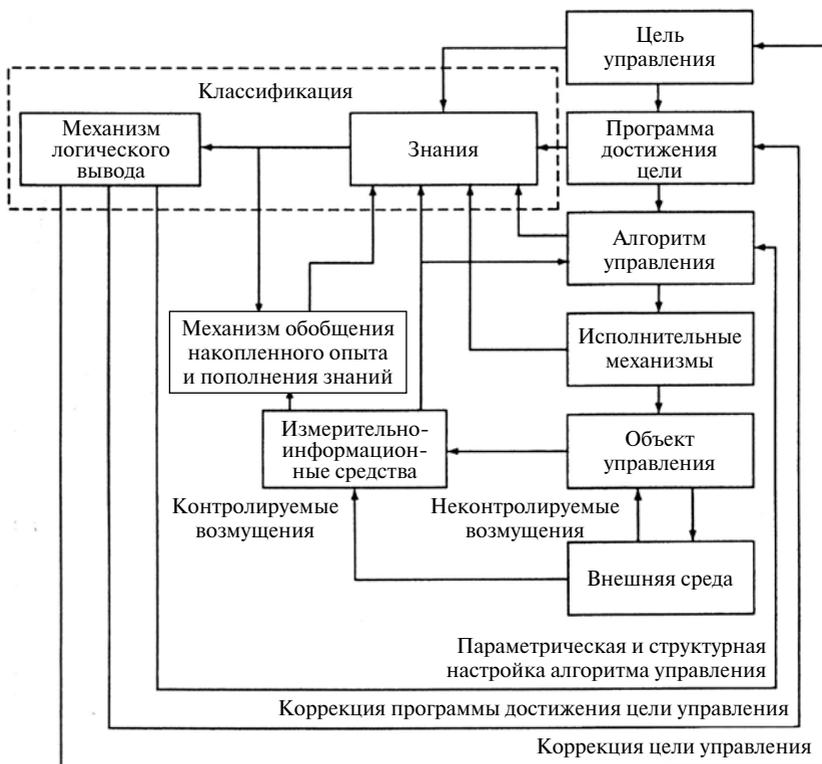


Рис. 4.38. Обобщенная структура интеллектуальной системы управления

В общем случае объект управления может иметь достаточно сложную конструкцию, включающую в свой состав ряд функционально-подчиненных подсистем. Иерархия их подчинения обуславливает декомпозицию исходных целей и задач управления на рекурсивную последовательность вложенных составляющих. В конечном итоге такое разделение предполагает многоуровневую организацию системы управления, обладающей развитыми интеллектуальными возможностями по анализу и распознаванию обстановки, формированию стратегии целесообразного поведения, планированию последовательности действий, а также синтезу исполнительных законов, удовлетворяющих заданным показателям качества. Структура интеллектуальной системы управления сложным динамическим объектом должна соответствовать иерархическому принципу построения и включать страте-

гический, тактический и исполнительный (приводной) уровни, а также комплекс необходимых измерительно-информационных средств (рис. 4.39).



Рис. 4.39. Иерархическое построение системы интеллектуального управления сложным динамическим объектом

Корректность замыкания отдельных контуров иерархии управления определяется тем составом функциональных элементов, которые обеспечивают требуемую адекватность информационной поддержки в процессе сбора и обобщения сенсорных данных о текущем состоянии и воздействиях внешнего мира. Таким образом, организация каждого уровня интеллектуального управления предполагает использование уникальной совокупности собственных моделей представления знаний, информационной поддержки, описания контролируемого объекта и т. д.

Следует подчеркнуть, что принцип иерархического построения систем управления сложными динамическими объектами сам по себе

далеко не оригинален. Так, например, в целом ряде монографий, опубликованных на рубеже конца 70-х начала 80-х гг., подобная идея неоднократно обсуждалась применительно к проблемам управления многофункциональными роботами вообще и обладающими «элементами искусственного интеллекта» в частности. В последнем случае интеллектуальные функции, которые ограничивались задачами «восприятия, распознавания и моделирования обстановки» с последующим «принятием решения на выполнение той или иной операции», концентрировались исключительно на «высшем» уровне иерархии, венчающем исполнительную, тактическую и стратегическую ступени управления.

С учетом последних достижений в области искусственного интеллекта и смежных научных направлений сферу прикладного применения методов и технологий обработки знаний в решении задач управления можно и нужно подвергнуть существенному пересмотру. Его основная суть заключается в кардинальном изменении точки зрения на роль и место современных интеллектуальных технологий в организации иерархического управления сложными динамическими объектами.

Главным отличием новой концепции иерархического построения систем управления сложными динамическими объектами является использование методов и технологий искусственного интеллекта в качестве основных средств борьбы с неопределенностью внешней среды. Необходимость интеллектуализации каждого из уровней управления обусловлена подверженностью выполняемых ими функций влиянию различных факторов неопределенности. Практическое воплощение этой концепции предполагает избирательное использование тех или иных технологий обработки знаний в зависимости от специфики решаемых задач, особенностей управляемого объекта, его функционального назначения, условий эксплуатации и т. д.

Далее рассмотрим специфические вопросы управления мобильными роботами. Напомним, что в разделе 4.1.2 была описана система управления приводом транспортного мини-робота. В данном же разделе рассматривается общая система управления движением робота по неизвестной местности.

Основное отличие системы управления передвижением роботов от управления манипуляторами заключается в неизмеримо большей рабочей зоне и ее неопределенности [3].

Рассмотрим такие особенности применительно к мобильным роботам, передвивающимся по произвольной местности. В данном слу-

чае модель внешней среды представляет собой карту местности, которая помимо априорных сведений составляется и уточняется в ходе движения на основе сенсорной информации (радиотехнические, лазерные, ультразвуковые локаторы, системы технического зрения). Такая модель должна иметь как минимум два уровня по масштабу: первый – в пределах достигаемости сенсорных систем, второй – непосредственно перед роботом.

Модель первого уровня местности служит для прокладки маршрута движения в соответствии с заданной целью. Это задача навигации. Варианты целей:

- поиск конкретных объектов (по заданным признакам);
- достижение определенной точки на местности, заданной координатами;
- движение по заданному маршруту, например, для выполнения определенной технологической операции (инспекция, нанесения покрытия, очистка и т. д.).

Вторая, более подробная модель ближайшего участка местности необходима для уточнения маршрута непосредственно перед роботом с учетом препятствий, не отмеченных на карте местности первого уровня. В целом – это задача обеспечения безопасности движения.

Для гарантированного решения последней задачи может потребоваться специальная система обеспечения безопасности, которая контролирует:

- углы наклона шасси робота, не допуская превышения их критических значений, определяемых условиями опрокидывания;
- опасные вертикальные провалы и трещины непосредственно перед роботом;
- оценивает свойства грунта в отношении его проходимости;
- обеспечивает аварийную остановку робота по сигналу дистанционного или контактного датчика препятствий, возникающих непосредственно перед роботом.

Типовая схема системы управления движением мобильного робота приведена на рис. 4.40.

Блок управления движением (БУД) осуществляет управление тяговыми приводами и приводами поворота шасси. Блок планирования движения осуществляет построение траектории движения, оптимизируя ее по минимуму расхода энергии, что особенно важно для роботов с автономным энергопитанием, или по минимуму времени выполнения задания, когда в постановку задачи входит условие обеспечения максимального быстродействия.

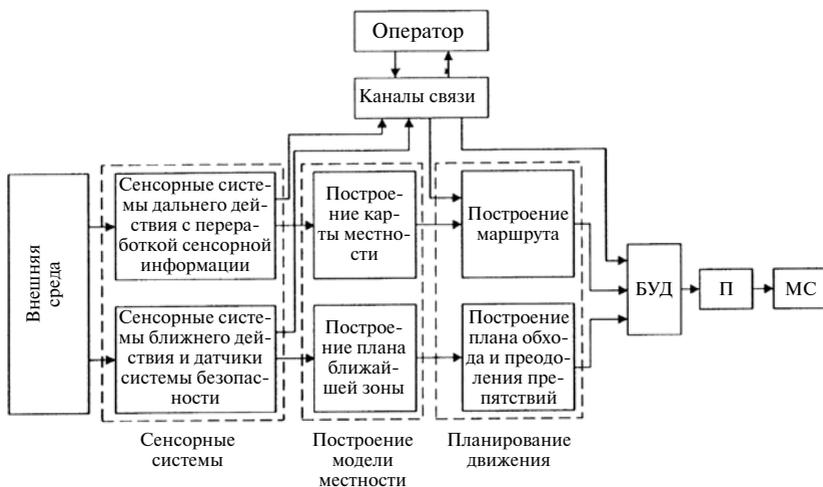


Рис. 4.40. Функциональная схема управления движением по местности мобильного робота:

БУД – блок управления движением; П – приводы;  
 МС – механическая система

Блок построения модели местности представляет ее в форме, удобной для решения задачи синтеза траектории движения с выделением непреодолимых препятствий и опасных или неясных участков.

Если выполнение задачи требует знания большего участка местности, чем дают сенсорные системы в начальном положении робота, т. е. до начала движения, карта местности формируется и передается в блок планирования фрагментами по мере передвижения робота. В этом случае первое приближение для всей траектории делается по имеющейся априорной информации о местности или, как минимум, определяется только общее направление движения.

На нижнем общесистемном уровне системы находится канал управления движением в ближней зоне, включающей в себя наиболее детальную модель этой зоны и реализующий алгоритмы обеспечения безопасности движения.

