

# В

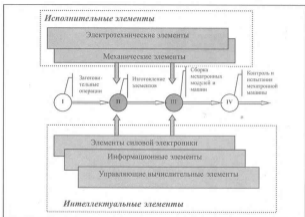
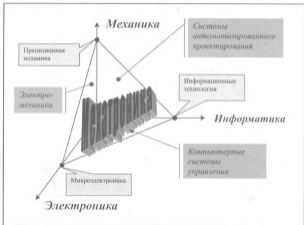
для вузов

*Ю.В. Подураев*

**МЕХАТРОНИКА:  
ОСНОВЫ,  
МЕТОДЫ,  
ПРИМЕНЕНИЕ**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**





# В

ДЛЯ ВУЗОВ

---

*Ю.В. Подураев*

## МЕХАТРОНИКА: ОСНОВЫ, МЕТОДЫ, ПРИМЕНЕНИЕ

2-е издание, стереотипное

*Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Мехатроника» направления подготовки «Мехатроника и робототехника»*



---

МОСКВА  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
2007



УДК 621.865.8

ББК 34.816

П44

Рецензенты:

кафедра «Проблемы управления» Московского института радиотехники, электроники и автоматики (ТУ);

М.М. Аршанский, д-р техн. наук,

проф., зав. кафедрой «Мехатронные производственные системы»  
Московского университета приборостроения и автоматики

Полураев Ю.В.

П44

Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.: ил.

ISBN 978-5-217-03388-1

Рассмотрена тенденция перехода от механики к мехатронике в построении машин нового поколения. Даны основы мехатроники – базовые понятия и терминология, предметная область, новые гибридные технологии, области применения современных мехатронных машин; методы построения и анализа интегрированных мехатронных модулей и систем. Приведены примеры современных мехатронных модулей и систем, аспекты математического моделирования и оптимизации движений многомерных мехатронных систем, система управления мобильным роботом на основе Интернет-технологий в реальном времени.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности "Мехатроника" направления подготовки "Мехатроника и робототехника", а также "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств", "Автоматизированные технологии и производства". Может быть полезна специалистам, занимающимся разработкой и исследованием современных машин.

УДК 621.865.8

ББК 34.816

ISBN 978-5-217-03388-1

© Издательство «Машиностроение», 2007

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	7
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	9
<b>Глава 1. МЕХАТРОНИКА – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ</b> .....	16
1.1. Понятие о мехатронике .....	16
1.2. Определения и терминология мехатроники .....	57
1.3. Новые технологии в мехатронике .....	70
<b>Глава 2. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ И СИСТЕМ</b> .....	87
2.1. Подход к проектированию интегрированных мехатронных модулей и систем .....	87
2.2. Метод исключения промежуточных преобразователей и интерфейсов .....	98
2.3. Метод объединения элементов мехатронного модуля в едином корпусе .....	107
2.4. Анализ мехатронных систем на основе показателя функционально-структурной интеграции .....	111
2.5. Метод переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства .....	121
<b>Глава 3. СОВРЕМЕННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ МОДУЛИ</b> .....	133
3.1. Модули движения .....	133
3.2. Мехатронные модули движения .....	138
3.3. Интеллектуальные мехатронные модули .....	150
<b>Глава 4. СОВРЕМЕННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ</b> .....	160
4.1. Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов .....	160

---

4.2. Мехатронные системы в автоматизированном машиностроении .....	167
4.3. Производственные машины с параллельной и гибридной кинематикой .....	175
<b>Глава 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ</b> .....	181
5.1. Тензорно-геометрический метод построения математических моделей многозвенных машин .....	183
5.2. Параметрические модели динамики многозвенных механизмов .....	196
5.3. Синтез оптимальных движений многозвенных систем .....	211
5.4. Построение динамических моделей многостепенных роботов на основе метода нормализованных переменных .....	216
<b>Глава 6. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГИЙ</b> .....	231
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	246
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	250

## Уважаемые читатели!

Мехатроника является исключительно динамично развивающимся направлением современной науки, техники и технологии, определяющим облик техносферы нового века. Главная задача мехатроники состоит в создании интеллектуальных машин и движущихся систем, которые обладают качественно новыми функциями и свойствами.

"От механики к мехатронике" – такова ведущая тенденция развития современного машиностроения. Эта тенденция особенно отчетливо проявляется при создании интеллектуальных роботов и реконфигурируемого оборудования, нового поколения авиационной и военной техники, микросистем и медицинского оборудования. Во всем мире отмечается быстро растущий интерес к мехатронике в образовательной, научно-исследовательской и производственной сферах. Объемы мирового производства мехатронных модулей и систем ежегодно увеличиваются, охватывая все новые сферы профессиональной и повседневной жизни современного человека.

В нашей стране в последние годы становлению мехатроники стало уделяться повышенное внимание. В марте 2002 г. утвержден документ "Основы политики РФ в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу", где мехатронные технологии включены в число критических технологий РФ. Подготовка инженерных и научных кадров в области мехатроники ведется многими техническими университетами и институтами РАН, в стране издается авторитетный журнал "Мехатроника. Автоматизация. Управление", ежегодно проводятся международные и национальные конференции и специализированные выставки.

Предлагаемая Вашему вниманию книга написана д-ром техн. наук, проф. Ю.В. Подуревым, заведующим кафедрой "Робототехника и мехатроника" Московского государственного технологического университета "СТАНКИН". Данная книга является одной из первых книг в этой области, изданных в нашей стране, которую можно рекомендовать как для специалистов, работающих в области создания современных машин и систем с компьютерным управлением движением, так и для преподавателей и студентов.

Научные проблемы мехатроники связаны с интеграцией знаний из таких ранее обособленных областей, как прецизионная механика и ком-

пьютерное управление движением, информационные технологии и микроэлектроника. Поэтому фундаментальные научно-методические проблемы, стоящие перед мехатроникой, затрагивают философские основы сразу нескольких фундаментальных и прикладных наук.

В своей книге автор сосредоточил внимание в первую очередь на системных вопросах мехатроники, методах построения интегрированных мехатронных решений. Общие положения подробно проиллюстрированы на многочисленных примерах построения современных мехатронных модулей и систем. Представленные методы анализа и проектирования сопровождаются в книге техническим описанием современных мехатронных решений для различных областей применения. В первую очередь это промышленная и специальная робототехника, а также технологическое оборудование для автоматизированного машиностроения. Следует отметить обширную библиографию по мехатронике, подобранную автором как по отечественным, так и по зарубежным источникам.

Рекомендую данную книгу для подготовки дипломированных специалистов и магистров по направлению "Мехатроника и робототехника". Представленные материалы могут быть также использованы студентами, аспирантами и докторантами различных направлений и специальностей, изучающих мехатронику.

Академик РАН,  
Председатель научно-методического совета  
по мехатронике и робототехнике

И.М. Макаров

*Ставляю со дня рождения моего деда  
профессора Ульянова Сергея Александровича  
посвящая эту книгу*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга сформировалась главным образом на основе опыта, накопленного мною в последние годы при чтении лекционных курсов по мехатронике. Это лекции, прочитанные в Московском государственном технологическом университете "СТАНКИН", а также в ряде зарубежных университетов: Будапештском университете технологии и экономики, Де Монсфортском университете и Корейском университете технологии и образования. Аудитория состояла из студентов и аспирантов, прослушавших цикл общепрофессиональных дисциплин, а также преподавателей технических школ и университетов, интересовавшихся основами и применением мехатронных систем. Эти обстоятельства определили как название и построение материала, так и характер его изложения.

"От механики к мехатронике" – такова ведущая тенденция развития современного машиностроения. Цель мехатроники состоит в создании интеллектуальных машин и движущихся систем, которые обладают качественно новыми функциями и свойствами. Именно новизна нового поколения машин вызывает быстро растущий интерес к мехатронным методам и технологиям во всем мире. Поэтому основной акцент в данном учебном пособии делается на системных проблемах мехатроники, рассматриваются подходы и методы интеграции механических, электронных и компьютерных элементов в единые модули и системы. Органичное сочетание в едином мехатронном устройстве столь различных по своей физической природе составляющих является необычайно сложной и увлекательной творческой задачей. Разработка теоретических основ мехатроники находится пока в начальной стадии. Автор попытался осмыслить пройденный за последние годы путь, систематизировать ключевые идеи и эффективные прикладные решения. В основе методов построения интегрированных мехатронных модулей и систем лежат оригинальные публикации и научно-технические разработки, выполненные автором, его коллегами и аспирантами.

Следует подчеркнуть, что в пособии нет подробного описания элементов, составляющих мехатронные модули. Автор сознательно отказался от этого материала, хотя он и доминирует в большинстве известных книг по мехатронике, поскольку чрезмерное стремление сообщить всю полноту сведений по отдельным компонентам зачастую идет в ущерб системным аспектам мехатроники. Так камня, если завалить его топливом, начинает потухать.

Описание методов анализа и проектирования мехатронных машин сопровождается в книге рассмотрением современных мехатронных решений для различных применений. Автор выражает признательность всем коллегам из научно-исследовательских институтов, предприятий и фирм, предоставивших технические материалы и информацию для книги. Ряд представленных научно-технических разработок выполнены сотрудниками кафедры "Робототехника и мехатроника" МГТУ "СТАНКИН" и ее выпускниками. В нашей стране техническая литература по мехатронике только начинает появляться, поэтому автор счел целесообразным привести обширную библиографию, в том числе и по иностранным источникам.

В первую очередь следует отметить огромный вклад в дело становления отечественной мехатроники д-ра техн. наук, проф. В.С. Кулешова, ставшего инициатором обучения по специальности "Мехатроника" в нашей стране и основателем кафедры робототехники и мехатроники МГТУ "СТАНКИН". Автор выражает глубокую признательность всем сотрудникам кафедры, особенно проф. Ю.В. Илюхину и доц. И.Л. Ермолову, которые поддерживали его в работе над книгой. В данном учебном пособии использованы материалы из целого ряда работ и статей, опубликованных в соавторстве с коллегами – д-ром техн. наук, проф. О.С. Сироткиным и канд. техн. наук Ю.П. Богачевым (НИАТ), канд. техн. наук В.В. Шведовым (НПО "ТАРИС"), канд. техн. наук К.Р. Карловым (ИнСИС), проф. Я. Шомло (Будапештский университет экономики и технологии) и проф. Ф. Мором (Де Монфортский университет). Целый ряд представленных разработок выполнен аспирантами кафедры при подготовке диссертационных работ – канд. техн. наук А.Г. Соколовым, канд. техн. наук О.Н. Лысенко, А.В. Левенковым и В.С. Луканиным. Особенно следует отметить совместные публикации автора с А.В. Логиновым, на которых основаны несколько параграфов настоящей книги.

Автор выражает свою глубокую благодарность всем коллегам, принимавшим участие в проведенных совместных исследованиях, подготовке и обсуждении научно-технических материалов, вошедших в эту книгу.

## ВВЕДЕНИЕ

Мехатроника – это новое направление современной науки и техники, которое стремительно развивается в последнее десятилетие во всем мире. Цель мехатроники состоит в создании интеллектуальных машин и движущихся систем, обладающих качественно новыми функциями и свойствами. Именно принципиальная новизна мехатронных систем вызывает быстро растущий интерес к мехатронике во всем мире и стимулирует высокую активность специалистов в научно-исследовательской, образовательной и производственной сферах.

Обратимся к определению мехатроники, которое утверждено в действующем Государственном образовательном стандарте РФ по направлению "Мехатроника и робототехника" [14]: "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 и машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями".

В данном определении особо подчеркнута триединая сущность мехатронных систем, в основу построения которых заложена идея глубокой взаимосвязи механических, электронных и компьютерных элементов. Поэтому наиболее распространенным графическим символом мехатроники стали три пересекающихся круга (см. рисунок), помещенные во внешнюю оболочку Производство – Менеджмент – Требования рынка.





Задача мехатроники как науки состоит в интеграции знаний из таких ранее обособленных областей, как прецизионная механика и компьютерное управление, информационные технологии и микроэлектроника. На стыках этих наук и возникают новые идеи мехатроники. Научно-техническое решение можно считать "истинно мехатронным", если компоненты не просто взаимодействуют друг с другом, но при этом образованная система обладает новыми свойствами, которые не были присущи составляющим ее частям.

Сегодня рынком наукоемкой продукции во главу угла поставлены жесткие требования по показателю цена/качество для нового поколения машин. Практически невозможно выполнить их традиционными механическими средствами. Мехатроника стремится решать поставленные задачи путем внедрения цифровых электронных блоков и управляющих компьютеров непосредственно в механические узлы и системы. Эффективная реализация данного подхода стала возможна в последние годы благодаря появлению новейших информационных и производственных технологий. Именно эти технологические и экономические факторы дали импульс к созданию оригинальных мехатронных систем: реконфигурируемого технологического оборудования и интеллектуальных роботов, нового поколения авиационной и военной техники, микросистем и медицинского оборудования.

Мехатроника уже вошла не только в профессиональную, но и в повседневную жизнь современного человека. Ведь и домашние бытовые машины, и трансмиссии новых автомобилей, и цифровые видекамеры, и дисководы компьютеров построены на мехатронных принципах.

В последние годы целый ряд мировых фирм-производителей продвигают свои новые товары на рынок под брендом мехатроники. Например, на международной выставке по промышленной автоматизации в Ганновере (Hannover Messa-2004) мехатронные решения и технологии были представлены такими известными компаниями, как Siemens (Германия), Festo Didactic, OMRON, Yaskawa (Япония), Maxon (Швейцария), Dunkermotoren (Германия).

