

# Механизация и автоматизация производства

## Практическое занятие

### Тема: Общие понятия о мехатронике и робототехнике

**Задание:** изучить основные теоретические вопросы и выполнить краткий конспект

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 нано-системам (порядка ста нанометров —  $10^{-7}$  м): переход «макро-микро- нано-мехатроника и -робототехника».

**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 микро-процессоры). 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 раз- мерностей, 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

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 отнестись 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.

# 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 минимально возможном 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:

- a) на модули движения (МД);
  - b) мехатронные модули движения (ММД);
  - c) 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].

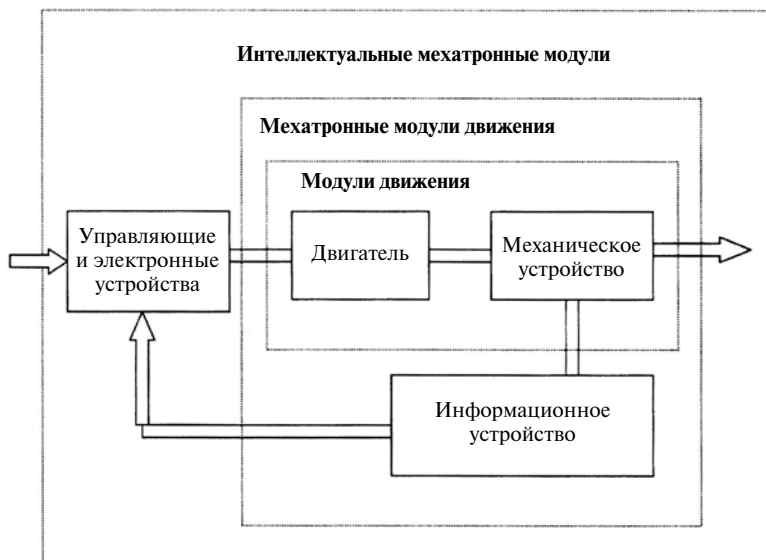


Рис. 2.1. Классификация мехатронных модулей

**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.



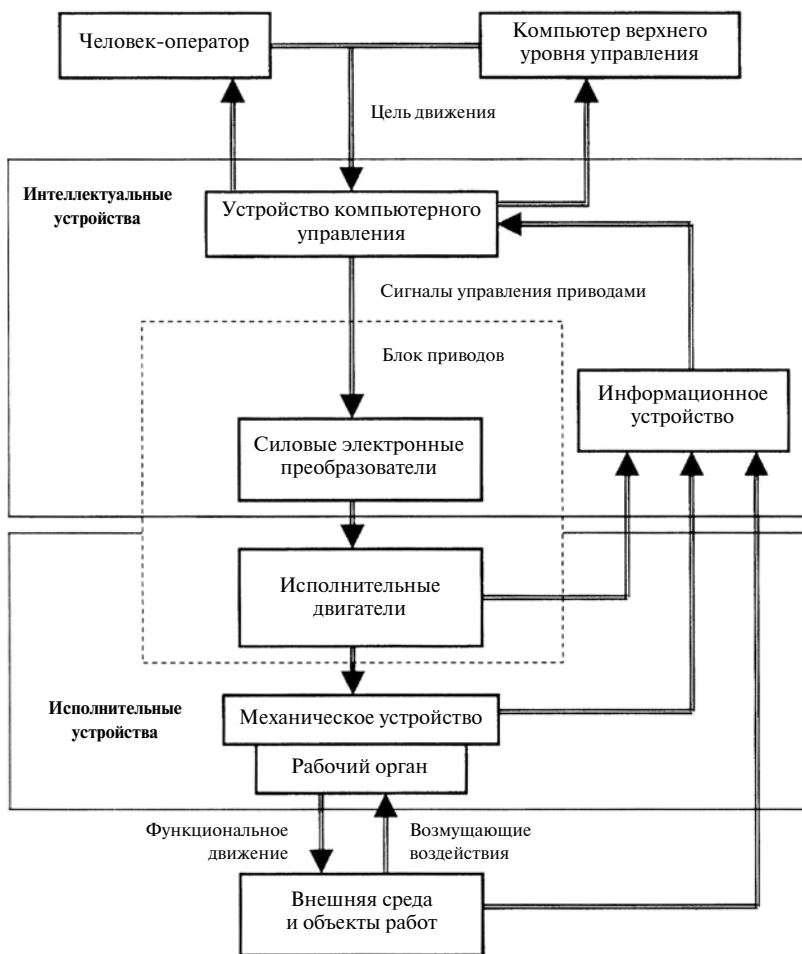


Рис. 2.2. Обобщенная структура мехатронных машин

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, магнитострикционные 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 микроустройств.



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.

# Технологическое обеспечение мехатронных и робототехнических систем

---

Технологическое 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.