Требуемый уровень адаптации и искусственного интеллекта системы определяется степенью неопределенности и сложности местности, а также характером подлежащих выполнению заданий. В последнем отношении основное значение имеет минимально необходимая степень автономности управления роботом, определяемая перечнем его

действий, которые должны выполняться без участия человека-оператора. При этом учитывается и возможность временной потери связи с оператором, ограниченная пропускная способность каналов связи, неполнота и ограниченная достоверность получаемой оператором от робота информации и ее задержка во времени. Например, если из-за высокого уровня помех в канале передачи оператор не получает изображения панорамы местности перед роботом или только эпизодически получает эту информацию, он имеет возможность вмешиваться в автономное движение робота только для контроля и корректировки маршрута движения путем целеуказания отдельных промежуточных точек трассы в моменты ее достоверного наблюдения.

В качестве конкретного примера приведем систему управления автономного транспортного робота [20].

На кафедре «Проблемы управления» (МГТУ МИРЭА – Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики) разработан автономный транспортный робот с интеллектуальной системой управления, позволяющий обследовать труднодоступные скрытые полости, например, при проведении геолого-разведывательных работ или инспекции трубопроводов. Помимо этого данный робот можно широко использовать в учебном процессе и в различных научно-исследовательских работах, например, в разработке и исследовании алгоритмов группового управления. Данный робот обладает небольшими габаритами и массой, но при этом имеет возможность относительно длительного времени работы, а также перемещения без каких-либо затруднений по неровной поверхности под различными углами к плоскости горизонта.

Отличительной особенностью конструкции является ее модульность, обеспечивающая быструю замену любого узла как в случае выхода из строя, так и при наделении робота дополнительными возможностями, например, замены гусеничного привода на колесный и т. д. Модульность конструкции достигается за счет унификации стыковочных узлов на механическом, аппаратном и программном уровнях. Разработанная конструкция состоит из семи основных узлов (рис. 4.41):

- мехатронный модуль привода правый;
- мехатронный модуль привода левый;
- модуль питания;
- модуль навигационной системы;
- модуль поведенческой системы управления;
- модуль технического зрения передний;
- модуль технического зрения задний.

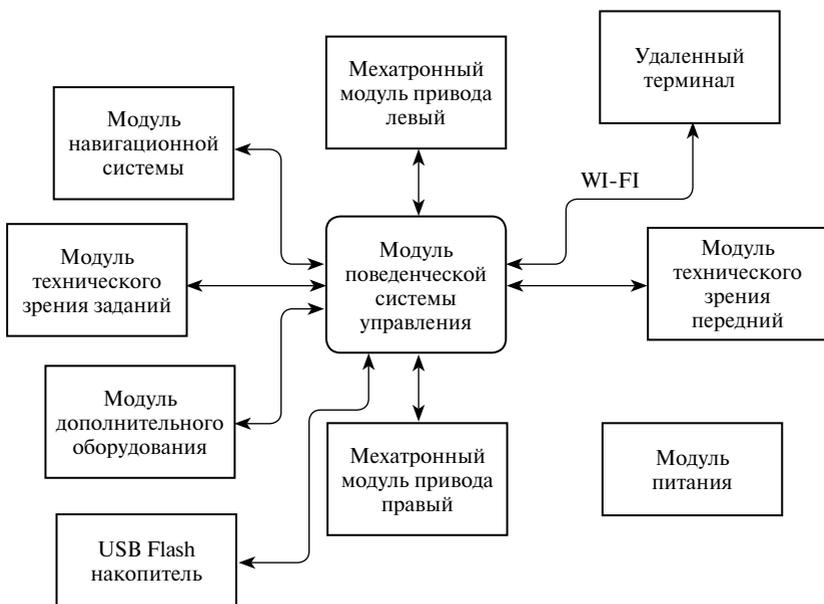


Рис. 4.41. Обобщенная структурная схема системы управления автономного мобильного робота

В мехатронные модули приводов кроме исполнительных двигателей и датчиков конструктивно входят собственные системы управления, обменивающиеся данными с верхним уровнем управления с помощью специализированного протокола. Данная конструкция легко может быть заменена без изменения программы верхнего уровня управления, например, гусеничный модуль на колесный, один модуль на другой с большими или меньшими габаритами и т. д. Это достигается за счет того, что обмен, передача данных на исполнение и отчет о выполнении задания (фактически заданная скорость движения и пройденное расстояние) задаются в абсолютных величинах в системе СИ, вследствие чего она не привязана к типу приводного узла.

В качестве питающих элементов данного робота применяются *LiPo* аккумуляторы, состоящие из трех – шести банок и общим напряжением от 12 до 24 В. В зависимости от задачи имеется возможность установки АКБ различной емкости от 1300 до 2400 мАч. Помимо этого робот может быть запитан и от стандартного сетевого адаптера. Переключение между источниками питания, а также заряд и мониторинг

АКБ осуществляет модуль питания, который программируется под конкретный тип АКБ. Так же модуль питания осуществляет оценку оставшегося времени работы, которое передает системе управления поведенческого уровня.

Навигационная система, входящая в состав малогабаритного автономного мобильного робота, включает в себя следующие датчики:

- трехкоординатные акселерометры;
- трехкоординатные датчики угловой скорости;
- трехкоординатные датчики магнитного поля;
- двухкоординатный инклинометр;
- барометрический высотомер;
- *GPS*.

В качестве вычислителя для сбора и анализа информации со всех этих датчиков используется цифровой сигнальный процессор, с аппаратной поддержкой операций с плавающей точкой и тактовой частотой 150 МГц – *TMS320F28335*, производства компании TI. Навигационная система позволяет оценивать абсолютные величины положения и ориентации в пространстве. В основе данной оценки лежит алгоритм определения координат за минимальное время (время, за которое ошибка крайне мала) и сопоставление его с пройденным путем по инкрементным датчикам, установленным в модуле привода, с последующей остановкой робота и обнуления всех значений. Робот может вычислять величину проскальзывания и наклон к плоскости горизонта.

В основе модуля поведенческой системы управления установлен серийно выпускаемый одноплатный компьютер, под управлением операционной системы *Linux Debian 2.6.24*. Это обеспечивает помимо гибкости программного обеспечения возможность быстрой модернизации вычислительных средств, по мере выпуска новых аппаратных версий. Этот модуль содержит процессор *PXA270* с тактовой частотой до 520 МГц, производимый компанией *Intel*, 128 Мб ОЗУ, 512 Мб *flash* памяти, беспроводной модуль 802.11b (*Wi-Fi*), 3 *USB* порта и 4 порта *RS-232*, *CIF* интерфейс, *Ethernet*.

В состав системы технического зрения входит цифровая фото / видеокамера, лазерный модуль и система подсветки окружающей обстановки. *2MPix* фото / видеокамера позволяет получать цифровые фотоснимки высокого разрешения и видеопоток меньшего качества. Угол обзора объектива составляет 120°. Выделенный отдельно на структурной схеме *USB Flash* накопитель, предназначен для сохранения видео, фотоизображений, а также результатов выполненного

задания на стандартном, легкоъемном носителе информации. Лазерный модуль излучает структурированную линию в поле зрения камеры и позволяет выделять препятствия и оценивать дальность до них, места для осуществления маневров, текущую ориентацию относительно предметов и т. д.

Для управления роботом было разработано программное обеспечение, как для бортовых систем, так и для удаленного терминала, позволяющее функционировать в трех основных режимах:

- автоматическом. При этом оператор загружает задание и запускает робота, после выполнения задания робот возвращается и оператором осуществляется съем и анализ полученных данных (телеметрии, построенной карты, данных о радиолокационной обстановке и т. д.);
- ручном. В этом режиме управление роботом полностью осуществляется оператором, который наблюдает за всем происходящим непосредственно на удаленном терминале;
- полуавтоматическом (режим целеуказаний). Оператор в зоне видимости робота указывает точку, к которой робот движется с обходом препятствий. После выхода в точку робот ждет нового задания.

Таблица 4.3

**Технические характеристики макетного образца автономного мобильного робота**

Максимальная скорость движения	20 см/с
Время непрерывной работы	1 час
Время предстартовой подготовки	10 мин
Точность позиционирования (построение карты)	10 см
Видео	640×480@25fps
Фото	1600×1200@5fps
Канал связи	802,11b (802,11g)
Максимальный наклон к плоскости горизонта	30°
Высота преодолеваемого препятствия (не менее)	20 мм
Габариты	
Длина	146,4 мм
Ширина	74 мм
Высота	62,1 мм
масса	0,8 кг

#### 4.1.7. Дистанционное управление мобильными мехатронными системами

Несмотря на очевидные успехи в создании автономных мобильных мехатронных (робототехнических) систем, по всей видимости, в ближайшее время не будут разработаны автономные мобильные системы полностью независимые от человека. Во всяком случае, сохранится управление со стороны человека-оператора на уровне постановки цели. При этом необходимость постоянной кабельной или радиосвязи существенно ограничивает область применения мобильной системы, даже при оснащении ее системой технического зрения, т. к. при этом не исчезает необходимость удаленной системы управления.



Рис. 4.42. Общая структура мобильного РТК

В качестве примера приведем общую структуру мобильного робототехнического комплекса (РТК), который включает в себя:

- мобильный робот Pioneer 3-DX;
- следящую систему технического зрения (ССТЗ);
- портативный персональный компьютер для удаленного контроля и управления РТК;
- подвижный целевой объект [21] (рис. 4.42).

Разработана обобщенная структура построения системы управления робототехническими устройствами на основе следящей системы технического зрения и нечеткой логики (рис. 4.43).