Таким образом, широкое распространение мехатроники в инженерном деле, науке и практике сегодня следует признать свершившимся фактом. Вместе с тем нельзя не отметить, что ряд известных видов движущихся машин и автоматических систем интеллектуального типа при разработке не относились к "мехатронной" категории. Например, мировой приоритет был получен специалистами Советского Союза на станки с числовым программным управлением еще в 1950-х годах, т.е. за 20 лет

до официальной регистрации термина "Mechatronics" японской фирмой Yaskawa Electric. Однако очевидно, в этих машинах имеются три главные составные части – механическая, электронная и информационная (см. рисунок), – что позволяет сегодня определить их как мехатронные системы. Да и после того, как определение мехатроники было принято Международной федерацией теории машины и механизмов (IFTMM), подчас встречается мнение, что мехатроника – это просто "хорошее проектирование" или даже "это то, что мы уже давно делаем, не давая нового имени" [95].

Данные примеры показывают, сколь серьезные проблемы имеются в мехатронике при формировании строгих классификационных признаков и анализе конкретных систем, вплоть до споров в терминологии. Конечно, сказываются "болезни роста". Ведь мехатроника является молодой областью науки и техники, которая выделилась в самостоятельное направление совсем недавно. Об этом можно судить, например, по возрасту специальных периодических изданий: так, первый выпуск международного журнала "IEEE/ASME Transactions on Mechatronics" вышел в свет в марте 1996 г. [86], а российский журнал "Мехатроника" стал выходить с января 2000 г.

До сих пор мехатроника является в значительной степени уделом специалистов-практиков. Ее бурный прогресс в первую очередь обусловлен их технологическими знаниями и умениями, подкрепленными инженерной интуицией. Если применить шахматную терминологию, то разработка теоретических основ мехатроники находится пока в дебютной стадии. Идет накопление знаний и обобщение найденных прикладных решений. В шахматном дебюте закладывается основа партии – ее стратегическая идея и план игры, которые затем оформляются в тактических маневрах и комбинациях. Конечно, необходимо помнить предостережение основоположника русской шахматной школы М.И. Чигорина о том, что только творческое и критическое отношение к аналитическому материалу дает лучшие результаты. Но потребность в теоретическом инструментарии, который имеет эвристическую ценность и позволяет вести целенаправленный поиск новых мехатронных решений, сегодня весьма велика.

Такой ход развития событий, видимо, в первую очередь обусловлен междисциплинарной сущностью предмета мехатроники. Несмотря на известные разночтения в определениях и терминологии, системный интегрирующий характер мехатроники является общепризнанным положением. Именно это фундаментальное положение определяет предметную проблематику, с которой сталкиваются специалисты при проектировании

и эксплуатации мехатронных систем, а также студенты, изучающие эту новую область науки и техники.

Действительно, в состав каждого мехатронного устройства входят механические, компьютерные, электронные, сенсорные и электротехнические компоненты. С одной стороны, они имеют принципиально различную физическую сущность и соответственно учебным планам технических университетов изучаются в различных циклах дисциплины. С другой стороны, стремление к новому качеству машины требует их функционального, структурного и конструктивного объединения в единую систему. Для сочетания необходимы связующие элементы – аппаратные и программные интерфейсы. Каким образом организовать данные связи и добиться эффективной работы целостной системы? Как построить гармоничный учебный план для студентов и программу изучения мехатроники "узкими" специалистами-практиками? Эти фундаментальные научно-методические проблемы, стоящие перед мехатроникой, затрагивают философские основы сразу нескольких естественных и прикладных наук, природу вещей и проблему гармонии.

Философская проблема "сочетания несочетаемого" издревле волновала людей. Она нашла свое художественное отражение во многих мифах и народных сказаниях, произведенных живописи и литературы. Среди наиболее жизнеспособных образов этого ряда выделяются кентавры, в которых ум и благородство человека сочетается с могучей силой коня. Именно сверкающий кентавр стал одним из центральных символов на торжественной церемонии открытия Олимпийских игр в Афинах.

Главный кентавр Хирон был удостоен богами бессмертия. И по словарной справке о нем, "он преодолел природную грубость своего племени, просветил свой характер нравственностью и знанием и сделался знаменитым воспитателем и учителем прославившихся героев древности" [18]. Впечатляет трагический миф о том, что Хирон отдал свое бессмертие Прометею. Но мудрость народов мира говорит нам и о негативных опытах объединения разноприродных элементов. Так, Химера – в греческой мифологии извергавшее огонь чудовище с головой и шеей льва, туловищем козы и хвостом дракона. Позднее химерами стали называть всяких фантастических чудовищ, которые могут оживать и наводить ужас на людей.

Конечно, сейчас нет нужды доказывать объективную возможность создания интегрированных технико-технических систем, это доказано практикой. Но при проектировании мехатронных систем следующего поколения мы должны помнить не только о благородных кентаврах, но и об отвратительных химерах.

В мире активно издается научная и учебная литература в области мехатроники. Первая монография на русском языке была издана в 1988 г., это книга "Мехатроника" японских специалистов Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ и др. [36]. Только за последние годы ведущие ученые США, Европы и Азии выпустили в свет несколько книг с аналогичным названием [82, 89, 94, 95, 104]. Причем многие из этих книг выдержали уже по два-три издания за относительно короткое время, что говорит о большом интересе читателей к мехатронике.

При изучении системных областей используются два основных подхода – это дедуктивный и индуктивный методы. Во многих монографиях и учебниках по мехатронике доминирует индуктивный подход, когда сначала дается подробное описание отдельных элементов (как правило, это наиболее объемная часть книги), а затем переходят к вопросам системного характера. Безусловно, индуктивный подход является методически целесообразным, а зачастую и единственно возможным для аудитории, не имеющей базовой подготовки и начинающей изучать основы мехатроники с "нулевого" уровня.

В настоящей книге автор делает попытку положить в основу изложения дедуктивный метод, переходя от общего к частному, сосредоточив внимание в первую очередь на системных вопросах мехатроники. Мы последуем классическому совету Б. Паскаля о том, что когда предмет "нужно охватить сразу и целиком, а не изучать его постепенно.... – на первых порах, во всяком случае". Для выбора дедуктивного подхода помимо непрекращаемого авторитета мистера Шерлока Холмса есть еще ряд существенных оснований.

В определении мехатроники заявлено, что в ее основе лежит синергетическая интеграция составляющих элементов. Поэтому изучение принципов и приемов интеграции компонентов в мехатронных модулях и системах вплоть до вычисления числовых показателей "мехатронности" объекта является приоритетной научной задачей мехатроники. Следовательно, акцент на задачи синтеза представляется вполне догичным как соответствующий интеграционной направленности мехатроники.

Имеется обширная русскоязычная библиография по отдельным элементам и подсистемам. Это специальная литература по приводам и электромеханике, сенсорным устройствам и цифровым системам управления, механике и конструированию машин и т.д. В последние 2–3 года стали также появляться книги по отдельным дисциплинам, входящим в образовательный стандарт специальности "Мехатроника". Так, в 2004 г. авто-

ром совместно с доц. О.Д. Егоровым издан учебник по конструированию мехатронных модулей [17]. В этой связи возникает методическая проблема, когда рассмотрение элементов в "мехатронных" книгах по сравнению со специальной литературой отличается поверхностным характером. Поэтому становление мехатроники как междисциплинарной области не только не "закрывает" базовые научные направления ("чистые" механику, микроэлектронику, информатику), но, наоборот, стимулирует их научно-техническое развитие через предъявление новых системных требований.

Наконец, при выборе структуры этой книги автор опирался на доброжелательные отзывы и предложения коллег и студентов, поступившие на его учебное пособие "Основы мехатроники" [49], которое было построено по аналогичной "дедуктивной" схеме.

Безусловно, рассмотрение методов системного проектирования методически невозможно в отрыве от анализа конкретных примеров и применений. В данной книге за нижний уровень детализации взяты мехатронные модули ("молекулы" мехатроники), из которых затем komponуются многокоординатные мехатронные машины и системы. Конечно, модули-"молекулы", в свою очередь, состоят из "атомов" мехатроники – механических преобразователей движения и звеньев, электрических двигателей и тормозов, силовых электронных блоков и микропроцессоров, датчиков обратной связи и информации. Но эти первичные элементы в данной книге детально не рассматриваются.

Первая глава написана как книга в книге и содержит материал для курса "Основы мехатроники". Здесь дан ответ на главный вопрос: что такое мехатроника? Для этого формулируются цель, предмет и метод мехатроники, введены основные понятия и базовая терминология. Подробно рассмотрены современные функциональные и технологические требования к машинам нового поколения, которые определяют постановку задач на их проектирование. Приведен ряд эффективных мехатронных решений, иллюстрирующих идеи мехатроники. Даны предпосылки и ключевые факторы, определяющие развитие мехатроники как новой области науки и техники, приведены приоритетные области применения современных мехатронных машин. Отдельный параграф посвящен новым технологиям, лежащим в основе создания машин и систем нового поколения.

Во второй главе рассмотрены подход к проектированию и методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем. Разработаны три основных метода – это исключение промежуточных преобразователей и интерфейсов, объединение элементов в одном корпусе, пере-

нос функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства мехатронного модуля. Дана классификация уровней интеграции элементов в мехатронных системах, приведены примеры новых мехатронных решений. Предложены показатели и методики для количественной оценки уровня интеграции элементов мехатронных модулей.

Третья и четвертая главы содержат примеры и техническое описание современных мехатронных модулей и систем из практики современного автоматизированного машиностроения и робототехники.

В пятой главе объединены материалы из области математического моделирования, оптимизации движений и управления мехатронными системами. В основе представленных материалов лежат оригинальные публикации и научно-технические разработки, выполненные автором, его коллегами и аспирантами.

Изложен тензорно-геометрический метод построения математических моделей многосвязных машин, который позволяет описать их кинематические, динамические и упругие свойства на основе анализа инвариантов и геометрических поверхностей. Разработаны параметрические модели динамики многосвязных систем на базе различных скалярных параметров.

Методическая особенность подхода заключается в том, что исследование динамики многостепенной механической системы сводится к анализу движения материальной точки. Такой подход особенно эффективен при планировании контурных движений, когда многомерная машина, состоящая из цепи звеньев, рассматривается как единый объект управления. Полученное дифференциальное уравнение имеет простую форму и классическую структуру математического решения, что позволило синтезировать оптимальные движения мехатронных систем. Построены математические и компьютерные модели интегрированных мехатронных систем с применением к задачам управления роботами с кинематической избыточностью.

В шестой главе рассмотрена система дистанционного управления мобильным роботом на основе Интернет-технологий в реальном времени.

В приложении дан вывод аналитических зависимостей и уравнений для двухзвенного манипулятора типа "SCARA", который используется как пример для иллюстрации ряда общих положений книги.

## МЕХАТРОНИКА – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

---

... взяв эти три начала, он слил их все в единую идею, силой принудив ее поддвинуться смешенно природу иного к сопряжению с тождественным.

*Платон. Тимей*

### 1.1. ПОНЯТИЕ О МЕХАТРОНИКЕ

Когда Вы приступаете к изучению новой учебной дисциплины и, тем более, впервые знакомитесь с целым научно-техническим направлением, обязательно встанут три ключевых вопроса:

**ЧТО** является предметом мехатроники, где научно-техническая "ниша" мехатроники и каким образом она взаимодействует с другими областями специальных знаний?

**ПОЧЕМУ** это направление столь быстро развивается в современном мире, каковы его цель и перспективы?

**КАК** происходит создание мехатронных систем или, другими словами, в чем состоит суть метода мехатроники и какие процессы лежат в основе мехатронных технологий?

В этом параграфе представлены только краткие ответы на поставленные вопросы, чтобы сразу ввести читателя в круг обсуждаемых проблем, и рассмотрены лишь некоторые – но весьма характерные, по мнению автора – современные мехатронные решения. В последующих главах введенные базовые понятия будут разобраны более подробно и проиллюстрированы на дополнительных примерах мехатронных модулей и систем с анализом их технических характеристик и конструктивных решений.

Несмотря на активно ведущиеся дискуссии по определению мехатроники, приведенному в [14], его несомненным достоинством является то, что оно содержит вполне четкие ответы на три поставленных в начале этого параграфа ключевых вопроса.

*Цель мехатроники* как области науки и техники заключается в создании качественно новых модулей движения, а на их основе – движущихся интеллектуальных машин и систем.

*Предметом мехатроники* являются процессы проектирования и производства модулей, машин и систем для реализации заданных функциональных движений.

*Функциональное движение* мехатронной системы предусматривает ее целенаправленное механическое перемещение, которое координируется с параллельно управляемыми технологическими и информационными процессами. Таким образом, понятие "движение" трактуется в данном определении мехатроники расширительно. Древнегреческие философы понимали под движением тела всякое его изменение вообще: от изменения размеров, цвета и температуры до возникновения и уничтожения. Но все-таки основой функциональных движений в мехатронике служит механическое перемещение системы в пространстве и во времени. Требования к показателям качества исполнения функциональных движений (по точности, скорости и т.д.) определяются служебным назначением машины.

*Метод мехатроники* основан на системном сочетании таких ранее обособленных естественно-научных и инженерных направлений, как точная механика, микроэлектроника, электротехника, компьютерное управление и информатика. Основой метода мехатроники является *синергетическая интеграция* структурных элементов, технологий, энергетических и информационных процессов на всех этапах жизненного цикла изделия, начиная со стадии его концептуального проектирования и заканчивая производством и эксплуатацией.