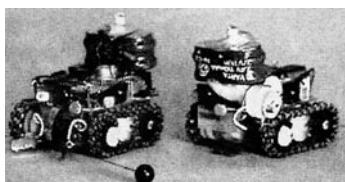
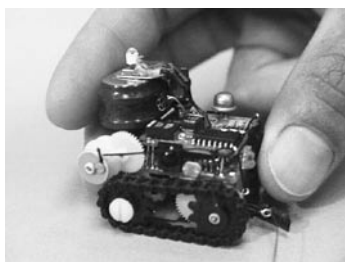


Рис. 3.5. Автономный мобильный микроробот *Ant* (*MIT Artificial Intelligence Lab*)

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 динамическими 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.

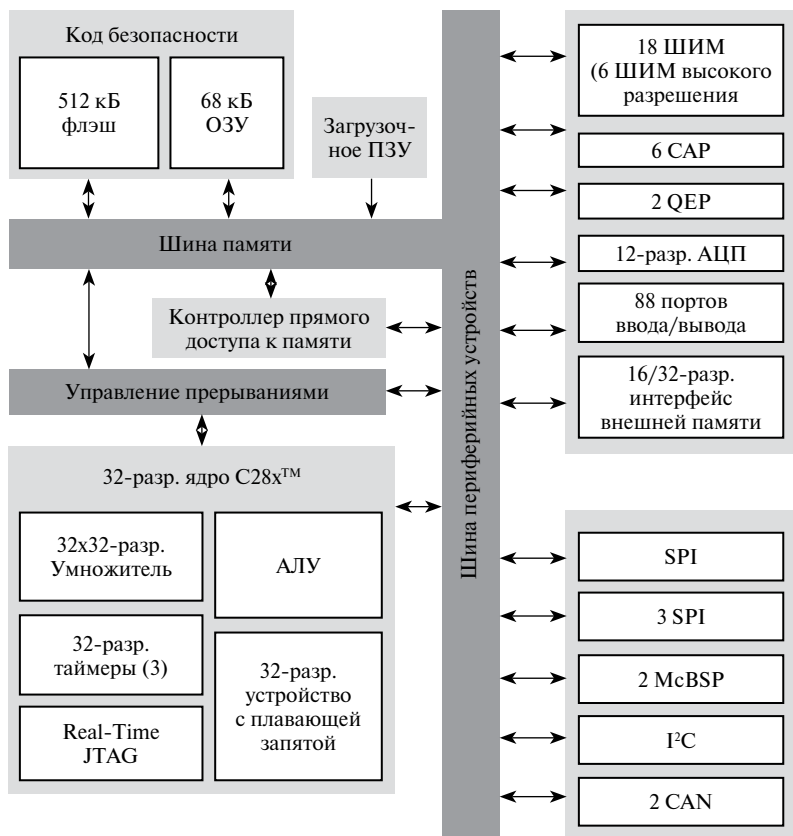


Рис. 3.7. Блок-схема архитектуры *TMS320F28335*

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].

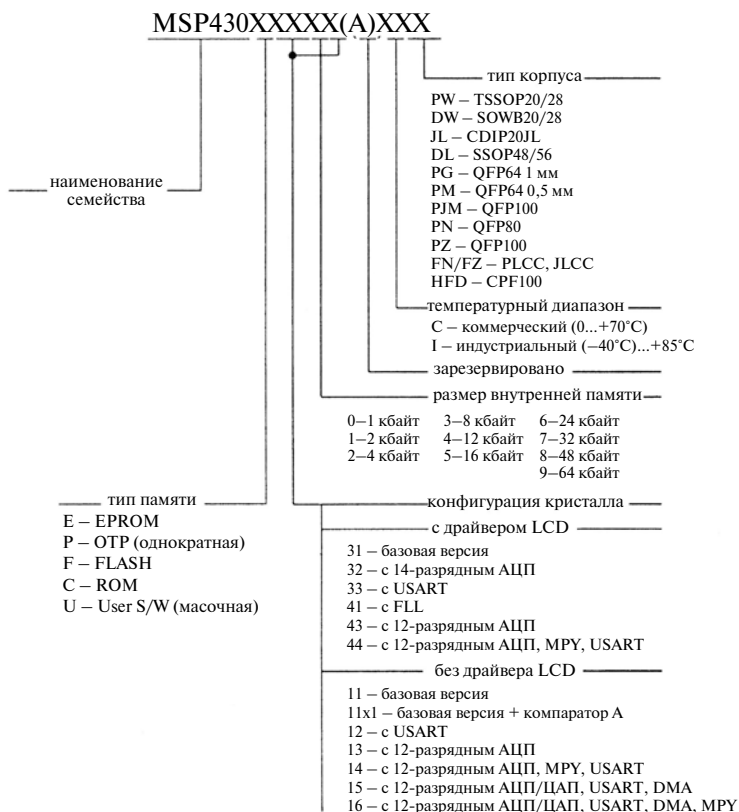


Рис. 3.8. Система обозначений *MSP-430*

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 *PDP11*, 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 умножитель, 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-