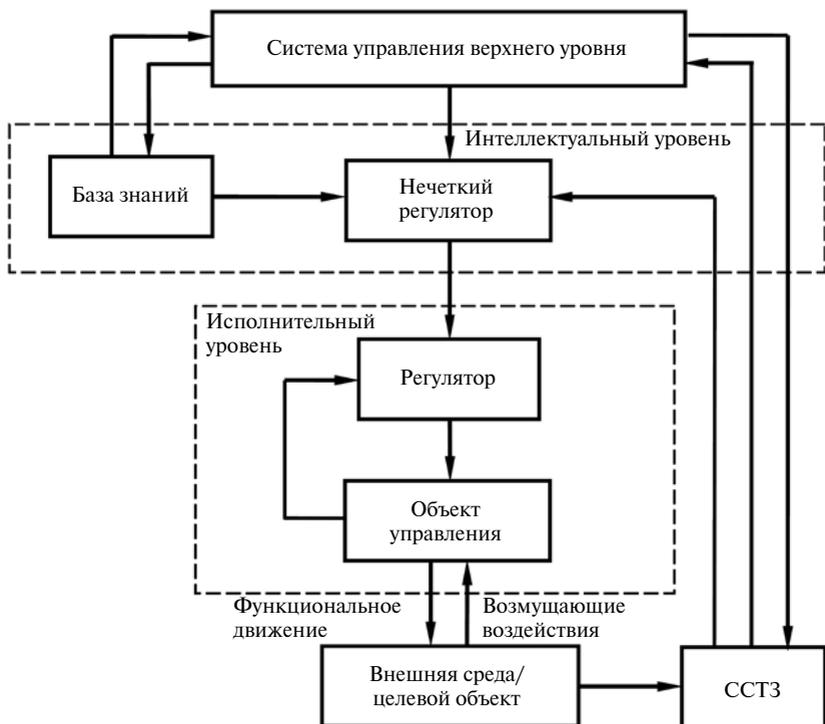


Рис. 4.43. Обобщенная структура системы управления робототехническими системами на основе метода нечеткой логики и ССТЗ

В начальный момент действия робототехнической системы оператор (либо система управления верхнего уровня) определяют целевой объект слежения и последовательность выполнения элементарных операций для каждого объекта.

Нечеткий регулятор в соответствии с заданной операцией и соответствующим набором продукционных правил из базы знаний выполняет необходимые действия.

При разработке алгоритмического обеспечения системы применен метод локального слежения, позволяющий реализовать обработку цифровых изображений при осуществлении слежения за движущимися объектами в режиме реального времени.

Основная идея предлагаемого метода заключается в том, что определение положения подвижного целевого объекта в области кадра изображения осуществляется путем отслеживания перемещения ха-

рактрных признаков объекта в пределах некоторой локальной области, содержащей эти признаки.

Структурная схема и основные элементы следящей системы технического зрения (ССТЗ) показаны на рис. 4.44 и 4.45.

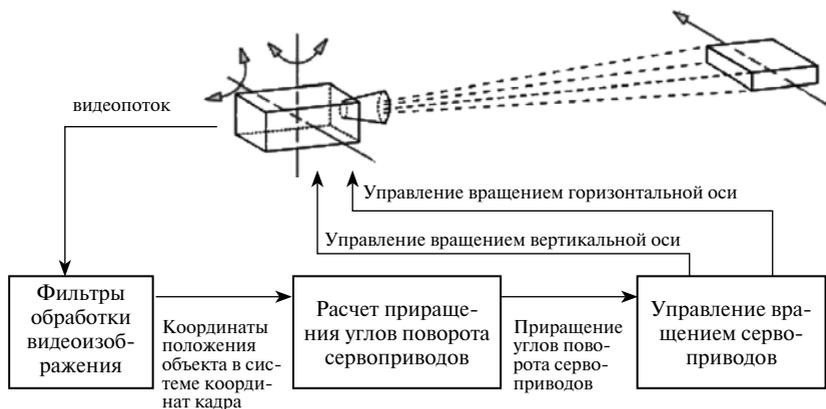


Рис. 4.44. Структурная схема ССТЗ

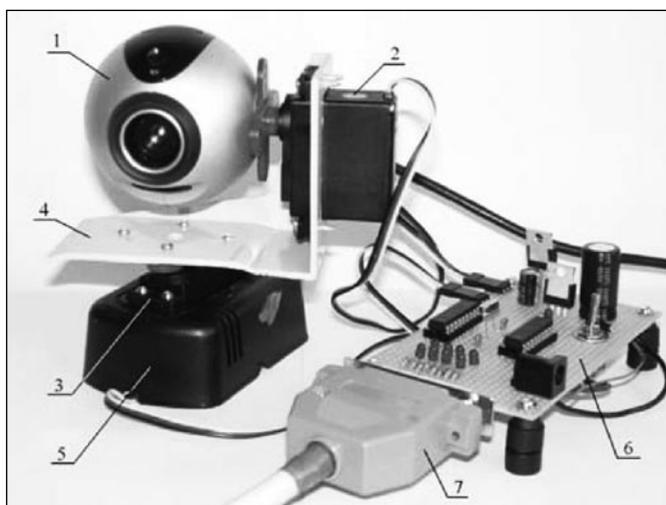


Рис. 4.45. Основные элементы ССТЗ:

1 – видеочамера, 2 – привод вращения чамеры вокруг горизонтальной оси, 3 – индикаторы, 4 – монтажная площадка, 5 – привод вращения чамеры вокруг вертикальной оси, 6 – контроллер, 7 – контактор

Управляющая программа, основной задачей которой является получение и обработка видеоизображения, управление серводвигателями видеокамеры, осуществление нечетко логического вывода и управление движением мобильного РТК, состоит из двух частей: *серверной* и *клиентской*. Серверная часть расположена на базе мобильного робота, клиентская – на портативном персональном компьютере. Связь между ними реализована по схеме «клиент – сервер».

Структурные схемы сервера и клиента управляющей программы приведены на рис. 4.46, а и 4.46, б.

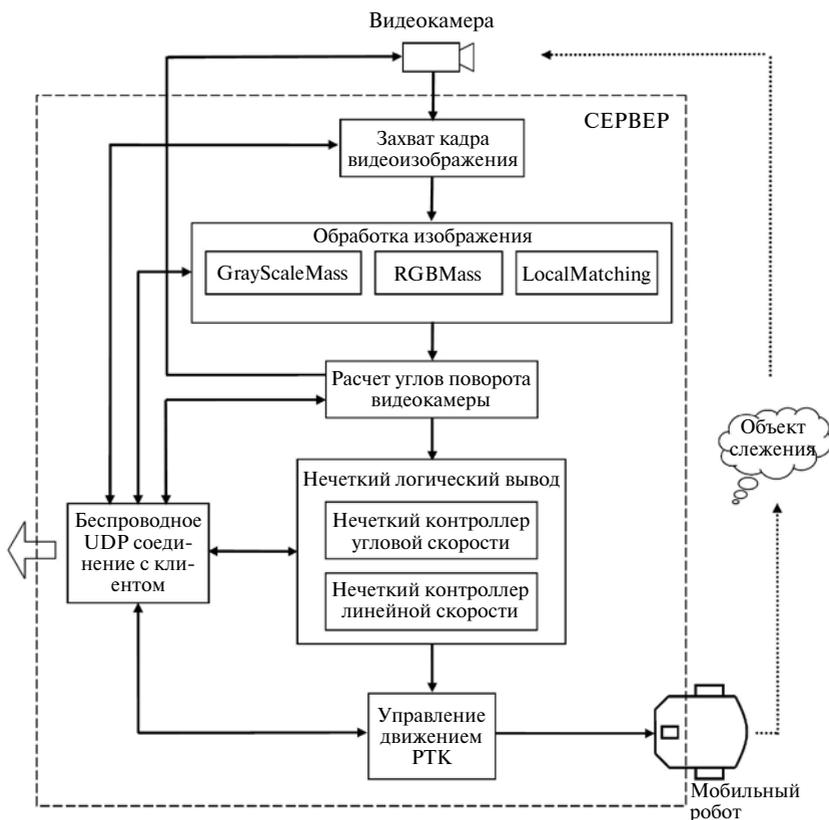


Рис. 4.46, а. Структурная схема сервера

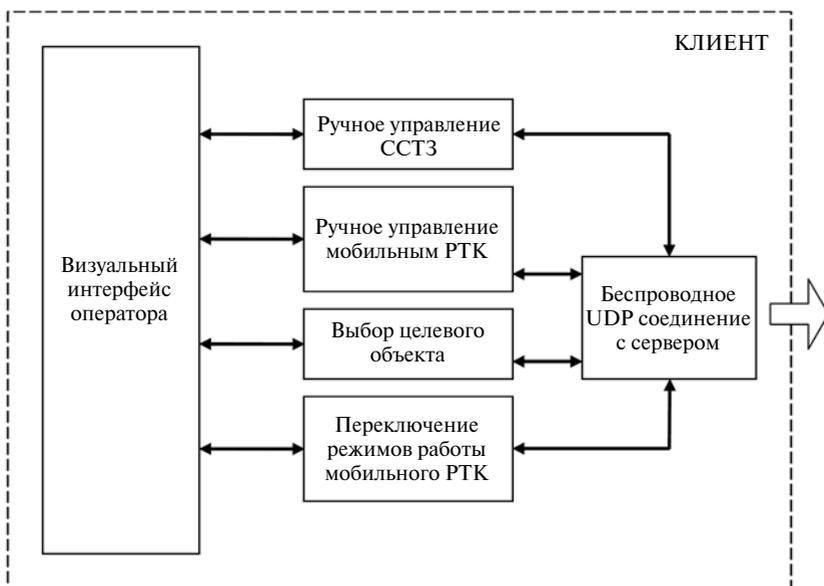


Рис. 4.46, б. Структурная схема клиента

Использование Интернет-технологий в мехатронике и робототехнике открывает новые перспективы в развитии распределенных систем управления и мониторинга. Дистанционное управление мехатронными объектами с использованием Интернета является наиболее перспективным, но вместе с тем сложным для практической реализации [1].