*Синергия* (греч.) – это совместное действие, направленное на достижение общей цели. Например, на футбольном поле игроки объединяются в команду во имя общей цели – забить максимальное количество голов и победить соперника. В мехатронике все энергетические и информационные потоки направлены на достижение единой цели – выполнить программное движение с заданными показателями качества.

Важно подчеркнуть, что при синергетическом объединении достигается результат больший, чем арифметическая сумма вкладов отдельных частей системы. В спортивной команде различаются как функции спортсменов (вратарь, защитник, нападающий), так и их физические кондиции. Элементы мехатронных модулей и машин имеют различную физическую природу, что определяет междисциплинарную сущность предмета мехатроники и ее научно-техническую проблематику. При синергетической интеграции компоненты мехатронной системы должны быть слиты неразрывно и органически – именно так трактовалось это понятие в исто-



рически первом определении мехатроники, в буквальном переводе с японского языка [54].

*Мехатронные технологии* включают в себя маркетинговые, проектно-конструкторские, производственные, технологические и информационные процессы, которые обеспечивают полный жизненный цикл мехатронных изделий. Раскрытие связей и закономерностей, характерных для этих процессов, позволяет создавать мехатронные модули, машины и системы, которые способны наиболее эффективно выполнять заданные требования.

Метод мехатроники и мехатронные технологии являются весьма универсальными. В этом смысле мехатронику можно поставить в один ряд с такими фундаментальными подходами к разработке сложных технических систем, как автоматизированное проектирование, кибернетический и бионический подходы к проектированию, модульный принцип построения машин и CALS-технологии.

Сегодня мехатронные модули и системы находят широкое применение в следующих областях:

- станкостроение и оборудование для автоматизации, технологических процессов в машиностроении;
- промышленная и специальная робототехника;
- авиационная и космическая техника;
- военная техника, машины для полиции и спецслужб;
- электронное машиностроение и оборудование для быстрого прототипирования;
- автомобилестроение (приводные модули "мотор-колесо", антиблокировочные устройства тормозов, автоматические коробки передач, системы автоматической парковки);
- нетрадиционные транспортные средства (электромобили, электровелосипеды, инвалидные коляски);
- офисная техника (например, копировальные и факсимильные аппараты);
- периферийные устройства компьютеров (например, принтеры, плоттеры, дисководы CD-ROM);
- медицинское и спортивное оборудование (биоэлектрические и экзоскелетные протезы для инвалидов, тонусные тренажеры, управляемые диагностические капсулы, массажеры и вибраторы и т.д.);
- бытовая техника (стиральные, швейные, посудомоечные машины, автономные пылесосы);

- микромашины (для медицины, биотехнологии, средств связи и телекоммуникации);
- контрольно-измерительные устройства и машины;
- лифтовое и складское оборудование, автоматические двери в отелях и аэропортах;
- фото- и видеотехника (проекторы видеодисков, устройства фокусировки видеокамер);
- тренажеры для подготовки операторов сложных технических систем и пилотов;
- железнодорожный транспорт (системы контроля и стабилизации движения поездов);
- интеллектуальные машины для пищевой и мясомолочной промышленности;
- полиграфические машины;
- интеллектуальные устройства для шоу-индустрии, аттракционы.

Этот список может быть расширен. Рынок мехатронных модулей и систем динамично развивается и в индустриально развитых странах за последние пять лет имеет устойчивую тенденцию к росту. При этом на долю робототехники приходится примерно десятая часть объема продаж [21].

Стремительное развитие мехатроники в мире является закономерным процессом, который вызван принципиально новыми требованиями рынка к показателям качества технологических машин и движущихся систем.

Ход развития мехатроники вполне соответствует учению о "больших циклах конъюнктуры", автор которого выдающийся российский экономист Н.Д. Кондратьев [27]. В его трудах определены необходимые экономические и хозяйственные условия, при которых происходит переход на принципиально новые производственные машины и технологические процессы.

Индустриальному обществу присущи циклические кризисы и связанные с ними периоды радикального обновления технического способа производства. В письме из суздальского политизолятора Н.Д. Кондратьев дал математическое описание зависимости размера дохода от уровня техники производства как решение дифференциального уравнения. Подчеркнем следующее ключевое положение этого экономического учения. "Было бы, конечно, ошибкой отрицать в научно-технических открытиях и изобретениях элемент творчества. Но с научной точки зрения было бы еще большей ошибкой думать, что направления и интенсивность этих

открытий и изобретений совершенно случайны. Неизмеримо вероятнее предположить, что направления и интенсивность научно-технических открытий и изобретений являются функцией запросов практической действительности и предшествующего развития науки и техники”.

Длинные волны, которые описывают экономическую динамику хозяйства, получили название “кондратьевских циклов”. Каждый цикл характеризуется новой технологической, ресурсной и энергетической базой, приводящей к созданию принципиально новой продукции. Длительность жизненного цикла технического способа производства составляет примерно 50–60 лет.

В XX в. принято выделять два основных цикла в развитии промышленности европейских стран [46]. В нашей стране промышленность группы А, создающая средства производства, сформировалась после войны в 1950-х годах. Ее последующее развитие до конца 80-х годов в целом соответствовало второму “кондратьевскому циклу”. Характерным для этого цикла является развитие механики, электроники и информатики как отдельных, практически автономных направлений. Это относится и к системе фундаментальных и прикладных исследований, и к отраслевой структуре промышленности, и к классификаторам научных и инженерных специальностей, и к организационной структуре машиностроительных предприятий. Технологию машиностроения базировались в основном на методах механообработки, где был накоплен большой теоретический и экспериментальный материал.

Однако в настоящее время преобладают задачи, для решения которых требуются качественно новые технологические процессы и средства производства. Создание мехатронных машин и технологий, особенно начиная с 1990-х годов идет на стыке нескольких научно-технических направлений и является ответом производителей оборудования на поставленные рынком технико-экономические и функциональные требования.

Фундаментальное отличие нового поколения производственных технологий и машин состоит в том, что в их основе лежат *интегрированные знания* из таких ранее обособленных областей, как прецизионная механика и компьютерное управление, информационные технологии и микроэлектроника. Учитывая принципиальное отличие новых машин и технологий, современную фазу развития машиностроения можно отнести к новому (третьему) “кондратьевскому циклу”.

Согласно учению Н.Д. Кондратьева, именно кризис расчищает место новым технологиям и средствам производства. Отметим следующее

положение. "Депрессивное состояние хозяйственной жизни толкает к исканию путей удешевления производства, к исканию новых технических изобретений, способствующих этому удешевлению. Именно в течение длительно-понижательной волны конъюнктуры технические открытия и изобретения особенно многочисленны" [27].

Очень хочется надеяться, что справедливость данной теории в нынешних экономических реалиях стимулирует научно-технический прогресс и приведет к инновациям в отечественное машиностроение, в частности – в развитие мехатроники.

Целевой задачей мехатроники является проектирование и производство качественно новых модулей и движущихся машин. Фундаментальное понятие "качество машины" было введено в трудах основоположников отечественной школы технологии машиностроения – проф. Б.С. Балакшина, чл.-кор. РАН Ю.М. Соломенцева в МГТУ "СТАНКИН", проф. Э.А. Сатела в МВТУ им. Н.Э. Баумана и ряда других выдающихся ученых [5, 46, 63]. Качество машины оценивается совокупностью специально подобранных показателей (или критериев), выбор которых определяется ее служебным (функциональным) назначением. Машины нового поколения должны отвечать таким общим критериям, как отношение цена/качество, высокая надежность и безопасность функционирования, гибкость и быстрая реконфигурация при переходе на новое изделие.

К числу новых современных требований к функциональным и техническим показателям модулей и машин в первую очередь следует отнести:

- выполнение машинами и системами качественно новых служебных и функциональных задач;
- сверхвысокие скорости движения конечного звена машины – ее рабочего органа, что определяет новый уровень производительности технологических комплексов;
- ультрапрецизионные движения модулей с целью реализации новых прецизионных технологий вплоть до микро- и нанотехнологий;
- компактность модулей и движущихся систем, миниатюризация конструкций в микромашинах;
- новые кинематические структуры и конструктивные компоновки многокоординатных машин;
- интеллектуальное поведение систем, функционирующих в изменяющихся и неопределенных внешних средах;
- выполнение пространственных движений по криволинейным траекториям и реализация сложных законов перемещения во времени.

Рассмотрим подробнее каждое из перечисленных требований и ряд примеров, иллюстрирующих их эффективную реализацию на базе мехатронных принципов и технологий.

### 1.1.1. Новые служебные и функциональные задачи мехатронных машин и систем

Характерным примером выполнения мехатронной системой новых служебных функций может служить применение мобильных технологических роботов для инспекции и ремонта подземных трубопроводов (рис. 1.1).

Всем горожанам хорошо известно, сколь долго и неэффективно выполняют такие работы бригады жилищно-коммунальных служб. Использование мобильных роботов является характерным примером бестраншейных (или "антидигтерных") технологий, которые в принципе исключают операции раскопки трубопроводов. Причем в ряде случаев (например, когда магистраль проходит под автомобильной или железной дорогой) бестраншейные методы ремонта являются единственно возможными. Схемы роботизированных операций в трубопроводе показаны на рис. 1.2.

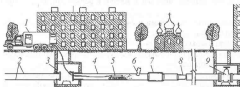
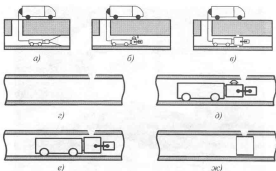


Рис. 1.1. Схема обследования внутреннего состояния подземного трубопровода мобильным роботом:

- 1 – передвижная (автомобильная) станция управления роботом;
- 2 – входной участок трубопровода; 3 – колодезь; 4 – обследуемый участок трубопровода; 5 – мобильный робот; 6 – врезка в трубопровод;
- 7 – участок трубопровода с увеличением диаметра; 8 – участок трубопровода с уменьшением диаметра; 9 – задвижка



**Рис. 1.2. Схемы роботизированных операций:**

*a* – теленоскопия трубопровода; *б* – подрезка выступающих элементов; *в* – заделка локального дефекта; *г* – дефект в трубопроводе; *д* – зачистка с помощью инструментальной головки; *е* – установка бандажа; *ж* – трубопровод после бандажирования

Мобильные технологические роботы представляют собой сложные мехатронные системы. Проектно-конструкторские решения по разработке электромеханической, сенсорной и электрической частей этих машин необходимо принимать только во взаимосвязи, учитывая уже с начальных этапов лимитирующий фактор – диаметр трубы, а также неблагоприятные условия эксплуатации в подземных трубопроводах.

Особенное значение имеют мехатронные системы, функционирующие в условиях, несовместимых с жизнью человека либо опасных для его здоровья. К их числу следует отнести робототехнические комплексы (РТК), предназначенные для работы в средах радиоактивного загрязнения. Необходимость выполнения роботами операций в таких средах возникает при проведении аварийно-восстановительных и ремонтно-монтажных работ на АЭС, перевозках отработанного топлива, возникновении нештатных и аварийных ситуаций.

Сегодня, наверное, уже нет необходимости доказывать, что альтернативы робототехническим системам при выполнении таких задач нет.

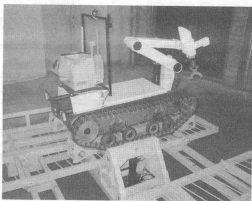


Рис. 1.3. Робот-разведчик Минатома РФ

Однако в дни Чернобыльской катастрофы 1986 года при выборе способа расчистки кровли зданий от радиоактивных обломков столкнулись две идеологии: дистанционный метод очистки по "безлюдной" технологии и сбор радиоактивных отходов вручную силами военнослужащих и гражданских лиц. Из воспоминаний лауреата Государственной премии СССР В.П. Иванова, участника этих событий: "Запомнились наши солдаты и "партизаны", которые вручную чистили крыши. Эта операция была страшно опасная, так как они подбегали к краю крыши, где отсутствовали какие-либо парапеты, и сбрасывали в развал реактора радиоактивные куски. А высота 65–70 метров. ... Понятие остается восхваляться мужеством наших людей, выполнявших эти работы" (Козлова Е.А. Воспоминания о Чернобыле (записи участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС).

Трагедия на Чернобыльской АЭС остро поставила задачу разработки отечественных робототехнических систем, способных действовать в условиях высокой радиации. На рис. 1.3 представлен робот-разведчик Минатома России. Этот мобильный робот предназначен для проведения

разведки радиационной обстановки в зараженной зоне, поиска источников радиации, дезактивации помещений и оборудования, а также подавления радиоактивной пыли.

Манипулятор размещен на транспортном средстве, которое способно преодолевать лестничные пролеты, небольшие препятствия, траншеи, передвигаться по наклонным поверхностям. Манипулятор может быть оснащен различными схватами для переноса объектов либо рабочим органом для нанесения дезактивирующего полимера. Обнаружение источников радиации ведется с помощью гамма-локатора, который имеет в своем составе ТВ-камеру, дальномер, гамма-детектор и фоновый дозиметр. Управление транспортным средством, манипулятором и гамма-локатором осуществляется оператором по радиоканалу с поста управления.