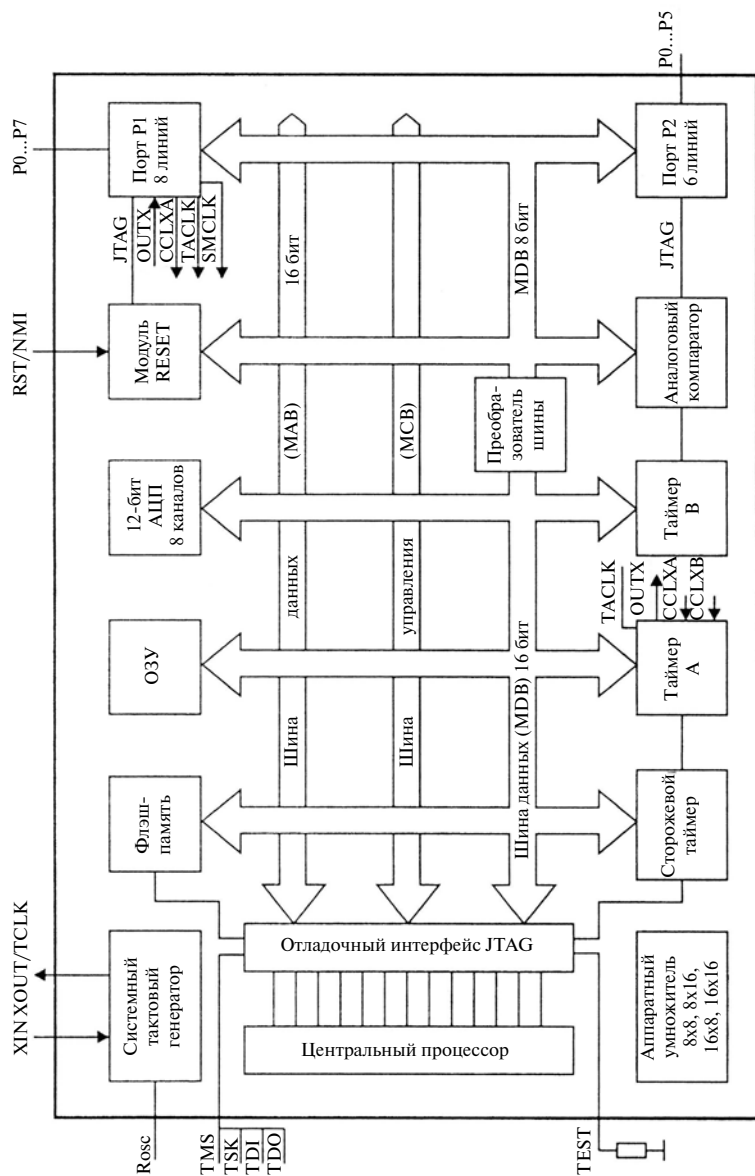


Рис. 3.9. Структура микроконтроллера MSP-430 Fxxx



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].

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 немыслим 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 поддерж-

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).

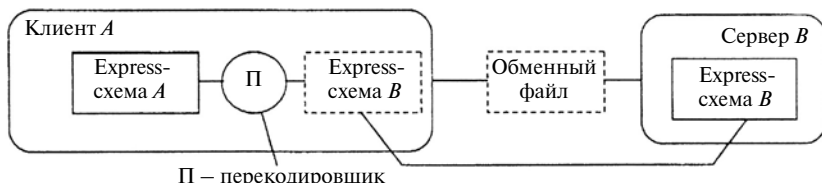


Рис. 3.10. Взаимодействие *Express*-приложений через обменный файл

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.

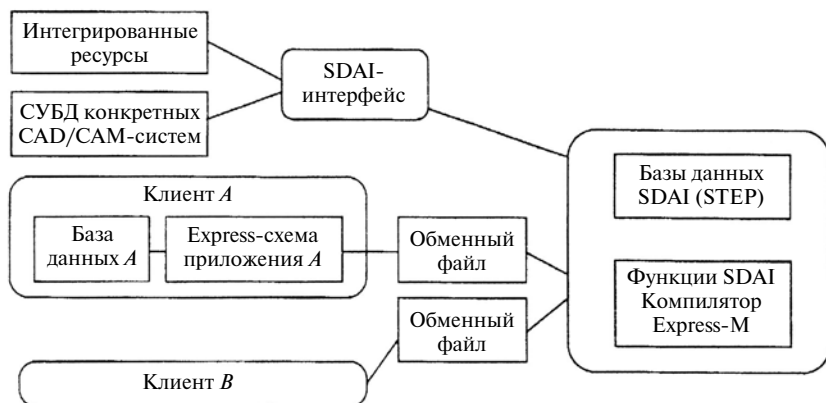


Рис. 3.11. Взаимодействие *Express*-приложений через базу данных *SDAI*

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.