Обобщенная схема системы управления мобильным роботом по глобальной сети представлена на рис. 4.47 [1].

По этой схеме можно организовать эффективное управление мобильными роботами в различных условиях внешней среды с использованием коммуникационного ресурса Интернета и удобным пользовательским интерфейсом.

Рассмотрим более подробно две основные части системы – мобильный робот с бортовой системой управления и *web*-интерфейс.

Преобразователь информации выполняет функцию преобразования унифицированных команд верхнего уровня управления, поступающих от человекомашинного интерфейса системы, в команды для тактического уровня управления.

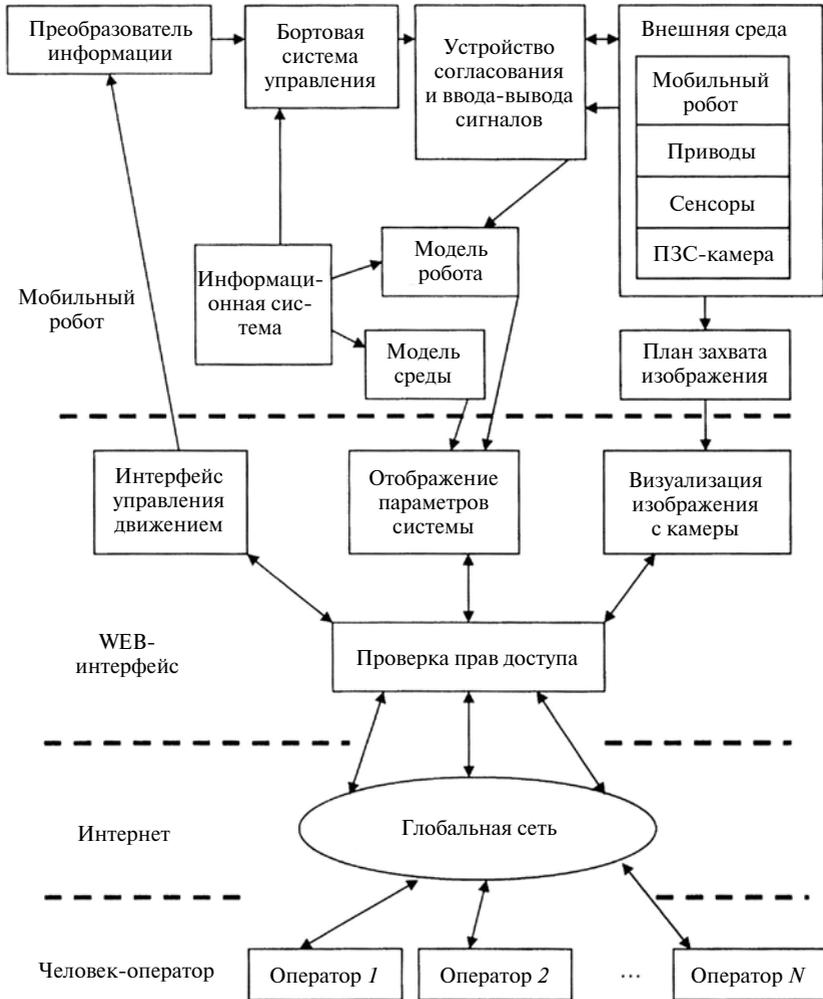


Рис. 4.47. Обобщенная схема системы дистанционного управления мобильным роботом по сети Интернет

Информационная система навигации мобильного робота выполняет функцию сбора и обработки данных с датчиков пройденного пути, скорости и ускорения, датчиков наличия препятствий и пр. Обработка данных позволяет выдавать информацию о текущем положении и скорости движения робота, наличии препятствий, расстоянии до них и т. п. Значения этих навигационных переменных использу-

ются системой управления тактического уровня, а также позволяют сформировать модель робота и окружающей среды для отображения параметров системы на мониторе оператора.

Бортовая система управления уровня должна обладать высокой степенью интеллектуальности на тактическом уровне. В ее задачи входит:

- формирование команд для исполнительных приводов робота;
- корректировка команд с учетом текущих параметров Интернет-соединения и прогноза возникновения критических ситуаций;
- автоматическая остановка движения и переход в режим ожидания при потере управляющих воздействий от оператора.

Устройства согласования и ввода-вывода сигналов обеспечивают работу системы на исполнительном уровне управления. Они осуществляют усиление сигналов, сбор данных, выдачу управляющих воздействий на приводы робота. Плата захвата изображений необходима для ввода изображения с ПЗС-камеры в бортовой компьютер, в случае использования нескольких камер осуществляется также синхронизация их работы.

Основными функциональными блоками *web*-интерфейса являются интерфейсы управления движением, отображения параметров системы и передачи видеоизображения.

Интерфейс управления движением предоставляет оператору возможность нажатия кнопки на экране монитора, как разрешение на начало движения, остановку, поворот, изменение скорости. При дистанционном управлении через Интернет возникает техническое противоречие. С одной стороны, оператор для правильного и своевременного принятия решения должен иметь максимально полную информацию о состоянии робота и окружающей его среды; с другой – при увеличении объема передаваемой оператору информации увеличиваются временные задержки, оператор может не успеть среагировать на изменение внешних условий или состояния робота.

Предлагаемая методика взаимодействия оператора с роботом посредством сети Интернет предусматривает:

- 1) унификацию команд верхнего уровня управления (команд оператора);
- 2) максимально возможное упрощение ввода управляющих воздействий оператором;
- 3) реализацию управления в виде команд, задающих относительное или абсолютное приращение к текущему значению параметра;

4) отображение параметров системы на мониторе оператора с обязательным подтверждением принятия команд к исполнению и наличием индикаторов опасных ситуаций.

Для уменьшения загрузки канала связи при взаимодействии оператора с роботом предлагается уменьшить объем передаваемых управляющих воздействий за счет использования CGI-интерфейса. Алгоритм работы системы с использованием интерфейса CGI включает следующие основные этапы:

1. Клиент устанавливает соединение с web-сервером через стандартный браузер (например, *Microsoft Internet Explorer*).

2. Браузер клиента передает серверу HTTP-запрос.

3. Web-сервер анализирует запрос по расширению и выясняет, что это запрос не статической страницы, а запрос к CGI-скрипту.

4. При обнаружении указанного в запросе CGI-приложения и наличии прав на запуск web-сервер запускает приложение.

5. CGI-скрипт выполняет необходимые действия и в результате взаимодействия с приложением формирует ответные данные, выводит их в стандартный поток ввода-вывода. Web-сервер передает эти данные клиенту. Причем CGI-скрипт может передавать не только HTML-данные, но и бинарные данные, таким образом полностью формируется HTTP-ответ.

6. Web-сервер разрывает соединение, завершая тем самым обмен.

На основе анализа эффективности различных языков программирования при разработке CGI-приложений в качестве основной среды разработки был выбран язык графического программирования *LabVIEW™ (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* – рабочее место проектирования лабораторных виртуальных приборов).

*LabVIEW* – это мощный, полнофункциональный язык программирования, работающий на платформах: PC под управлением *Microsoft Windows*, компьютеров *Apple Macintosh*, рабочих станций *Sun SPARCstations*, *Concurrent PowerMax* и *HP-UX*. *LabVIEW* отстает от последовательной природы традиционных языков программирования и отличается графической программной средой и инструментарием, необходимым для сбора данных, анализа и представления результатов. С помощью базиса *LabVIEW* – графического языка программирования, именуемого «G», можно создавать программы в виде блок-диаграмм, которые позволяют более адекватно воспринимать «текст» программы, облегчают ее отладку, модернизацию, поиск и корректировку ошибок. После написания программы в виде блок-диаграммы *LabVIEW* преобразует ее в машинный код.

*LabVIEW* объединяет сбор, анализ и представление информации в один комплекс («сквозная» технология программирования). Для получения данных и управления приборами *LabVIEW* поддерживает протоколы *RS-232 / 422*, *IEEE 488 (GRIB)* и *VXI*, включая функции *Virtual Instrument Software Architecture (VISA)*, а также встраиваемые платы сбора данных. В состав пакета входит инструментальная библиотека с драйверами для сотен приборов, что значительно упрощает приложения управления приборами. Обширная библиотека для анализа данных содержит функции: генерации сигналов, их обработки, фильтрации, статистической оценки, линейной алгебры и операции с массивами. Пакет *LabView* является графическим по своей природе и обеспечивает такие средства визуализации, как создание таблиц, приборных индикаторов, двухмерных графиков и трехмерных изображений.

В числе других достоинств *LabVIEW* можно отметить возможность встраивания в блок диаграммы подпрограмм пользователя, написанных на традиционных «текстовых» языках программирования (Си, С++, *Pascal*, *Visual Basic*), компилированных в виде динамически подключаемых библиотек, а также скриптов, написанных в широко распространенной среде *MatLab*. Это позволяет обеспечить преемственность программного обеспечения и исключает необходимость повторной разработки ранее созданных подпрограмм.

Решающими аргументами в пользу *LabVIEW* при выборе средства разработки были следующие преимущества:

1. Возможность разработки *CGI*-приложений, что позволяет реализовать концепцию интеграции программного обеспечения web-сервера с управляющей роботом программой.

2. Поддержка операционной системы жесткого реального времени *LabVIEW RT*, что позволяет осуществлять разработку кода, а также мониторинг и отладку программы в среде *LabVIEW* под управлением операционной системы *Microsoft Windows*, а затем загрузить созданный код на компьютер (бортовой контроллер), работающий под управлением операционной системы жесткого реального времени.