Представленный робот-разведчик по своей структуре и выполняемым функциям относится к мехатронным системам с дистанционно-автоматическим управлением, принципы построения которых разработаны проф. В.С. Кулешовым [16, 31]. Радиоактивные зоны относятся к классу недетерминированных (неопределенных) сред, где невозможно заранее запрограммировать все функциональные движения робота. Поэтому здесь целесообразно сочетать режимы дистанционного управления, когда для принятия решений подключается интеллект человека-оператора, с автоматическим управлением при выполнении типовых операций.

В XXI в. возникла новая угроза для человечества – терроризм. Для проведения антитеррористических операций необходимы мехатронные мобильные системы, обладающие расширенными интеллектуальными свойствами. На рис. 1.4 представлены мобильные роботы, предназначенные для инспекционных проверок и обезвреживания взрывных устройств, разработанные в НИИ специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана [71].

В задачи этих специальных машин входит проведение аудио- и видеоразведки объектов и территорий, осмотр днищ, салонов и багажных отделений автотранспортных средств, а также поиск, обнаружение, манипулирование и уничтожение взрывоопасных предметов.

Робот малого класса "Вездеход ТМ-3" способен действовать в помещениях, на открытых пространствах, двигаться по грунту, преодолевать препятствия высотой до 15 см. Оснащен двумя поворотными телекамерами и манипулятором. Команды подаются по кабелю (на расстоянии до 100 м) и по радиосети (до 1 км), которая содержит 20 каналов передачи сигналов управления и телевизионного изображения.





а)



б)

Рис. 1.4. Специальные мобильные роботы "Вездеход ТМ-3" (а) и "Варри" (б)

Робот среднего класса "Варан" оснащен гусеничным шасси с двумя регулируемыми электроприводами, что позволяет ему передвигаться по пересеченной местности и снежному покрову, преодолевать небольшие водные преграды и лестничные пролеты. Грузоподъемность манипулятора составляет 20 кг, робот может также оснащаться дополнительным оборудованием.

### 1.1.3. Сверхвысокие скорости движения рабочих органов машины нового поколения

Достижение сверхвысоких скоростей движения рабочих органов современных станков позволяет решить три целевые задачи. Это повышение производительности механообработки (в 3–10 раз), улучшение качества поверхности обработанных деталей и повышение точности обработки.

Примером достижения сверхвысоких скоростей движения на основе применения мехатронных принципов и технологий являются прецизионные электршпиндельные узлы. На рис. 1.5 представлен ECS мотор-шпиндель 2SP120 фирмы Siemens, предназначенный для фрезерных станков и обрабатывающих центров.

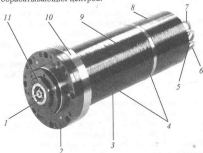


Рис. 1.5. ECS мотор-шпиндель 2SP120:

1 – интерфейс инструмента HSK A63 с продувкой воздуха; 2 – кольцо для внешнего охлаждения инструмента; 3 – синхронный двигатель; 4 – стальной или гибридный подшипник с консистентной смазкой; 5 – фотомультиплексный датчик; 6 – сенсоры состояния зажима инструмента; 7 – силовой кабель; 8 – пневматическое устройство зажима инструмента; 9 – закрытая рубашка охлаждения; 10 – корпус с фланцем; 11 – лабиринтное уплотнение с воздушной блокировкой

Данный мотор-шпиндель – это компактный мехатронный модуль, в котором конструктивные опоры шпинделя, активные части двигателя и встроены информационные устройства (фотоимпульсный датчик и сенсор состояния зажима инструмента) объединены в единый компактный блок. Данная конструкция модульного исполнения обеспечивает высокую надежность и простоту эксплуатации благодаря удобным пользовательским интерфейсам. Электрошпиндель имеет систему охлаждения, подключения для которой расположены также на шпиндельной бабке. Серия шпинделей S1 позволяет реализовать крутящие моменты в диапазоне 40...170 Н · м и частоты вращения инструмента 10 000...18 000 мин<sup>-1</sup>.

В представленной конструкции ротор электродвигателя и вал инструмента представляют собой единый конструктивный элемент, где невозможно отделить механическую часть модуля от его электротехнической части без разрушения изделия. Таким образом, здесь эффективно реализуется принцип синергетической интеграции элементов, лежащий в основе мехатронного подхода.

Дальнейшее развитие сверхскоростного резания ставит новые задачи по достижению скоростей вращения шпинделей свыше 100 000 мин<sup>-1</sup>, что на порядок выше, чем в серийно выпускаемых узлах. Это позволит добиться принципиально нового уровня производительности технологического оборудования, особенно на операциях сложных деталей с большим объемом удаляемого материала. При этом необходимо минимизировать уровень вибраций и потери на тепловое излучение. Автоматический контроль состояния узла и параметров его движения (скорости, угла поворота и развиваемого момента) в процессе обработки обеспечивает заданные технологические режимы, гарантируя высокое качество обработки.

Применение шпинделей, построенных на мехатронных принципах, позволяет реализовывать на станках режимы сверхскоростного резания. Достигнуть столь высокой быстроходности в традиционных конструкциях узлов на базе механических подшипников практически невозможно. Предельные скорости вращения подшипников ограничиваются допустимой температурой нагрева, прочностью и усталостным разрушением сепараторов, колец и тел качения. Показателем быстроходности обычно служит произведение  $P = dn$ , где  $d$  – диаметр под шейку переднего подшипника;  $n$  – частота вращения.

Для шпинделей на подшипниках качения показатель быстроходности обычно не превышает  $P = 1 \cdot 10^6$  (мм/мин), в то время как для подшипников на электромагнитных опорах он в несколько раз выше и огра-

ничен только механической прочностью материала шпинделя. Шпиндель с подшипниками на электромагнитных опорах является эффективным мехатронным решением, так как его новое качество – сверхвысокая скорость вращения – достигается благодаря неразрывной интеграции в едином модуле механических, электротехнических и электронных элементов.

Аналогичная мехатронная идея конструктивного слияния двигателя и рабочего органа реализована в модулях для транспортных средств, которые получили название "мотор-колесо". Здесь двигатель встраивается непосредственно в ведущее колесо без промежуточного механического преобразователя. Такие модули нашли широкое применение в электроприводах различных транспортных средств (кресел-колясок, электромобилей), а также в мобильных роботах и робокарах [17].

### 1.1.3. Ультрапрецизионные перемещения модулей и машин нового поколения

Важнейшим требованием, которое предъявляется к современным мехатронным модулям и системам, является прецизионность или сверхвысокая точность перемещений их конечного звена – рабочего органа.

Современные технологические машины для микро- и нанотехнологий должны отвечать следующим требованиям:

- допусковая погрешность формы  $0,01 \dots 0,1$  мкм;
- шероховатость обрабатываемой поверхности  $Ra = 0,002 \dots 0,01$  мкм;
- дискретность перемещения до 5 нм;
- малое сечение стружки (порядка  $20$  мкм<sup>3</sup>);
- исключение тепловых деформаций и виброизоляция узлов.

В качестве характерного примера можно привести электроэрозионные станки фирмы Sodick, которые применяются для обработки деталей в микрооптике и микроэлектронике, для медицинских микроприборов и микродвигателей. В группу современных электроэрозионных технологий входят координатно-прошивочная обработка, проволочная вырезка, сверление тонких отверстий в твердых металлах и ряд других операций.

Столь выдающиеся точностные параметры достигаются благодаря использованию мехатронных модулей на базе линейных двигателей (ЛД). Мехатронные модули движения на основе линейных двигателей находят все большее применение в современном технологическом оборудовании. Причем сфера их применения не ограничивается единичным или мелкосерийным производством, например, в авиакосмической промышленности. Линейные двигатели все шире используются в многоцелевых стан-

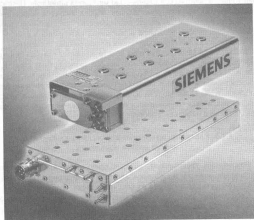


Рис. 1.6. Линейные двигатели 1FN1 и 1FN3 фирмы Siemens

ках для обработки крупных серий на операциях высокоскоростного фрезерования, шлифования, при обработке длинномерных деталей и для лазерного раскроя материалов (рис. 1.6).

Традиционные приводы линейных перемещений включали ротационный двигатель и механический преобразователь вращательного движения в поступательное перемещение (шариковинтовую передачу, тубчатую рейку) (рис. 1.7).

Данное решение имеет ряд серьезных недостатков:

- многоступенчатое преобразование движений от двигателя до конечного звена, большое число избыточных промежуточных элементов;
- большая инерционность (особенно в крупногабаритных машинах) из-за последовательного соединения нескольких механических звеньев;
- люфт, температурные и упругие деформации валов и винтов – эти факторы ведут к невысокой точности перемещений и возникновению прерывистых полз, особенно при реверсе;

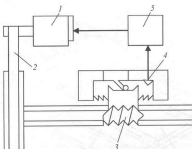


Рис. 1.7. Традиционный привод линейных перемещений:

1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – шариковинтовая передача;  
4 – концевой выключатель; 5 – блок управления двигателем

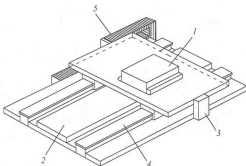
– трение в сопрягаемых деталях, которое ведет к неизбежному изнашиванию в процессе эксплуатации; необходимость смазывания трущихся деталей;

– датчик обратной связи обычно устанавливается на валу двигателя, что не позволяет контролировать фактическое перемещение рабочего органа.

Мехатронный модуль на основе линейного двигателя включает в себя электромагнитный статор, плоский ротор и датчик линейных перемещений (рис. 1.8).

Необходимые энергетические, силовые и точностные параметры привода обеспечиваются применением высококоэрцитивных магнитов, управляющих и измерительных устройств, другими словами, достигаются мехатронными средствами. Между ротором и статором есть воздушный зазор; статор крепится к станине или колонне станка, ротор – к рабочему органу (конечному звену).

Ротор состоит из ряда прямоугольных постоянных магнитов, изготовленных из редкоземельных материалов. Закреплены магниты на тонкой плите из специальной высокопрочной керамики, коэффициент температурного расширения которой в 2 раза меньше, чем у гранита. Использование керамики совместно с эффективной системой охлаждения



**Рис. 1.8. Мехатронный модуль на основе линейного двигателя фирмы Siemens:**

*1 – ротор линейного двигателя; 2 – статор; 3 – измерительная линейка; 4 – направляющие; 5 – силовой кабель*

решило многие проблемы линейных приводов, связанные с температурными факторами, наличием сильных магнитных полей, жесткостью конструкции и т.п. В качестве датчика обычно применяется измерительная линейка с высокой дискретностью (0,1 мкм).

К основным преимуществам мехатронных модулей на базе ЛД можно отнести:

- высокие динамические характеристики: максимальные скорости до 200 м/мин, максимальные ускорения до 5g, устойчивость к силовым перегрузкам, плавность хода;
- микронную точность движений при практически неограниченной длине перемещений;
- отсутствие трущихся частей, отсюда высокая долговечность и надежность привода;
- модульность и ремонтпригодность конструкции;
- простоту компоновки многокоординатных систем на базе линейных модулей, так как рабочие органы машин можно устанавливать непосредственно на подвижную часть линейных двигателей.

Таким образом, линейные двигатели являются перспективной базой для создания прецизионных мехатронных модулей. Широкое внедрение линейных модулей в настоящее время сдерживается их достаточно высокой стоимостью (наиболее дорогостоящими компонентами являются редкоземельные магниты), а также потребностью в дополнительных системах охлаждения и теплоизоляции.

В целом именно новые типы двигателей становятся основой при создании мехатронных модулей нового поколения. К их числу можно в первую очередь отнести управляемые асинхронные электродвигатели, вентильные, пьезоэлектрические и шаговые двигатели. Ряд примеров построения таких модулей приведен в гл. 3. При этом технико-экономическая эффективность модульного проектирования определяется следующими основными факторами:

- 1) сокращение сроков и трудоемкости проектирования многокоординатных машин, экономичность благодаря высокому уровню унификации и стандартизации элементов и интерфейсов;
- 2) возможность быстрой реконфигурации системы в специализированную машину под конкретную технологическую задачу без функциональной избыточности;
- 3) требование к обеспечению повышенной надежности и ремонтнопригодности сложных комплексов при эксплуатации.

Научно-техническая проблема реализации прецизионных движений, весьма актуальная для станков как технологических макросистем, встает еще более остро при создании мехатронных миниатюрных машин и микросистем. Например, в Институте станков и прессов IWU (Кемниц, Германия) был разработан микроманипулятор, предназначенный для выполнения высокоточных сборочных операций с компонентами оптоэлектроники для оптоволоконных кабелей (размеры объекта работ  $15 \times 15 \times 1,9$  мм<sup>3</sup>; масса объекта работ 5 г; точность позиционирования 1 нм). Манипулятор оснащен двумя микросхватками с движителями на базе сплавов с памятью формы.

#### 1.1.4. Компактность и миниатюризация мехатронных модулей и машин

Важным преимуществом мехатронных модулей и систем по сравнению с традиционными решениями является компактность конструкции. Требования к массогабаритным характеристикам изделия зачастую становятся решающими при проектировании модулей движения. Так проф. В.Г. Каган — автор целого ряда пионерских идей в области мехатроники —



рассказывает в своей новой книге о именно такой постановке задачи [24]: "Дело в том, что все пространство в башне танка уже занято всякими приборами, и разместить даже относительно небольшой двигатель с редуктором, тахогенератором и датчиком положения было просто негде. ... Тогда родился первый наш электромеханизм – двигателя, внутри которого располагается винт, а гайка соединена с вращающимся ротором".