3. Наличие в дополнительной библиотеке «*Internet Developers for G Yoolkit*» встроенного *G web*-сервера – базисного компонента, позволяющего на его основе разрабатывать Интернет-приложения.

Схема управления мобильным роботом «ИРИС-1» по сети Интернет, предназначенным для инспекции и ремонта подземных трубопроводов различного назначения, приведена на рис. 4.48 [1].



Рис. 4.48. Управление мобильным роботом «ИРИС-1» по сети Интернет

В ходе экспериментальных исследований было осуществлено подключение аппаратной части, а также разработано программное обеспечение системы дистанционного управления мобильным роботом с использованием сети Интернет.

Основными частями разработанного программного комплекса являются управляющая роботом программа и *CGI*-модуль. Разработаны методы, позволяющие осуществить интеграцию этих двух частей таким образом, что с помощью *CGI*-модуля оператор имеет возможность запускать и останавливать управляющую программу, а также изменять значения ее переменных. За счет такой интеграции удалось значительно повысить скорость обработки команд оператора, а следовательно, и надежность системы дистанционного управления, работающей в условиях нестабильности канала связи – сети Интернет и возможных непредсказуемых изменений в окружающей мобильный робот среде.

Оператору предоставляется возможность давать команду «старт/стоп», изменять скорость и направление движения робота. Текущие значения сигналов с датчиков отображаются в виде графиков, стрелочных и цифровых индикаторов на динамически обновляемую *web*-страницу на мониторе оператора. Реализована также передача видеозображения с камеры, которой оборудован мобильный робот.

## 4.2. Примеры реализации больших современных мехатронных систем

---

---

Примеры современных мехатронных и робототехнических комплексов и систем различного назначения будут приведены в следующих подразделах.

### 4.2.1. Управление движением автомобильного транспорта

---

---

В работе [22] предлагается макромодель активного управления магистральными и городскими транспортными сетями.

Автомобильные заторы в городах являются причиной длительных задержек, пониженной производительности труда, неэкономного расхода бензина и чрезмерного загрязнения окружающей среды. Стремительный рост числа автомобилей на дорогах, стоимость земли и проблемы экологии делают задачу расширения существующих дорог и строительство новых в густонаселенных городах все более трудновыполнимой. Активное управление транспортной сетью (АУТС) – это эффективная борьба с повторяющимися изо дня в день и внезапно возникающими заторами, учитывающая конкретные для данного времени года и суток условия и не требующая физического увеличения пропускной способности дорог. АУТС использует автоматизированные системы управления дорожным движением (АСУД), а также вмешательство диспетчера для как можно большей оптимизации организации работы транспортной сети (рис. 4.49).

АУТС представляет собой циклический процесс, состоящий из следующих элементов. Элемент (1) заключается в измерении транспортного потока и анализе полученных данных, без которых управление транспортной сетью будет беспомощным и практически невозможным. Данные измерений транспортных потоков, как собранные за относительно длительный период (несколько месяцев или лет), так и поступающие в реальном времени, позволяют создать базу для работы с аналитической моделью АУТС. Элемент (2) состоит в оперативном планировании, которое включает в себя изучение поведения транспортной сети при возможных сценариях (таких, например, как плохая погода, ДТП, дорожные работы, специальные мероприятия, увеличение спроса и т. п.), а также разработку стратегий управления, призванных увеличить продуктивность транспортной сети и оценку пригодности

разработанных стратегий с точки зрения их стоимости и потенциальной эффективности. Элемент (3) состоит во внедрении наиболее обещающих стратегий непосредственно на магистралях путем установки необходимого оборудования и программного обеспечения. И, наконец, элемент (4) заключается в наличии работающей системы поддержки принятия решений, которая осуществляет фильтрацию поступающих в реальном времени измерений, прогнозирует поведение транспортной системы на ближайшие несколько часов и помогает диспетчеру выбрать стратегию управления, наиболее соответствующую ситуации.

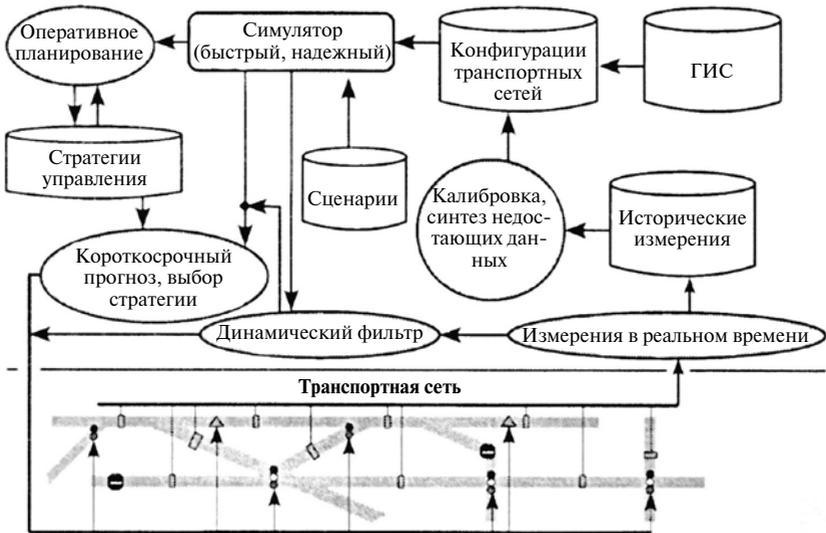


Рис. 4.49. Схема работы АУТС

В основе работы АУТС лежит коммуникационная сеть, по которой в центр сбора информации и управления пересылаются данные измерений с дорожных датчиков и, в свою очередь, команды АСУД или диспетчеров передаются на управляющие устройства, установленные на перекрестках городских улиц и автострадах. Центральным элементом схемы АУТС является «быстрый и надежный симулятор». Надежность симулятора обусловливается теоретически обоснованной транспортной моделью, адекватно отображающей ситуацию на дороге, для идентификации параметров которой достаточно лишь существующих измерений. В качестве кандидата в такие симуляторы нами предлагается основанная на модели Даганзо система *Aurora Road Net-*

*work Modeler (RNM)* — бесплатный программный пакет для моделирования и симуляций автомобильного движения на автострадах и городских улицах со светофорами на перекрестках.

Высокая скорость симуляций транспортных сетей должна позволить диспетчеру проанализировать десятки возможных оперативных стратегий в течение нескольких минут. Микромоделирование таким требованиям не отвечает. По этой причине предлагается использовать макромоделирование, которое кроме быстроты вычислений оказывается еще и надежным: во-первых, потому, что адекватно отображает поведение транспортной сети, и, во-вторых, потому, что параметры макромодели можно напрямую идентифицировать по данным измерений. При наличии же необходимых измерений, калибровка предлагаемой макромодели уже не требует особого искусства. При этом возможное отсутствие измерений на въездах и съездах конкретной автострады может частично компенсироваться синтезом отсутствующих данных.

Симулятор может работать в трех режимах. Первый из них, режим *оперативного планирования*, используется для прогона большого числа симуляций, тестирующих различные сценарии и потенциальные меры по улучшению дорожного движения. Сценарии могут включать перераспределение транспортных потоков из-за возможных дорожных работ, особых мероприятий или ДТП, уменьшение максимальной пропускной способности дорог из-за плохой погоды и т. п. Конфигурации дорожных сетей и структуры возможных систем управления сохраняются в соответствующих базах данных, которые используются в механизме поддержки принятия решений. Второй режим работы — это *динамическая фильтрация*: симуляция системы с неопределенностью в параметрах модели и входных данных. Она используется для корректировки измерений, поступающих в реальном времени с дорожных датчиков. Отфильтрованные через динамическую модель измерения используются для организации обратной связи в соответствующих алгоритмах управления транспортным потоком. В третьем режиме *прогнозирования ближайшего будущего и выбора оперативной стратегии*, исходя из начальных условий, полученных фильтрацией текущих измерений, вычисляются множества достижимости состояния транспортной сети при вероятных сценариях и возможных стратегиях управления для ближайших нескольких часов. Диспетчер выбирает наиболее подходящую из предлагаемых оперативных стратегий и вводит ее в действие посылкой соответствующих команд на управляющие устройства.

Для улучшения процесса калибровки модели необходимо разработать механизм оценки качества используемых измерений, так как параметры модели могут быть правильно идентифицированы лишь на основе данных с исправных датчиков.

Для оперативного планирования необходимо подразделять модулируемый в макроскопической среде транспортный поток на классы, как, например, общественный транспорт (автобусы, троллейбусы), тяжелые грузовики, обычные автомобили и т. п., отдельные из которых могут использовать полосы специального назначения. Другие задачи состоят в быстром приблизительном расчете эмиссий и потребления бензина, а также возможном влиянии оплаты проезда на транспортную ситуацию.

В области управления транспортным потоком стоит подробнее изучить такие существующие на сегодняшний день противоречивые технологии, как динамическое ограничение скорости, с точки зрения улучшения продуктивности транспортной сети. Также интересной задачей является координация регуляторов потоков при въездах на автострады с сигналами светофоров на ближайших крупных городских перекрестках. Цель — выработка оперативных стратегий управления автострады и окружающих городских улиц как единой системы.

Важным элементом полностью функционального динамического фильтра является автоматический детектор сбоев для датчиков, работающий в реальном времени.

Фирма *SIEMENS* (Германия) разработала централизованную систему управления движением на автомагистралях *SITRAFFIC Conduct+* современного семейства систем *SITRAFFIC*. Система построена по модульному принципу. При этом в центре внимания находятся не определенные технологии, а исключительно желаемые функциональные возможности. Таким образом можно постепенно расширять систему, в любом порядке изменяя ее размер и включая любые функциональные возможности.