В настоящее время мехатроника предлагает разработчикам три основных подхода к проектированию компактных модулей.

1. Замена электромеханических устройств на мехатронные модули движения, что позволяет исключить многоступенчатые кинематические цепи от двигателя до конечного звена, сократив избыточные габаритные элементы. Примером этого подхода могут служить мехатронные модули на основе линейных двигателей, рассмотренные в предыдущем параграфе.

2. Конструктивное объединение в едином корпусе всех основных приводных элементов. Пример такого решения – ротационный модуль фирмы Maxon – показан на рис. 1.9. В состав модуля входят коллекторный электродвигатель с постоянными магнитами, планетарный редуктор и фотопульсный датчик обратной связи (никодер).

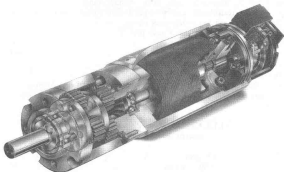


Рис. 1.9. Мехатронный модуль фирмы Maxon

3. Синергетическая интеграция элементов – это наиболее перспективный метод, который позволяет целиком исключить блоки и интерфейсы, получая, таким образом, ультракомпактные конструкции. В гл. 2 даны общая методика и примеры реализации этого подхода в мехатронике.

В последние годы ярко выражена тенденция к созданию миниатюрных двигателей и мехатронных модулей. Примером может служить миниатюрный мехатронный модуль фирмы Maxon "Motor AG".

Этот модуль мощностью 0,5 Вт имеет диаметр 8 мм, длину 16 мм и весит около 4 г. Керамический вал двигателя имеет диаметр 0,8 мм – как кончик отточенного карандаша. Мехатронные модули такого типа применяются в управляемых машинах самого различного назначения: это лазерные устройства, инсулиновые помпы, миниатюрные роботы. Мехатронные технологии производства и сборки модуля позволяют обеспечить линейные регулировочные характеристики, малую инерцию ротора, высокую скорость и ускорение.

### 1.1.5. Кинематические структуры машины нового поколения

Выбор кинематической структуры является важнейшей задачей при концептуальном проектировании машин нового поколения. Эффективность ее решения во многом определяет главные технические характеристики системы, ее динамические, скоростные и точностные параметры. Именно мехатроника дала новые идеи и методы для проектирования движущихся систем с качественно новыми свойствами.

Проблематика структурного синтеза управляемых машин заключается в *неоднозначности выбора* координатных базисов программирования и исполнения движений, а также в использовании *различных критериев* их оценки. Рассмотрим суть этих понятий.

Согласно терминологии проф. Г.В. Коренева [28], *программой движения* называются одно или несколько уравнений, связывающих координаты движущегося объекта, которые определяют цель движения. Координатный базис, в котором задается программа движения управляемой машины, будем называть *базисом программирования движений (БПД)*.

В общем случае выбор базиса программирования в мехатронике определяется технологической постановкой задачи движения. Следует начать с анализа желаемых движений непосредственно рабочего органа, который условно отсечен от других звеньев машины. Такой подход обусловлен тем, что рабочий орган является конечным звеном мехатронной системы и именно он в процессе движения оказывает технологическое

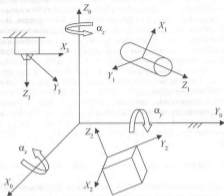


Рис. 1.10. Декартовые базисы программирования движений

воздействие на объект работ. Совокупность остальных механических звеньев необходима для исполнения заданного движения. Поэтому выбор кинематической структуры и состава этой цепи является подчиненной, хотя и взаимосвязанной, задачей. Пример программирования движения для промышленного робота с контурным силовым управлением приведен в гл. 5.

Практика проектирования показывает, что для программирования движений в подавляющем большинстве приложений предпочтительной является прямоугольная декартовая система координат. При этом встречаются следующие разновидности декартового базиса программирования движений (рис. 1.10):

- базовая (мировая) система координат  $X_0, Y_0, Z_0$ , единая для данной технологической системы;
- система координат  $X_1, Y_1, Z_1$ , связанная с рабочим органом (инструментом);
- система координат  $X_2, Y_2, Z_2$ , связанная с объектом работ (обрабатываемой деталью);

– система координат  $X_1, Y_1, Z_1$ , связанная с информационно-измерительной системой (например, системой технического зрения).

Декартов базис соответствует естественному восприятию картины мира человеческим сознанием, ведь подавляющее большинство объектов технологической среды имеет линейные формы. Прямоугольная система координат является доминирующей в начертательной геометрии и инженерной графике, в том числе и в современных системах автоматизированного проектирования (САПР). Поэтому декартов базис удобен и нагляден и для инженеров-конструкторов, и для рабочих – операторов станков.

Как было подчеркнуто выше, выбор кинематической структуры при проектировании машины может рассматриваться как достаточно самостоятельная задача. Будем понимать под *базисом исполнительных движений (БИД)* систему независимых обобщенных координат, однозначно связанных с перемещениями кинематических пар, которые выполняются соответствующими приводами. Направление осей БИД определяется кинематической схемой и конструктивной компоновкой мехатронной системы. Текущая конфигурация машины в процессе ее движения однозначно описывается вектором обобщенных координат в выбранном БИД.

В конструкциях металлообрабатывающих станков традиционно применялся декартов БИД, который конструктивно реализуется взаимно-перпендикулярными направляющими.

Очевидны преимущества такого выбора БИД:

- а) соответствие декартовой формы БИД и БИД, что удобно для проектирования стандартными средствами, и не требует высокого образовательного уровня персонала, обслуживающего станок на производстве;
- б) линейные свойства БИД и БИД, позволяющие использовать относительно простые и, следовательно, дешевые системы управления станком.

Линейность БИД в декартовой системе координат позволяет реализовать перемещение инструмента вдоль каждой оси с помощью только одной степени подвижности.

Например, для станка с тремя координатами (рис. 1.11) имеем следующие приращения для декартовых и обобщенных координат станка:

$$\begin{cases} dx = a_1 dq_1; \\ dy = a_2 dq_2; \\ dz = a_3 dq_3, \end{cases} \quad (1.1)$$

где  $a_j = \text{const}$  ( $j = 1, 2, 3$ ).

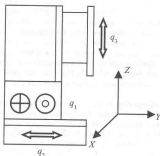


Рис. 1.11. Трехкоординатный станок с декартовым базисом исполнения движений [39]

Однако доминирующими критериями для оценки БИД являются динамические и точностные показатели машины, а отнюдь не его привлекательность с точки зрения простоты и наглядности. Выделим ряд технических проблем для машин с прямоугольным БИД, которые обусловлены изготовлением и компоновкой декартовых направляющих станка:

- 1) сложно обеспечить высокую взаимную перпендикулярность направляющих, особенно в крупногабаритных станках;
- 2) машины имеют большие габариты и массу, поскольку направляющие располагаются одна на другой;
- 3) направляющие подвергаются воздействию изгибающих моментов, которые вызывают дополнительные деформации, в результате ухудшается точность механической системы.

Таким образом, прямоугольный БИД имеет ряд существенных недостатков, что заставляет разработчиков многокоординатных систем обращаться к нелинейным координатным базисам.

В нелинейных БИД движение привода одной кинематической пары ведет к перемещению рабочего органа сразу по нескольким декартовым осям, при этом связи между этими перемещениями описываются нелинейными функциями.

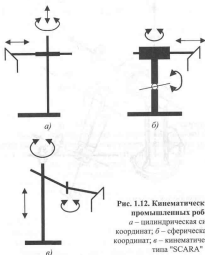


Рис. 1.12. Кинематические схемы промышленных роботов: а – цилиндрическая система координат; б – сферическая система координат; в – кинематическая схема типа "SCARA"

Большой теоретический и прикладной опыт создания многомерных нелинейных систем накоплен в области манипуляционной техники. Зачастую станкостроение и робототехника в своем развитии идут параллельными путями и используют достижения друг друга далеко не в полной мере.

На рис. 1.12 и 1.13 представлены наиболее распространенные кинематические схемы промышленных роботов.

Все представленные схемы можно отнести к нелинейным БИД, где для движения рабочего органа вдоль одной декартовой оси требуется координированное перемещение нескольких степеней подвижности робота.

Рассмотрим двухзвеновый манипулятор типа "SCARA" (рис. 1.14).

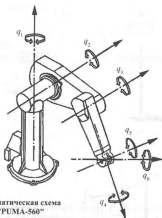


Рис. 1.13. Кинематическая схема манипулятора "PUMA-560"

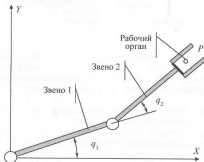


Рис. 1.14. Расчетная схема для манипулятора типа "SCARA"

Для этого манипулятора приращения декартовых и обобщенных координат связаны следующими нелинейными зависимостями (вывод дан в Приложении):

$$\begin{cases} dx = a_{11}(q_1, q_2) dq_1 + a_{12}(q_1, q_2) dq_2; \\ dy = a_{21}(q_1, q_2) dq_1 + a_{22}(q_1, q_2) dq_2, \end{cases} \quad (1.2)$$

где  $a_{11} = -L_1 \sin q_1 - L_2 \sin(q_1 + q_2)$ ;

$$a_{12} = -L_2 \sin(q_1 + q_2);$$

$$a_{21} = L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2), \quad a_{22} = L_2 \cos(q_1 + q_2).$$

Здесь  $L_1, L_2$  – длины звеньев.

Как следует из уравнений (1.2), поворот любого из шарниров ведет к движению полюса  $P$  рабочего органа одновременно по осям  $X$  и  $Y$ . Если же требуется выполнить перемещение схвата параллельно одной декартовой оси ( $\Delta X$  или  $\Delta Y$ ), то необходимо дать приращение обеим обобщенным координатам. Важно также заметить, что в уравнениях (1.2) все коэффициенты  $a_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) являются нелинейными (в данном случае – тригонометрическими) функциями обобщенных координат  $q_1$  и  $q_2$ .

Нелинейность БИД порождает целый ряд характерных особенностей мехатронных систем этого класса.

1. *Анизотропия и неоднородность динамических, упругих и скоростных свойств машины.* Это значит, что в различных конфигурациях система может обладать различными инерционными, скоростными и жесткостными характеристиками. Такие свойства присущи и руке человека. Так, для нанесения сильного удара боксер вытягивает руку, придавая ей предельную осевую жесткость. В то же время рука скрипача, который совершает плавные и мягкие перемещения смычка, согнута в локте и максимально подтянута.

2. *Переменность параметров в нелинейных уравнениях, что может приводить к потере управляемости системой в некоторых конфигурациях.* Такие положения называются *особыми* или *сингулярными*. В частности, для манипулятора "SCARA" особые конфигурации возникают, когда  $q_2 = 0$  (манипулятор вытянут в линию) либо в случае  $q_2 = \pi$  (звенья манипулятора сложены).

3. *Сложность задания движений манипуляторов в обобщенных координатах, связанных со степенями подвижности.* Например, при программировании антропоморфного манипулятора "PUMA-560" (см. рис. 1.13) оператор должен взаимосвязано управлять шестью угловыми перемещениями. Для эффективного программирования удобно формировать



движение непосредственно концевой точки робота. Поэтому в робототехнике разработан целый ряд оригинальных методов копирующего и полуавтоматического режимов для обучения и дистанционного управления роботами [16, 31, 35].

Анализируя типовые кинематические схемы манипуляционных роботов (см. рис. 1.12–1.14), можно отметить присущие им две особенности:

1) оси кинематических пар расположены параллельно либо перпендикулярно друг другу;

2) звенья соединены в последовательную кинематическую цепь.

Здесь явно прослеживается бионический подход, ведь приведенные схемы манипуляторов (особенно антропоморфные структуры типа "PUMA" и "SCARA") аналогичны по кинематике человеческой руке. Эти структуры обеспечивают промышленным роботам высокую манипулятивность и большой угол сервиса, вместе с тем они имеют и целый ряд существенных недостатков:

– низкий показатель грузоподъемность/масса манипулятора, что обусловлено последовательной схемой соединения звеньев. Действительно, каждый привод вынужден перемещать не только полезную нагрузку, но и все последующие по цепи звенья;

– погрешности в перемещениях всех шарниров суммируются на концевой точке манипулятора, что приводит к низкой точности позиционирования манипуляторов по сравнению с машинами с декартовой компоновкой;

– относительно низкая жесткость манипуляционных роботов, так как упругое отклонение рабочего органа есть результат накопления деформаций по цепи по всем степеням подвижности робота. Причем весовые коэффициенты этой суммы пропорциональны расстояниям от концевой точки до осей соответствующих шарниров.

Одним из новых и эффективных путей преодоления перечисленных недостатков – это создание машин с параллельной кинематикой (МПК). В основе их конструктивной схемы лежит обычно платформа Стюарта. Машина имеет основание и подвижную платформу, соединенные несколькими стержнями управляемой длины (рис. 1.15). Стержни закреплены на концах шарнирами, у которых не менее двух степеней подвижности. На подвижной платформе крепится рабочий орган (например, инструментальная или измерительная головка). Изменяя длины стержней с помощью приводов линейного перемещения, можно управлять

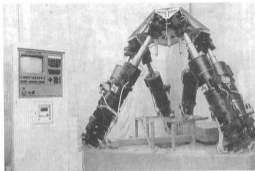


Рис. 1.15. Первый отечественный гексапод (Новосибирск, 1984) [24]

перемещениями и ориентацией подвижной платформы, а следовательно, и жестко связанного с ней рабочего органа.

Для универсальных машин, где требуется управление пространственным перемещением рабочего органа по шести степеням свободы, необходимо соответственно шесть стержней. В мировой литературе такие машины называются "гексаподы" (гекса – шесть). Если управляемых стержней три, то МПК называется трипод.

Основными преимуществами машин с параллельной кинематикой являются:

- высокая точность исполнения движений;
- высокие скорости и ускорения рабочего органа;
- отсутствие традиционных направляющих и станины (в качестве несущих элементов конструкции используются приводные механизмы), поэтому улучшенные массогабаритные параметры и низкая материалоемкость;
- высокая степень унификации мехатронных узлов, обеспечивающая технологичность изготовления и сборки машины и конструктивную гибкость.

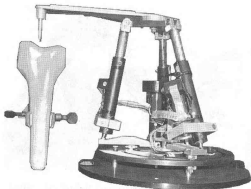


Рис. 1.16. Трипод, сканирующий поверхность кости [106]

Повышенные точностные показатели МПК обусловлены следующими ключевыми факторами:

1) здесь не происходит суперпозиции (наложения) погрешностей позиционирования звеньев при переходе от базы к рабочему органу, что выгодно отличает гексаподы от кинематических схем с последовательной цепью звеньев;

2) стержневые механизмы обладают высокой жесткостью, так как при наличии двухстепенных шарниров крепления стержни не подвержены изгибающим моментам и работают только на растяжение-сжатие;

3) применяются прецизионные датчики обратной связи и измерительные системы (например, лазерные), а также используются компьютерные методы коррекции перемещений рабочего органа.

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. 1.16), а также гексапод фирмы "ЛАПИК" (Саратов), характеристики которого приведены в гл. 4.



**Рис. 1.17. Технологический комплекс "HexaBend"  
(Институт станков и прессов IWU, Германия)**

Полученная цифровая информация о геометрии эталонного образца передается затем в САД/САМ-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. 1.17 показан пример гексапода, выполняющего гибочные операции в составе технологического комплекса "HexaBend" для производства сложных профилей и труб.

Следует особенно подчеркнуть, что все МПК построены на мехатронных принципах. Особенности математического обеспечения, программирования и управления этим классом машин обусловлены тем, что их базис исполнения движений является косоугольным. Действительно, за обобщенные координаты для МПК обычно принимают длины управляемых стержней (потому их иногда называют  $l$ -координатами). Тогда координатные оси БИД машины могут пересекаться в общем случае под произвольными углами, образуя косоугольную систему координат. Если проследить эволюцию свойств БИД в современных машинах начиная от традиционных компоновок станков (табл. 1.1), то МПК – это наиболее сложный вариант мехатронной системы.

### 1.1. Свойства координатных базисов исполнения движений мехатронных систем

Мехатронные системы	Свойства координатного базиса исполнения движений		
	Линейность базиса	Взаимное расположение осей базиса	Цель кинематических пар
Традиционные станки	Линейный (декартовый)	Ортогональное	Последовательная
Манипуляционные роботы	Нелинейный	Ортогональное и параллельное	Последовательная
Машины с параллельной кинематикой	Нелинейный	Косоугольный	Параллельная, гибридная

Однако косоугольность и нелинейность координатного базиса машины отнюдь не ведет автоматически к усложнению аналитического решения задач управления и моделирования. В качестве примера рассмотрим обратную задачу о положении, которая состоит в нахождении вектора обобщенных координат механизма для известного положения его концевой точки, заданного в декартовой системе координат.

Для манипулятора типа "SCARA" (см. рис. 1.14) по заданным координатам  $(x, y)$  требуется найти значения углов  $(q_1, q_2)$ . Решение этой задачи имеет вид (вывод приведен в Приложении)

$$q_1 = \pm \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) \pm \arcsin\left(\frac{L_2}{r} \sqrt{1 - \left[\frac{r^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right]^2}\right);$$

$$q_2 = \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right),$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$ .

Очевидно, что для манипуляторов сложность нахождения аналитического решения обратной задачи о положении определяется числом степеней подвижности и структурой последовательной кинематической це-

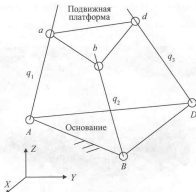


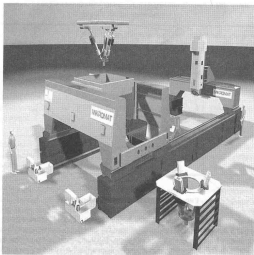
Рис. 1.18. Расчетная схема для трипода

пи. Например, для шестизвенного робота типа "PUMA" (см. рис. 1.13) разработано несколько методов (винтовой алгебры, двойственных кватернионов, геометрический подход и др. [68]), причем все они основаны на специальных математических преобразованиях и требуют значительных вычислительных затрат.

Наоборот, для машин с параллельной кинематикой обратная задача о положении решается аналитически просто. Так, для трипода (рис. 1.18) при расчете следует задать декартовы координаты трех неподвижных точек основания:  $A(x_A, y_A, z_A)$ ,  $B(x_B, y_B, z_B)$ ,  $D(x_D, y_D, z_D)$ , а также трех точек, определяющих положение подвижной платформы:  $a(x_a, y_a, z_a)$ ,  $b(x_b, y_b, z_b)$ ,  $d(x_d, y_d, z_d)$ .

Тогда обобщенные координаты механизма (длины стержней) можно найти как расстояния между соответствующими точками:

$$\begin{cases} q_1^2 = (x_A - x_a)^2 + (y_A - y_a)^2 + (z_A - z_a)^2; \\ q_2^2 = (x_B - x_b)^2 + (y_B - y_b)^2 + (z_B - z_b)^2; \\ q_3^2 = (x_D - x_d)^2 + (y_D - y_d)^2 + (z_D - z_d)^2. \end{cases}$$



**Рис. 1.19.** Технологический комплекс "Dunapod"  
(Институт станков и пресов IWF, Германия)

Расчет по данным формулам не представляет собой вычислительных сложностей. Однако следует отметить, что решение прямой задачи о положении для МПК является неординарной аналитической и вычислительной проблемой.

В целом программирование и управление движением МПК в реальном масштабе времени стало возможным благодаря появлению мощных компьютеров, имеющих высокую производительность и большие объемы памяти. Мехатронный метод интеграции прецизионной механики с микроэлектронными, вычислительными и сенсорными устройствами делает перспективным создание и внедрение МПК в различных отраслях промышленности. Таким образом, именно мехатронные идеи дали импульс

для появления и практического применения машин с параллельной кинематической структурой.

В мехатронных системах нового поколения для осуществления больших перемещений возможна комбинация последовательной и параллельной структур кинематических цепей. Примером такой гибридной кинематической структуры является технологический комплекс "Dunapod", представленный на рис. 1.19.

Комплекс предназначен для комплексной обработки крупногабаритных пресс-форм. В его состав входят декартовы направляющие для выполнения глобальных перемещений и модуль с МПК (трипод или гексапод) для осуществления локальных движений. Комплекс обладает кинематической избыточностью, что позволяет оптимизировать движения мехатронной системы, например, по критерию быстродействия.

Дополнительные примеры современных машин со сложными координатными базами даны в гл. 4. Для математического описания, анализа и синтеза мехатронных систем с нелинейными координатными базами весьма эффективным является тензорно-геометрический подход, изложенный в гл. 5.

Обобщая известные автору данные по эффективным мехатронным системам, работающим в нелинейных координатных базах, можно выдвинуть следующую гипотезу: *для этого класса машин связи между об- щими показателями качества машины (точностью и материалоемкостью, максимальной скоростью и габаритами, производительностью машины и ценой и т.п.) также имеют нелинейный характер.*

Нелинейность этих связей означает, что для повышения целевого показателя качества (например, точности движений) нет необходимости увеличивать массогабаритные параметры машины в пропорциональное число раз. Возможно, существует область, где небольшими изменениями параметров можно добиться резкого скачка по критерию качества. Следовательно, один из мехатронных способов создания машин с качественно новыми свойствами состоит в поиске нетрадиционных координатных базисов, оптимальных для поставленных функциональных задач.

### 1.1.6. Системы управления машин нового поколения

Качественно новые свойства современных мехатронных систем определяются применением новых аппаратно-программных средств и технологий, методов и алгоритмов управления движениями, которые особенно динамично развиваются в последнее десятилетие.



Анализ проектов ведущих исследовательских центров в области мехатроники показывает, что разработчики стремятся наделить перспективные мехатронные системы способностью к интеллектуальному поведению. Именно этот современный подход к задачам управления выделен и в определении мехатроники. Научно-техническая проблема создания технических систем с искусственным интеллектом, поставленная в начале 70-х годов XX века, является и сегодня одним из перспективных и весьма модных научных направлений. В нашей стране в области интеллектуального управления мехатронными системами ведущей является научная школа акад. И.М. Макарова и проф. В.М. Лохина в МИРЭА.

Создание машин нового поколения, способных автономно функционировать в непредсказуемых условиях внешней среды, потребовало принципиально новых подходов к управлению движением. Эти методы и системы образовали класс интеллектуальных систем автоматического управления. Главными чертами интеллектуальных систем управления являются использование информационных технологий обработки знаний и управление на основе анализа внешних событий и ситуаций [23, 41]. Поэтому интеллектуальные системы управления в мехатронике не обладают "интеллектом" в общепринятом смысле. Их свойства точнее соответствуют пониманию латинского слова *intelligens*, что означает "разумный", "понимающий", "смышленный".

Академик И.М. Макаров, основываясь на определении знаний и анализе их отличительных особенностей, относит к классу интеллектуальных технологий управления по крайней мере четыре метода:

- технологии экспертных систем;
- нечеткая логика;
- нейросетевые структуры;
- ассоциативная память.

Архитектура любой интеллектуальной системы содержит следующие основные блоки:

- базу знаний с развитыми механизмами вывода;
- интеллектуальный решатель задач;
- интеллектуальный планировщик задач;
- систему объяснений;
- интерфейс с пользователем.

Выступая на пленарном заседании международного симпозиума ISIC-2000, проф. Г.Н. Саридис дал следующее определение интеллектуального робота: *"Интеллектуальный (intelligent) робот – это интеллектуальная машина, выполняющая комплексные задачи в изменяющихся и*

*неопределенных средах при минимально возможном взаимодействии с человеком-оператором*" [102].

Интеллектуальное поведение предполагает наличие у мехатронной системы следующих функциональных возможностей:

- значительная автономность и гибкость при планировании и исполнении движений при минимально возможном взаимодействии с человеком-оператором;
- адаптация и оптимизация функциональных движений в условиях изменяющейся внешней среды и при наличии существенных возмущающих воздействий;
- автоматический контроль и диагностика собственного состояния для обеспечения надежной и безопасной работы.

Особенно актуально применение интеллектуальных систем управления для специальных роботов, работающих в неопределенных внешних средах (см. рис. 1.1–1.4). В таких средах часто возникают ситуации, когда человек-оператор не может быстро принять гарантированно правильное решение. Причиной этого могут быть недостаток времени для передачи и приема сигналов по длинному кабелю, нечеткость информации, получаемой оператором от сенсорной системы, непредсказуемые изменения в экстремальной среде и т.п. В подобных ситуациях возникает необходимость самостоятельного принятия роботом решений и их немедленного исполнения в автоматическом режиме.

Интерес к интеллектуальным системам управления вызван тремя основными причинами [41]:

- а) невозможность обеспечения повышения качества управления радиационными технологиями, так как они не учитывают всех неопределенностей системы;
- б) наличие фундаментальной теоретической базы, разработанной в трудах проф. Д.А. Поспелова, американского ученого Л. Заде и других специалистов;
- в) реальность применения существующей элементной базы в прикладных задачах управления.

Остановимся подробнее на первой из выделенных причин. Действительно, в теории автоматического управления движущимися системами, в частности в робототехнике, всегда стояла задача эффективной компенсации влияния возмущающих воздействий и параметрических изменений в объекте управления. Первоначально эта проблема решалась в рамках классической теории замкнутых систем автоматического управления

(САУ). Особенно глубоко разработаны частотные методы анализа и синтеза при проектировании следящих приводов [22, 44, 65].

В монографии [31] предложен целый ряд регуляторов и корректирующих связей, учитывающих специфику копирующих манипуляторов как объектов управления. Данные регуляторы позволяют компенсировать влияние на динамические характеристики исполнительных систем роботов переменных моментов инерции нагрузки, а также внешних моментов, изменяющихся в известных пределах.

Однако если отдельные параметры и возмущающие воздействия варьируются в широких диапазонах, то отрицательные обратные связи с постоянными коэффициентами не могут полностью подавить их влияние на точность и другие показатели качества движения. Для систем управления станков к таким случайно действующим факторам обычно относят колебания припуска на обработку, изменения твердости материала и температуры деталей, погрешность установки заготовки и ряд других изменений [57]. В подобных системах возможно применение методов адаптивного управления. Фундаментальное понятие адаптации автоматических систем сформулировал проф. Я.З. Цыпкин: *"Адаптация – это процесс изменения параметров и структуры системы, а возможно и управляющих воздействий, на основе текущей информации с целью достижения определенного, обычно оптимального, состояния системы при начальной неопределенности и изменяющихся условиях работы"* [70].

Практическое использование и настройка адаптивных систем с цифровым управлением осложняется тем, что они относятся к классу дискретных систем с переменной структурой и параметрами. Это свойство может вызвать в процессе движения мехатронной системы нелинейные динамические эффекты (автоколебания, зависимость качества переходных процессов от величины и знака начальных условий и т.п.).