*SITRAFFIC Conduct+* является системой универсального назначения. Она управляет переключаемыми дорожными указателями и знаками так же, как постоянными световыми сигналами и шлагбаумами. Кроме того, она предоставляет важные сведения службам дорожной информации и может включать в себя системы сбора пошлин за проезд по платным дорогам, видеонаблюдение, аварийную сигнализацию и любые системы сбора данных об окружающей среде и дорожном движении, а также обо всех транспортно-технических устройствах автомобильного тоннеля. Естественно, эта система легко совмести-

ма с соседними постами централизованного управления дорожным движением и с разного рода дорожными узлами связи. Таким образом, система *SITRAFFIC Conduct+* подходит не только для классической загородной автомагистрали, но и для крупных дорожных систем внутри города с транспортными развязками на разных уровнях.

Система *UTC (Urban Traffic Control)* производства компании *SIEMENS* является ключевым элементом в управлении движением городского транспорта. Компания предлагает широкий спектр решений: от одиночного процессора до всеобъемлющего интегрированного комплекса, включающего оборудование, располагающееся на улицах, и взаимодополняющие подсистемы, объединенные в единую сеть. Системы *UTC* могут работать как отдельные системы или же как часть более крупной системы управления и контроля движения городского транспорта (*UTMC – Urban Traffic Management and Control*), связанной с системой *Comet* и другими транспортными системами управления дорожным движением и информирования. Гибкость системы позволяет инженерам управлять и следить за дорожным движением на обширной территории, сочетая традиционные средства регулирования движения с множеством дополнительных функций для достижения максимальной эффективности. Система *UTC* дает возможность инженеру по управлению транспортом следующий ряд возможностей для достижения максимальной отдачи от любой применяемой технологии:

- адаптивное управление *SCOOT*;
- приоритет общественного транспорта;
- зеленые волны на маршруте следования спецтранспорта;
- управление и навигация парковкой автомобилей;
- светофорное регулирование с фиксированными временными настройками с возможностью автоматического выбора сигнального плана;
- наблюдение за транспортным потоком;
- выявление очередей и заторов;
- контроль приливной волны транспорта;
- мониторинг загрязнения окружающей среды.

Последняя версия системы *UTC* сочетает испытанную систему адаптивного управления дорожным движением *SCOOT* с повышенной функциональностью передового пользовательского интерфейса компании *SIEMENS*, работающие на базе персонального компьютера. Зарекомендовавшее себя программное обеспечение *UTC SCOOT* компании *SIEMENS* в сочетании с операционной системой *Microsoft Win-*

*dows* представляет собой гибкое решение для удовлетворения потребностей поставщика услуг в любом населенном пункте: от маленького городка до крупнейшего мегаполиса. Внедрение системы *PC SCOOT* позволяет осуществлять экономически эффективную системную интеграцию и унифицировать аппаратные устройства широкого ряда систем управления и контроля дорожным движением. Это, в свою очередь, снижает требования к техническому обслуживанию и делает возможным внедрение более широкого ряда решений по управлению дорожным движением.

#### 4.2.2. Инновационные системы железнодорожной автоматики

---

---

Фирмой *SIEMENS* разработана Европейская система управления движением железнодорожного транспорта (*ETCS*). Система *ETCS* имеет блочную структуру и включает в себя следующие подсистемы:

- диспетчерской централизации, которая позволяет регулировать и контролировать электрическую и релейную централизацию, а также имеет широкий набор автоматических функций (*Vicos OC 100, Vicos OC 500, Vicos CBTC*);
- электронной централизации (ЭЦ), которые осуществляют контроль и управление устройствами обеспечения безопасности и определяют взаимосвязь светофоров, стрелок и поездов (*Sicas, Sicas S7*);
- управления движения поездов – при автоматической работе система управления позволяет заменить машиниста и обеспечивает максимальную эффективность и адаптируемость;
- железнодорожной связи, обеспечивающие интерактивную связь между станцией, поездом и центром управления (*Railcom Manager, Airlink*);
- радиосистемы управления движением поездов – *Trainguard MT, Trainguard CBTC*;
- компоненты технических средств инфраструктуры пути: системы счетчиков осей, стрелочные приводы, светофоры, транспондеры, системы обнаружения свободности пути, системы ограждающих устройств на переезде;
- автоматические системы непрерывной (*Sacem, LZB700M*) и прерывистой (*Zub200, Imu100*) связи между поездом и железнодорожным путем.

Системы контроля движения поездов *Vicos OC 100* и *Vicos OC 500* предлагают широкий набор апробированных функций диспетчерской централизации, включая локальный пульт управления и центр автоматизированного контроля и управления.

Отказоустойчивая электронная система централизации *Sicas* применяется в системах массовых перевозок и на региональных железных дорогах всего мира, может включать в себя интегрированные функции централизации.

Радиосистема *Trainguard MT* использует беспроводную ЛВС — локальную вычислительную сеть (*COM*) для непрерывной связи (а также может использовать электронную систему централизации *Sicas*). Управление движением поездов требует бесперебойной работы системы, поэтому все компоненты беспроводной ЛВС обеспечены полным резервированием. Точки доступа к ЛВС, распределенные вдоль перегона, подключаются поочередно к двум независимым устройствам маршрутизации беспроводной ЛВС и перекрывают друг друга по диапазону дальности радиосвязи. Таким образом, полная дальность радиосвязи обеспечивается даже в случае неисправности каждой второй точки доступа.

*Railcom Manager* — замкнутая система видеонаблюдения и информационно-развлекательных программ в поездах. *Airlink* — беспроводной широкополосный канал радиосвязи разработан для сложных условий железнодорожного движения и может использоваться как на открытых линиях магистрального транспорта, так и в метро, туннелях или при смешанном движении.

Транспондер *Eurobalise S21* используется для периодической связи между станцией слежения и поездом. В системе транспондеров применяется система передачи на основе индуктивной связи и передаче данных с частотной манипуляцией. Существуют два типа транспондеров:

1. Транспондеры со стационарными данными являются пассивными элементами определения положения поезда без соединительного кабеля. Они передают только фиксированные блоки данных, которые сообщают проходящим поездам их абсолютное местоположение в сети.

2. Транспондеры переменных данных подключаются к светофору посредством путевого электронного блока. Путьевой электронный блок будет перепрограммировать телеграмму транспондера всякий раз, когда меняется показание подключенного светофора. При этом транспондер с переменными данными будет всегда передавать соот-

ветствующее значение движения согласно текущему показанию светофора.

Система счетчиков осей АСМ (*TVD*) используется в качестве надежной системы обнаружения свободности путей. *Trainguard MT* также позволяет применять системы обнаружения свободности путей других типов (например, рельсовые цепи).

Для точного определения положения поезда используется Допплеровский радиолокационный датчик, который измеряет скорость поезда по земле с помощью Допплеровского эффекта и импульсный генератор счетчика пробега, который измеряет расстояние путем подсчета числа импульсов, возникающих при повороте колеса.

С помощью интеллектуальных алгоритмов комбинирования датчика со встроенным вычислительным устройством обеспечивается точность определения скорости поезда и расстояния. Таким образом, система *Trainguard MT* удовлетворяет самым высоким требованиям к точности остановки  $\pm 30$  см и менее.

Устройство сигнализации включает:

- компактные комбинированные сигналы;
- светодиодные светофоры;
- световые указатели.

Управление работой стрелочных переводов включает:

- стрелочный привод *S 700 K*;
- встроенный в полую шпалу стрелочный привод *ITS 700*;
- стрелочный привод *Bsg.antr.9*;
- датчик контроля конечного положения *Switchguard ELP 319*;
- система местного управления стрелками *Siwes*;
- система диагностики неисправностей и отказов стрелок *Sidis W*;
- контрольный замок стрелки СКА.

Системы контроля свободности / занятости участков путей:

- система счета осей *Clearguard ACM 100*;
- тональная рельсовая цепь (с модульным построением диапазонов частоты и удаленным питанием) *FTG S*.

Устройства заграждения железнодорожных переездов:

- система заграждений железнодорожных переездов *Simis LC*;
- привод шлагбаумов *SIM 6*.

Эргономичный человеко-машинный интерфейс представляет собой многофункциональный пульт управления. Он включает в себя цветной TFT-дисплей с высоким разрешением, сенсорным экраном и звуковой обратной связью.

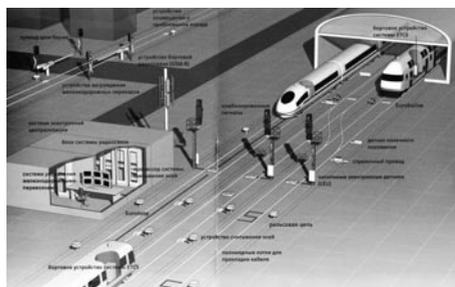
Отдельные аспекты Европейской системы управления движением железнодорожного транспорта (ETCS): *а* – технические средства контроля движения поездов; *б* – информационные системы; *в* – прерывистая и постоянная связь «поезд – путь» (рис. 4.50, *а*, *б*, *в*).

В [14] приведен обзор транспортных мехатронных систем, разработанных и эксплуатирующихся в России. Обзор касается основных видов транспорта: железнодорожного, автомобильного, воздушного и водного.

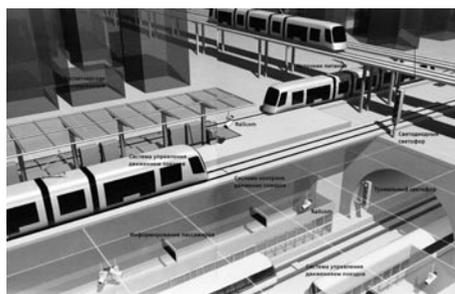
### 4.2.3. Электроэнергетика

В данном разделе будут рассмотрены основные аспекты построения и практического применения интеллектуальных сетей энергоснабжения [23].

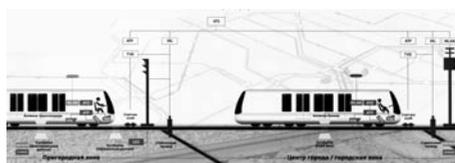
Сегодня термин «интеллектуальная сеть» (*IntelliGrid*) используется для описания технологий автоматической и быстрой локализации повреждений, восстановления энергоснабжения, мониторинга нагрузки, поддержания и восстановления устойчивости для более надежной выработки, передачи и распределения электроэнергии. Поставленные цели достигаются за счет использования микропроцессорных интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), которые обмениваются между собой данными для выполнения задач, прежде выполнявшихся людьми или не выполнявшихся вообще. Интеллектуальная сеть – это набор информационных источников и АСУ, которая управляет энергоснаб-



*а*



*б*



*в*

Рис. 4.50. Отдельные аспекты Европейской системы управления движением железнодорожного транспорта (ETCS)

жением, распознает изменение нагрузки и реагирует на них соответствующим образом.

Переход от существующей в настоящее время сети к интеллектуальной и ключевые различия между ними проиллюстрированы на рис. 4.51.

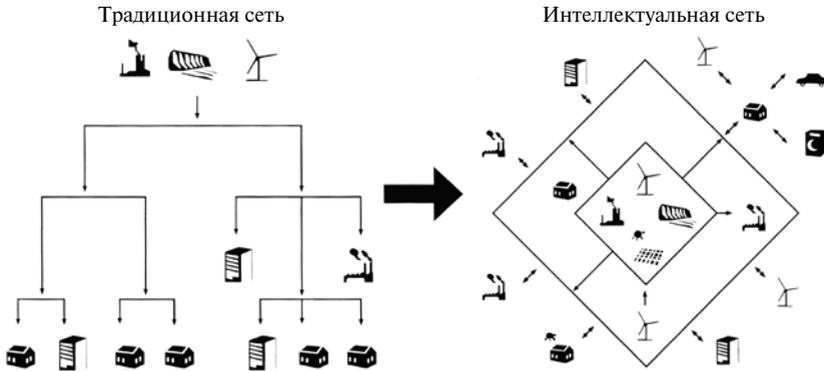


Рис. 4.51. Переход от современной к интеллектуальной сети энергоснабжения

Можно увидеть фундаментальный сдвиг в конструкции и эксплуатационной парадигме интеллектуальной сети: от централизованных ресурсов – к распределенным, от предсказуемых направлений потока энергии – к непредсказуемым направлениям, от пассивной сети – к активной. Сеть становится более динамичной по своей конфигурации и условиям функционирования, что представляет множество возможностей для оптимизации, но, вместе с тем, и множество новых технических проблем. Эта парадигма напоминает концепцию АКУ (аппарат конфигурируемого управления), которая широко применяется в конструировании динамичных мехатронных систем (например, в самолетостроении).

Сформулируем основные свойства интеллектуальных сетей:

- тесная интеграция различных источников энергии для удовлетворения нужд потребителей. В дополнение к энергии, вырабатываемой на основе атома, угля, гидроресурсов, жидкого топлива и газа энергия будет поступать от солнца, ветра, биомассы, приливов-отливов и других возобновляемых источников. Интеллектуальная сеть будет поддерживать не только централизованные крупные электростанции, но и распределенные

источники энергии масштаба места жительства. Эти возобновляемые и экологически чистые источники плавно интегрируются в основную сеть;

- быстрое накопление энергии за счет большого количества центров накопления энергии (стационарных и мобильных), которые позволяют сгладить пиковые нагрузки и неустойчивость ветряного и солнечного производства энергии. Недавняя разработка быстросрабатывающих систем накопления энергии на базе аккумуляторных батарей (*BESS*) с преобразователями напряжений (*VSC*) показала перспективу и возможные положительные эффекты накопления энергии;
- развитие подвижных (мобильных) источников и потребителей энергии. Прорывы в технологии изготовления батарей делают штепсельные электротранспортные средства (*EV*) коммерчески жизнеспособными. Десятки миллионов электротранспортных средств будут являться подвижными источниками и потребителями энергии. Они будут подключаться к сети на автостоянках. Системы батарей в этих транспортных средствах будут заряжаться или разряжаться посредством сложных координационных протоколов (или ИКТ-шлюзов — интегрированных информационных и коммуникационных технологий) с целью смягчения колебаний потребности в энергии в разных частях сети, предотвращения критического ограничения передачи энергии и обеспечения большей стабильности сети;
- широкое распределение производителей энергии из возобновляемых источников для усиления отказоустойчивости сети (например, при отключении питания);
- новые поколения токоорганизующих и прерывающих ток устройств, основанных на полупроводниковой технологии, трансформаторы, основанные на силовой электронике, гибкие системы передачи электроэнергии переменным током (*FACTS*), продвинутые прикладные программы в центрах управления создаются для защиты сети и изоляции неисправностей;
- распределенная система датчиков для непрерывного сбора данных о потреблении энергии конечными пользователями, о погоде и состоянии оборудования и эксплуатационных режимах;
- организация интерактивных и интеллектуальных приборов и узлов связи интеллектуальной сети у конечных пользователей для контроля ситуации энергопотребления с целью авто-

номного взаимодействия с сетью (определения циклов зарядки и разрядки штепсельных электротранспортных средств, бытовой техники и т. д.);

- гармоничное сочетание технологий использования переменного и постоянного тока. Такая архитектура гибридной сети (переменный / постоянной ток) для систем распределения делает сеть более гибкой и надежной;
- управление сетью в реальном масштабе времени.

В качестве примера рассмотрим программу развития энергосистемы *E-Energy*, которая разработана Федеральным Министерством экономики и технологий Германии (*BMW*) и реализуется в сотрудничестве с Федеральным Министерством охраны окружающей среды (*BMU*).

Эта программа, в частности, предлагает смену парадигм в электроэнергетике со схемы «генерация, ориентированная на потребление» на схему «потребление, ориентированное на генерацию» с помощью интегрированных информационных и коммуникационных технологий – ИКТ.

Компоненты программы *E-Energy* показаны на рис. 4.52.



Рис. 4.52. Программа *E-Energy* (Германия): компоненты программы

Благодаря решениям ИКТ *E-Energy* обеспечит интенсивное использование возобновляемых видов энергии и интеграцию автомобилей в объединенную энергосистему будущего.

В программе *E-DeMa* (рыночные стимулы снижения энергопотребления), которая является частью программы *E-Energy* для Рейнско-Рурского региона, исчезает термин «потребитель» и заменяется формулировкой «производящий потребитель». Под этим словосочетанием понимают абонента, который способен не только расходовать электроэнергию, но генерировать и продавать ее в энергосистему.

Для этого создается рынок *E-Energy 2020* на базе электрораспределительной сети, принадлежащей компании *RWE Rheinland Westfalen Netz AG*. Основная цель проекта – интегрировать в сеть производящих потребителей путем установки ИКТ-шлюзов, которые позволят не только менять режимы нагрузки, контролировать работу бытовых электроприборов и выполнять интеллектуальные измерения, но и управлять источниками питания (рис. 4.53).

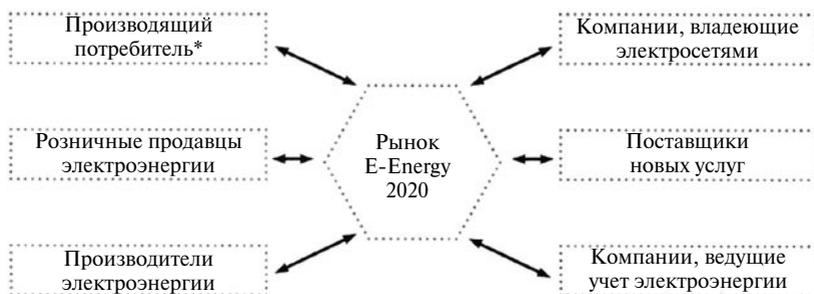


Рис. 4.53. Программа *E-Energy*: рынок *E-Energy*

\* – Потребитель, живущий в частном или многоквартирном доме и активно участвующий в рынке *E-Energy* как в роли производителя, так и в роли потребителя электроэнергии

«Интеллектуальное измерение – это процесс интеллектуальной записи данных об энергопотреблении. В нашем проекте мы предлагаем интегрировать интеллектуальные счетчики в интеллектуальный шлюз. Шлюз такого типа представляет собой функциональное устройство, которое является частью установленной у потребителя системы распределения электроэнергии. С одной стороны, шлюз выполняет функции считывания данных и контроля интеллектуальных счетчиков, а с другой – обрабатывает сигналы о цене, поступающие от энергоснабжающей компании. Потребители получают возможность

контролировать имеющиеся у них бытовые электроприборы таким образом, чтобы их эксплуатация оказалась наиболее экономичной», – пояснил координатор проекта *E-DeMa* Михаэль Ласковски.

Бытовые электроприборы в перспективе оснастят устройством, отображающим стоимость электроснабжения, соответственно потребители смогут выбрать наименьший тариф и более эффективно использовать электроэнергию. Информация о цене станет доступна абонентам благодаря стимулирующим программам, которые будут способствовать повышению энергоэффективности каждого дома.