Среди новейших достижений в области аппаратно-программных средств систем управления наибольшее значение для развития мехатроники имеют следующие разработки:

- создание интеллектуальных мехатронных модулей путем конструктивной интеграции электромеханических устройств (двигателей и преобразователей движения) со встроенными интеллектуальными компонентами (управляющими контроллерами, датчиками и электронными блоками); подробно интеллектуальные модули описаны в гл. 2;
- построение систем управления с открытой архитектурой на базе персональных компьютеров (типа PC-NC) для сложных мехатронных устройств [26, 64, 74];

- применение контроллеров движения (motion controllers) как перспективного устройства для управления многокоординатными мехатронными системами;
- разработка распределенных систем управления движением для многодвигательных комплексов и объединение управляющих контроллеров в сети через стандартные шины и протоколы (наиболее распространенными в настоящее время являются шины PCI, "SERCOS", "CANbus", "Profibus");
- создание силовых преобразователей нового поколения и интеллектуальных силовых модулей на базе новейших полупроводниковых приборов (полевых MOSFET и биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT);
- применение интеллектуальных датчиков и мехатронных устройств на базе технологий микроэлектромеханики (MEMS-технологий);
- внедрение принципиально новых технологий коммуникации для процессов управления, в частности устройств беспроводной связи между элементами мехатронных систем, а также возможность обмена информацией между ними через локальные и глобальные (например, Интернет) компьютерные сети;
- разработка дружественных человеко-машинных интерфейсов для эффективного программирования движений и взаимодействия оператора с мехатронной системой.

### 1.1.7. Сложные движения мехатронных систем в пространстве и времени

Задачу описания движения многомерной мехатронной системы можно условно разделить на две взаимосвязанные подзадачи: движение в пространстве и во времени.

Законы пространственного перемещения всех звеньев мехатронной системы определяются технологической постановкой задачи движения. Для подавляющего большинства операций при программировании задается желаемая траектория рабочего органа.

Рабочий орган как твердое тело имеет в пространстве шесть степеней свободы (см. рис. 1.10). Следовательно, его положение и ориентация в выбранной декартовой системе координат однозначно определяются шестикомпонентным вектором-столбцом

$$\vec{X} = (x_p, y_p, z_p, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z) \quad (n \times 1). \quad (1.3)$$

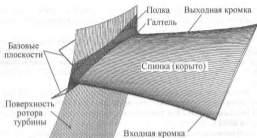


Рис. 1.20. Лопатка турбинного двигателя

Первые три компонента данного вектора – это декартовы координаты полюса  $P$ , а три остальные – это углы, описывающие ориентацию рабочего органа (например, можно использовать эйлеровы углы).

Форма траектории движения рабочего органа определяется геометрией объекта работ, применяемым инструментом и технологией выполнения операции. Так, при программировании металлорежущих станков обычно строится эквидистанта – линия, параллельная контуру обрабатываемой детали, учитывающая также плавность переходов между участками. Современные мехатронные системы, особенно с нелинейным базисом, целесообразно применять для обработки деталей со сложными пространственными формами. К их числу можно отнести аэродинамические поверхности для изделий авиакосмической промышленности, корпусные детали, пресс-формы и штампы, полужамкнутые емкости, сложные литые и кованные изделия. На рис. 1.20 показана лопатка газотурбинного двигателя, состоящая из нескольких криволинейных элементов.

Финишную механообработку таких сложных изделий может осуществлять робот-станок РОСТ-300 (разработка ИМАШ РАН и ОАО "НИПТИ "Микрон"), описание и технические характеристики которого даны в гл. 4.

Закон движения во времени исполнительных приводов определяется, с одной стороны, желаемым законом перемещения рабочего органа, а с другой – кинематикой многомерной системы. В задачах автоматизированного машиностроения, как правило, задается достаточно простой профиль скорости рабочего органа. Например, на операциях лазерной резки и окраски требуется постоянная контурная скорость. Однако для

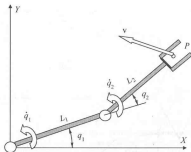


Рис. 1.21. Постановка обратной задачи о скорости для манипулятора типа "SCARA"

его реализации в мехатронных системах с нелинейным базисом потребуется движение во времени исполнительных приводов по сложным законам.

Рассмотрим эту проблему на примере двухзвенного манипулятора типа "SCARA", рабочий орган которого должен перемещаться по прямой траектории с постоянной скоростью (рис. 1.21).

Определим скорости вращения шарниров манипулятора  $\dot{q}_1$ ,  $\dot{q}_2$  для заданного вектора скорости рабочего органа  $v$ . Такая постановка задачи управляемого движения в робототехнике называется обратной задачей о скорости. Вывод зависимостей решения этой задачи для манипулятора типа "SCARA" дан в Приложении.

Программа расчета в среде MATLAB разработана на основе итоговой формулы

$$\begin{cases} \dot{q}_1 = \frac{1}{D} [b_{11}(q_1, q_2) \dot{x} + b_{12}(q_1, q_2) \dot{y}], \\ \dot{q}_2 = \frac{1}{D} [b_{21}(q_1, q_2) \dot{x} + b_{22}(q_1, q_2) \dot{y}], \end{cases} \quad (1.4)$$

где  $b_{11} = a_{22} = L_2 \cos(q_1 + q_2)$ ;  $b_{12} = -a_{12} = L_2 \sin(q_1 + q_2)$ ;  $b_{21} = -a_{21} = -L_1 \cos q_1 - L_2 \cos(q_1 + q_2)$ ;  $b_{22} = a_{11} = -L_1 \sin q_1 - L_2 \sin(q_1 + q_2)$ ;  $D = L_1 L_2 \sin q_2$ .

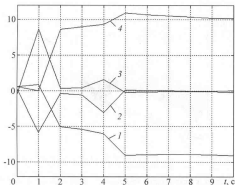


Рис. 1.22. Законы движения звеньев манипулятора:

- 1, 4 – углы поворота соответственно первого и второго звеньев;  
2, 3 – скорость движения соответственно первого и второго звеньев

При моделировании исследовалось движение манипулятора параллельно оси  $X$  с постоянной скоростью. Движение начиналось из заданной начальной конфигурации ( $q_{01} = q_{02} = 30^\circ$ ), скорость  $v = 0,3$  м/с. На рис. 1.22 представлены законы изменения обобщенных координат  $q_1(t)$  и  $q_2(t)$ , а также графики соответствующих обобщенных скоростей.

Таким образом, для того чтобы обеспечить равномерное движение рабочего органа, исполнительные приводы робота должны отработать сложные временные программы. Причем в течение рассмотренного интервала времени оба привода неоднократно совершают скоростные рывки, включающие участки быстрого разгона и торможения.

В заключение этого параграфа можно сделать вывод о том, что мехатронный метод интеграции механики, электроники и компьютерной техники в машинах и системах нового поколения придает им качественно новые свойства по скорости и точности движений, кинематическим возможностям и компактности. Именно применение мехатронных идей позволило создать интеллектуальные машины для выполнения принципиально новых функций, столь нужных сегодня людям.

## 1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ МЕХАТРОНИКИ

Современный термин "мехатроника" был введен японской фирмой Yaskawa Electric в 1969 году и зарегистрирован как торговая марка в 1972 году. Это название получено комбинацией слов

"МЕХАТРОНИКА" = "МЕХА ника" + "элек ТРОНИКА".

Обе части термина "мехатроника" имеют греческие лингвистические корни (по-гречески: "meschanē" – машина и "electron" – янтарь).

Любопытно отметить, что в отечественной технической литературе еще в 1950-х годах использовался подобным же образом образованный термин "механотроны" [13]. Так назывались электронные лампы с подвижными электродами, которые применялись в качестве датчиков малых перемещений, скоростей и вибраций. Начиная с 80-х годов термин "мехатроника" начинает применяться в мировой технической литературе как название класса машин с компьютерным управлением движением.

Специальность "Мехатроника" впервые вошла в классификатор Государственного комитета по высшему образованию в 1994 году. Первыми лицензировали подготовку по этой специальности МГТУ "СТАНКИН" (заведующий кафедрой проф. В.С. Кулешов), МГТУ им. Н.Э. Баумана (заведующий кафедрой проф. Н.А. Лакота) и Балтийский ГТУ (заведующий кафедрой проф. А.М. Поталов). В настоящее время по специальности "Мехатроника" готовят дипломированных инженеров уже в 25 вузах различных регионов России.

Определение мехатроники как новой области науки и техники из действующего Государственного образовательного стандарта РФ по направлению "Мехатроника и робототехника" дано в начале книги. Ниже приведено несколько интерпретаций понятия "мехатроника", предложенных ведущими университетами и специалистами в данной области.

### *Мехатроника – это*

• "... область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электромеханическими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем и 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" [105].

• "... синергетическое сочетание точной механики, электронных систем управления и информационных технологий для проектирования, производства и эксплуатации интеллектуальных автоматических систем" [105].

• "... 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" [11].

• "... область науки, которая сочетает основы механических, электронных и компьютерных инженерных наук" [105].

• "... область науки, посвященная анализу исполнительных составных мехатронных объектов и функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов между ними и с внешней средой, а также синтезу мехатронных объектов" [72].

• "... технология, которая объединяет механику с электронными и информационными технологиями для получения, как функционального объединения, так и пространственной интеграции в компонентах, модулях, изделиях и системах" [105].

• "... философия проектирования, которая использует синергетическую интеграцию механики, электроники и компьютерных технологий для производства качественно новых изделий, процессов и систем" [95].

• "... метод принятия сложных решений для функционирования физических систем" [43].

• "... идеология пространственного и временного интегрирования функций в инженерных устройствах и технологических процессах" [24].

Приведенный список не претендует на энциклопедичность и может быть расширен. Однако он вполне достаточен для выделения ключевых понятий мехатроники. Обратим внимание на три последних определения, предложенных авторитетными специалистами в данной области. Они показывают, что концептуальная идея мехатроники сегодня уже выходит за рамки традиционных технических наук. Поэтому не случайно, что здесь используются столь общие категории, как "метод", "идеология" и даже "философия". Кстати, характерно, что в России в 1994 г. специальность "Мехатроника" была отнесена к группе междисциплинарных естественно-технических специальностей, а не к инженерной группе.

Исторически мехатроника развивается в основном на базе робототехники – научно-технического направления, в котором отечественная инженерная школа сделала серьезный задел в 70–80-х годах XX века, причем как по фундаментальным, так и по прикладным исследованиям. Однако мехатронный подход может быть реализован отнюдь не только в робототехнических системах. Учитывая, что мехатроника и робототехника объединены в настоящее время в одно направление инженерного образования, остановимся на актуальном вопросе взаимосвязи их предметных областей.

Обратимся к определению робототехники, которое также утверждено в Государственном образовательном стандарте РФ [14]: *"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"*.

Таким образом, анализируя приведенные выше определения, можно сделать вывод о том, что 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 движением.

Мехатронный подход охватывает все основные фазы жизненного цикла машины (проектирование, производство, эксплуатация и т.д.) и может быть применен в системах различного назначения, в том числе в манипуляционной технике и робототехнических системах. С другой стороны, проектирование и производство роботов базируется не только на мехатронных принципах и технологиях, но требует привлечения и других методологических подходов: методов технической кибернетики и бионики, САПР и CALS-технологий.



Рис. 1.23. Предметные области мехатроники и робототехники

Достигнуть современного уровня функционирования роботов без использования интеграционного мехатронного подхода, без применения систем интеллектуального управления практически невозможно, поэтому здесь предметные области мехатроники и робототехники пересекаются (рис. 1.23).

Но известны виды роботов (например, специализированные манипуляторы и автооператоры для обслуживания станков, шарнирно-балансирные манипуляторы и т.п.), которые имеют существенное прикладное значение и изучаются робототехникой, однако не базируются на мехатронных идеях. С другой стороны, мехатронный подход может быть реализован не только в робототехнических системах, но и при создании машин других видов, например металлорежущих станков, мобильных и транспортных средств, офисной и бытовой техники.

Проектирование современных мехатронных систем основано на модульных принципах и технологиях.

Общее понятие модуля дано в фундаментальном словаре [29]: *“Модуль – унифицированная функциональная часть машины, конструктивно оформленная как самостоятельное изделие”*.

Введем следующее понятие мехатронного модуля (ММ):

*мехатронный модуль – это функционально и конструктивно самостоятельное изделие для реализации движений с взаимопроникновением*



Рис. 1.24. Классификация мехатронных модулей

и синергетической аппаратно-программной интеграцией составляющих его устройств, имеющих различную физическую природу.

Как правило, мехатронные модули выполняют движения по одной координате (вращательной или поступательной), реже имеют две степени подвижности.

Мехатронные модули по составу объединяемых устройств и элементов можно подразделить на три группы (рис. 1.24):

- 1) модули движения;
- 2) мехатронные модули движения;
- 3) интеллектуальные мехатронные модули.

*Модуль движения (МД)* – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, в котором конструктивно объединены управляемый двигатель и механическое устройство.

Главным отличающим признаком модуля движения от общепромышленного привода является использование вала двигателя в качестве одного из элементов механического преобразователя движения.

В современных мехатронных модулях наиболее часто используются электрические двигатели – асинхронные и синхронные электромашинны, двигатели постоянного тока, шаговые и пьезоэлектрические двигатели и др. Однако для многих прикладных задач целесообразно применять мехатронные модули на основе электрогидравлических двигателей, с которыми можно познакомиться по монографии проф. В.Ф. Казмиренко [25]. В состав механического устройства могут входить разнообразные редукторы, преобразователи движения, вариаторы, ограничительные и предохранительные элементы.