Ввиду появления в перспективе новых энергоустановок, оснащенных двигателями Стерлинга, и топливных ячеек, одновременно генерирующих тепло- и электроэнергию, ИКТ-системы управления начнут приобретать все большее значение. Чтобы убедиться, что произведенная электроэнергия продается в сеть в наиболее выгодное время, потребитель посредством интеллектуального шлюза будет контролировать не только электропотребление, но и электроснабжение – на основе сигналов о цене, поступающих с рынка.

Потребители получают возможность настраивать все отображенные на рис. 4.54 функции на своих персональных компьютерах. Шлюз оснащен беспроводным интерфейсом, поэтому пользователи могут конфигурировать систему так, чтобы она соответствовала их индивидуальным потребностям. Непосредственное управление устройствами должно быть унифицировано, поэтому в проекте участвуют крупные производители оборудования.

Проект *E-DeMa* разделен на десять групп работ: восемь из них носят научно-технический характер (ГР 1–8), два – административный (ГР 9, ГР 10) (рис. 4.55).

Задачи отдельных групп работ:

ГР 1 – формирование общей схемы и теоретическое описание рынка *E-Energy* с юридической и экономической точек зрения. В данной группе работ задаются функциональные границы планируемых исследований в отношении правил рынка и параметров используемого оборудования. Результаты влияют на все остальные группы работ.

ГР 2 – моделирование и оптимизация инфраструктуры обмена данными между всеми участниками рынка *E-Energy*.

ГР 3 – разработка спецификации ИКТ-шлюза и подготовка соответствующего технического задания.

ГР 4 – реализация прототипа ИКТ-шлюза на основе спецификации и технического задания.

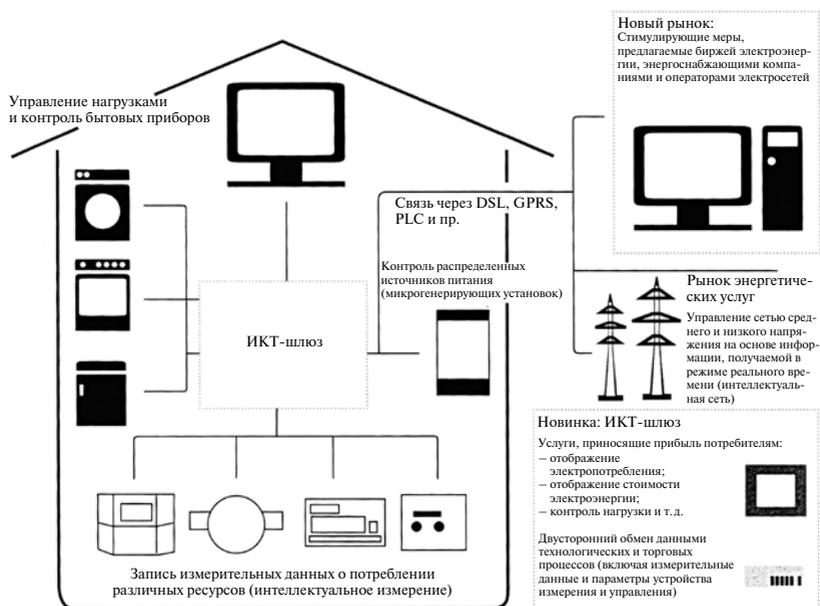


Рис. 4.54. Управление и контроль производящим потребителем электроэнергии с помощью ИКТ-шлюза

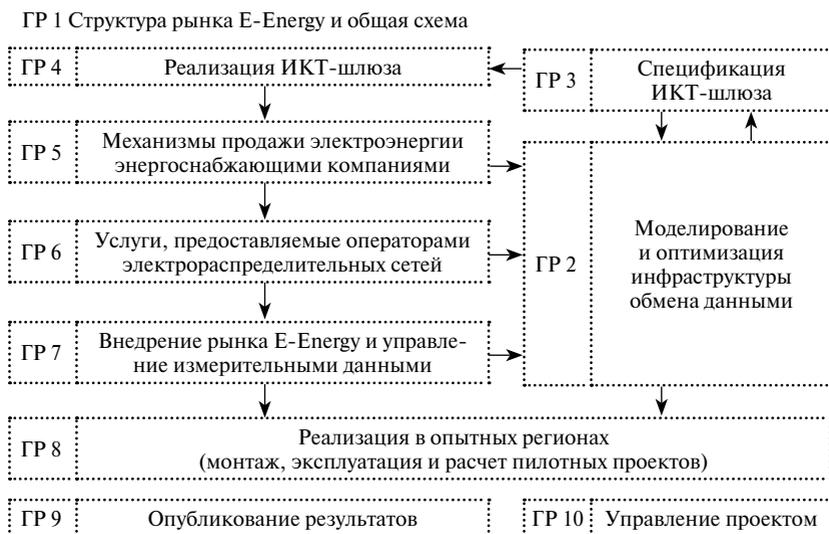


Рис. 4.55. Структура проекта E-DeMa

ГР 5 – создание правил рынка *E-Energy* с учетом используемого оборудования, бизнес-процессов и инструментов стимулирования.

ГР 6 – определение эффективности стимулирующих программ и усовершенствование информационной структуры электрораспределительных сетей.

ГР 7 – внедрение рынка *E-Energy*, подготовка, адаптация и интеграция систем управления измерительными данными.

ГР 8 – демонстрация результатов проекта в пилотном районе, включающем города Мюльхайм и Крефельд и состоящем из трех различных подрайонов с различными особенностями систем распределения электроэнергии.

ГР 9 – организация связей с общественностью.

ГР 10 – обеспечение плавной реализации проекта *E-DeMa* и обработка полученных результатов (управление проектом).

## Литература

---

1. *Подураев Ю. В.* Мехатроника : основы, методы, применение : Учеб. пособие для студентов вузов. — М. : Машиностроение, 2006. — 256 с.
2. *Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В.* Современный этап развития мехатроники и грядущая конвергенция с нанотехнологиями / Материалы 2-й Российской мультikonференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. — СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. — С. 9–21.
3. *Юревич Е.И.* Основы робототехники : учеб. пособие. — 3-е изд. — СПб. : БХВ — Петербург, 2010. — 368 с.
4. *Исии Т., Симояма И., Иноуэ Х. и др.* Мехатроника / Пер. с япон. — М. : Мир, 1988. — 318 с.
5. *Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.* Управление роботами, основы управления манипуляционными роботами : учеб. для вузов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — 400 с.
6. *Егоров О. Д., Подураев Ю. В.* Конструирование мехатронных модулей : учебник. — М. : НЦ МГТУ «СТАНКИН», 2004. — 360 с.
7. *Интеллектуальные системы автоматического управления / И. М. Макарова, В. М. Лохина.* — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 576 с.
8. *Лапота В. Н., Юревич Е. И.* Закономерности развития мехатроники и робототехники // Защита и безопасность. — 2008. — № 2 (45).
9. *Ильясов Б. Г., Даринцев О. В., Мунасыпов Р. А.* Основы микроробототехники : учеб. пособие. — Уфа : УГАТУ, 2004. — 161 с.
10. *Белов А. В.* Самоучитель по микропроцессорной технике. — 2-е изд. перераб. и доп. — СПб. : Наука и Техника, 2007. — 256 с.
11. *Семенов Б. Ю.* Микроконтроллеры *MSP430* : Первое знакомство. — М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2006. — 128 с.
12. *Норенков И. П., Кузьмик П. К.* Информационная поддержка наукоемких изделий. *CALS*-технологии. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 320 с.
13. *Готлиб Б. М.* Проектирование мехатронных систем. Ч. 1 Информационное обеспечение процесса проектирования мехатронных систем. — Екатеринбург : УрГУПС, 2007. — 115 с.

14. *Готлиб Б. М.* Введение в мехатронику. Т. 2. Проектирование и применение мехатронных модулей и систем : учеб. пособие. – Екатеринбург : УрГУПС, 2008. – 302 с.
15. *Каляев И. А.* Стратегии группового управления в распределенных системах / Материалы 3-й Российской мультikonференции по проблемам управления. Доклад на общем пленарном заседании. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – 16 с.
16. *Каляев И. А., Капустян С. Г.* Проблемы группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 6. – с. 35–40.
17. *Крайнов А. Ф.* Идеология конструирования. – М. : Машиностроение – 1, 2003. – 384 с.
18. *Конюх В. Л.* Основы робототехники. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 281 с.
19. *Макаров И. М.* Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов. – М. : Наука, 2006. – 333 с.
20. *Антипов О. А.* Малогабаритный транспортный робот / Материалы 2-й Российской мультikonференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 144–146.
21. *Баранов Д. Н.* Разработка интеллектуальной системы управления мобильными роботами на основе следящей системы технического зрения и нечеткой логики / Автореферат канд. дис. – М. : МГТУ «СТАНКИН», 2008.
22. *Куржанский А. А., Куржанский А. Б., Варайя П.* Активное управление транспортной сетью на основе макромоделли / Труды 3-й Российской мультikonференции по проблемам управления. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – 11 с.
23. *Интеллектуальная сеть : состояние и перспективы* / Сб. науч. статей, материалов и выступлений. – М. : ФСКЕЭС, 2011. – 83 с.

*Учебное издание*

**Готлиб Борис Михайлович**  
**Вакалюк Андрей Александрович**

**ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ**  
**«МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА»**

Курс лекций для студентов  
специальности 221000 –  
«Мехатроника и робототехника»

Редактор С. В. Пилюгина  
Верстка О. П. Игнатъевой

Подписано в печать 22.03.2012. Формат 60×84/16.  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 7,9.  
Тираж 100 экз. Заказ 66.

Издательство УрГУПС  
620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