*Мехатронный модуль движения (ММД)* – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, включающее в себя управляемый двигатель, механическое и информационное устройства.

Как следует из данного определения, по сравнению с МД в состав мехатронного модуля движения входит встроенное информационное устройство (см. рис. 1.24). Информационное устройство включает датчики обратной связи и информации, а также электронные блоки для обработки и преобразования сигналов. Примерами таких датчиков являются фотоимпульсные датчики (инкодеры), дающие информацию о скорости движения и угловом перемещении (см. рис. 1.9), оптические линейки (см. рис. 1.8), вращающиеся трансформаторы и т.д.

*Интеллектуальный мехатронный модуль (ИММ)* – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, построенное путем синергетической интеграции двигательной механической, информационной, электронной и управляющей частей.

Таким образом, по сравнению с мехатронными модулями движения в конструкцию ИММ дополнительно встраиваются управляющие и электронные устройства, что придает этим модулям интеллектуальные свойства. К этой группе можно отнести: цифровые вычислительные устройства (микропроцессоры, сигнальные процессоры и т.п.), электронные силовые преобразователи, компьютерные устройства сопряжения и связи.

В полной мере определению мехатроники соответствуют только интеллектуальные мехатронные модули, которые содержат все три определяющие подсистемы. Вместе с тем включение в классификацию первых двух групп (модулей движения и мехатронных модулей движения) представляется методически и логически обоснованным. Действительно, эти виды объектов также построены на мехатронных принципах интеграции элементов, без их изучения нельзя понять эволюцию мехатроники. При этом в настоящее время именно МД и ММД являются объектами серийного производства, а интеллектуальные мехатронные модули появились на рынке наукоемкой продукции сравнительно недавно.

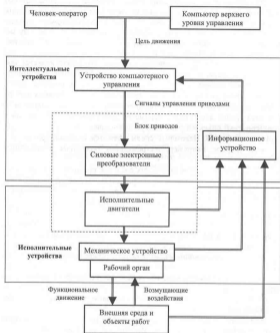


Рис. 1.25. Обобщенная структура мехатронных машин

*Мехатронные машины* – это интеллектуальные многомерные системы, построенные на мехатронных принципах и технологиях, которые способны эффективно выполнять программы функциональных движений в изменяющихся условиях внешней среды.

Мехатронные машины являются многомерными системами, которые конструируются на базе двух или более мехатронных модулей. Рассмотрим обобщенную структуру мехатронных машин для задач автоматизированного машиностроения, которая представлена на рис. 1.25. В основу построения данной схемы положена структура автоматических роботов, введенная акад. Е.П. Поповым [54].

*Внешней средой* для машин рассматриваемого класса является технологическая среда, которая содержит различное основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку и объекты работ. Внешние среды укрупненно можно разделить на два основных класса: *детерминированные* и *ндетерминированные*. 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.

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 струн жидкости для гидравлической резки.

В состав мехатронной машины входят четыре основные части (см. рис. 1.25):

*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 этого комплекса обычно входят задающие устройства (например, двойстики 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, локционные датчики и дальномеры, 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.

*Число степеней подвижности* механического устройства определяется количеством подвижных звеньев и классами кинематических пар, составляющих механизм.

По числу степеней подвижности ( $n$ ) механические устройства можно классифицировать на три группы:

- 1) специализированные устройства ( $n < 6$ );



- 2) универсальные устройства ( $n = 6$ );
- 3) избыточные устройства ( $n > 6$ ).

Универсальные механизмы позволяют обеспечить в декартовом пространстве перемещение рабочего органа как твердого тела по шести степеням свободы (см. рис. 1.10). Примерами могут служить гексапод (машина с параллельной кинематикой – см. рис. 1.15) и робот "PUMA-560", имеющий последовательную кинематическую цепь (см. рис. 1.13).

Специализированные устройства по сравнению с универсальными машинами имеют ограниченные кинематические возможности и проектируются под конкретную задачу движения. Из рассмотренных выше примеров к этой группе можно отнести трипод (см. рис. 1.16) и двухзвенный манипулятор (см. рис. 1.14).

Избыточные механизмы, конечно, самые сложные и дорогостоящие изделия. Их целесообразно применять в средах с препятствиями либо в реконфигурируемых системах, когда требуется оптимизировать конфигурацию цепи (например, в комплексах механообработки сложных деталей, см. рис. 1.19).

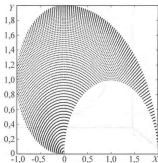
Воспользуемся также рядом терминов, принятых для промышленных роботов (ГОСТ 25686–85), распространив их на мехатронные машины.

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

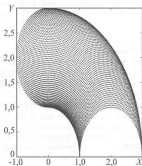
Примеры рабочих органов в робототехнике: механические схваты, вакуумные и электромагнитные захватные устройства, сварочные клещи (для точечной сварки), инструментальные головки для механообработки и лазерных операций, окрасочный пистолет. Таким образом, *рабочий орган* – это управляемый модуль, который в свою очередь может иметь несколько степеней подвижности и состоять из нескольких элементов. Поэтому при его разработке также могут использоваться мехатронные принципы интеграции. Примером может служить мотор-шпиндель (см. рис. 1.5), где инструмент и ротор электродвигателя представляют собой единый объект.

*Рабочая зона мехатронной машины* – совокупность всех точек декартового пространства, которые могут быть достигнуты рабочим органом машины.

Очевидно, что форма и размеры рабочей зоны зависят от кинематической структуры машины, конструктивных параметров и ограничений



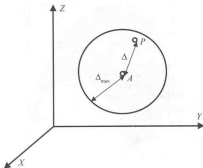
а)



б)

Рис. 1.26. Формы рабочей зоны для двухзвенового манипулятора типа "SCARA":

$$a - L_1 = L_2; \quad б - L_1 = 2L_2$$



**Рис. 1.27.** Погрешность позиционирования мехатронной машины:  $P$  – фактическое положение полвса рабочего органа;  $A$  – программное положение;  $\Delta$  – погрешность позиционирования в данном эксперименте;  $\Delta_{\max}$  – максимальная (паспортная) погрешность позиционирования машины

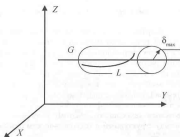
на перемещения в ее степенях подвижности. Для машин с нелинейным базисом исполнения движений рабочая зона описывается сложными кривыми. Например, на рис. 1.26 показаны формы рабочей зоны для двухзвенового манипулятора типа "SCARA" при различных сочетаниях длин звеньев  $L_1$  и  $L_2$  (см. рис. 1.14).

Графики построены для следующих исходных данных: длина второго звена  $L_2 = 1$  м, диапазон для первого угла  $0 \leq q_1 \leq 90^\circ$ , диапазон для второго угла:  $0 \leq q_2 \leq 180^\circ$ . Построение рабочей зоны удобно выполнять методом решения прямой задачи о положении для заданных диапазонов изменения обобщенных координат. Решение этой задачи для манипулятора типа "SCARA" дано в Приложении.

Параметры рабочих зон производственных машин с параллельной кинематикой приведены в гл. 4.

*Погрешность позиционирования* – отклонение положения рабочего органа от желаемого положения, заданного программой движения.

Важно подчеркнуть, что фактическое положение рабочего органа при отработке управляющей программы является случайной величиной.



**Рис. 1.28. Погрешность обработки траектории мехатронной машины:**  
*L* – фактическая траектория волноса рабочего органа; *G* – программная траектория;  $\delta_{\max}$  – максимальная (паспортная) погрешность обработки траектории

Это означает, что полюс *P* рабочего органа в каждой конкретной реализации может оказаться в произвольной точке определенной сферы. Центр этой сферы – это координаты целевой точки в управляющей программе, а ее радиус равен паспортной величине погрешности позиционирования машины (рис. 1.27).

*Погрешность обработки траектории* – отклонение фактической траектории рабочего органа от траектории, заданной программой движения.

Этот показатель, по сути, аналогичен погрешности позиционирования, однако вводится для задач контурного движения (рис. 1.28). С технологической точки зрения он является доминирующим для оценки точности машины на операциях дуговой сварки, окраски и лазерного раскроя материалов.

Рабочий орган машины в процессе движения находится внутри пространственной трубки, осью которой является программная траектория. Радиус этой трубки равен паспортной погрешности обработки траектории мехатронной машины.

### 1.3. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕХАТРОНИКЕ

#### 1.3.1. Структурный и технологический базисы мехатроники

Важнейшее направление, разработанное отечественной научно-инженерной школой технологии машиностроения, состоит в конструктивно-технологическом формировании изделий. Оно осуществляется путем совместной работы конструктора и технолога на всех стадиях проектирования, производства и эксплуатации машины [5, 46, 63].

Применение конструктивно-технологического подхода к задачам мехатроники означает понимание самого мехатронного объекта как целостной системы и понимание всех фаз его жизненного цикла как системных по применяемым технологиям. Поэтому начнем рассмотрение со взаимосвязей между структурным и технологическим базисами мехатроники.

Согласно определению в мехатронных системах укрупненно принято выделять три главные части – механическую, электронную и информационную, совокупность которых и образует систему в целом. Указанные части составляют структурный базис мехатроники, который можно наглядно представить в форме пирамиды (рис. 1.29).

В историческом развитии структур производственных машин от "однополярной" механики к современной "многокоординатной" мехатронике можно выделить ряд стадий. Первоначально три базисных направления (точная механика, электроника и информатика) интегрировались попарно, образуя три гибридных направления, которые показаны боковыми гранями пирамиды. Это электромеханика (объединение механических узлов с электротехническими изделиями и электронными блоками), компьютерные системы управления (аппаратно-программное объединение электронных и компьютерных устройств), а также системы автоматизированного проектирования механических систем (САПР). Затем – уже на стыке гибридных направлений – возникает мехатроника.

Реальное воплощение мехатронных идей на практике связано с появлением новых технологий на всех этапах жизненного цикла изделий машиностроения. Технологический базис мехатроники представлен на рис. 1.30.

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

Безусловно, фундаментом технологического базиса мехатроники являются новые технологии в ее базисных направлениях. К ним относятся



Рис. 1.29. Структурная пирамида мехатроники

прецизионные и модульные технологии механики, микроэлектроника и новые информационные технологии. Однако особый интерес для развития мехатроники представляют *комбинированные технологии*, принадлежащие граням технологической пирамиды, к которым можно отнести:

1. Гибридные технологии электромеханики и мехатроники.
2. Цифровые технологии управления движением.
3. Технологии автоматизированного проектирования управляемых машин и CALS-технологии.

Выпуск мехатронных изделий требует стандартизации и унификации всех используемых элементов и процессов при их автоматизированном проектировании, производстве и сервисном обслуживании на основе CALS (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support) технологий. Одним из первых в России вопрос о создании комплексных систем поддержки жизненного цикла изделий поставил и решил в своих работах чл.-кор. РАН Ю.М. Соломенцев [38].



Рис. 1.30. Технологическая пирамида мезатроники

CALS – принятая в промышленно развитых странах концепция информационной поддержки ЖЦ продукции, основанная на использовании интегрированной информационной среды, обеспечивающая единообразные способы информационного взаимодействия всех участников этого цикла: заказчиков и производителей продукции, эксплуатационного и ремонтного персонала. Концепция и стандарты CALS определяют набор правил и регламентов, в соответствии с которыми организуется информационное взаимодействие субъектов в процессах проектирования, производства, испытаний, эксплуатации и сервиса.

Для мезатроники особо следует выделить серьезную проблему различия информационных платформ, которыми владеют специалисты различных отраслей инженерных знаний. Так, машиностроители в своей конструкторской деятельности широко применяют программные системы автоматизированного проектирования механических систем (например, программные пакеты AutoCAD, ProEngineer, TFLEX-CAD). Эти пакеты обычно не знакомы специалистам в области электроники и ком-

пьютерного управления, которые в свою очередь используются при моделировании и проектировании программными системами MATLAB/Simulink, MAPLE, LabView, P-CAD и т.п.

Для успешного решения задач мехатроники необходимо разработать междисциплинарные программные среды, способные эффективно поддерживать высокопроизводительный обмен документами, данными и объектами (в том числе графическими файлами) в ходе выполнения проектно-исследовательских и опытно-конструкторских работ группой специалистов.

### 1.3.2. Гибридные технологии электромеханики и мехатроники

Для рассмотрения гибридных технологий проанализируем технологический процесс изготовления мехатронной машины; его основные фазы показаны на рис. 1.31. Все компоненты мехатронных модулей укруп-

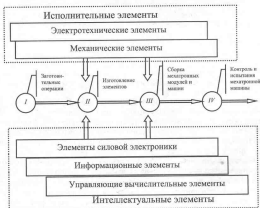


Рис. 1.31. Схема технологического процесса изготовления мехатронной машины



ненно разделены на две большие группы:

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

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

На схеме технологического процесса выделены два технологических передела, где возможна технологическая интеграция элементов первой и второй групп – это этапы изготовления элементов (*II*) и сборки мехатронных модулей и машин (*III*). Таким образом, различают операции *изготовления гибридных элементов* и *гибридной сборки*. Выбор фазы технологической интеграции определяет в конечном счете глубину объединения компонентов в мехатронном модуле.

Гибридная сборка соответствует конструкторской идее объединения разноприродных элементов в едином корпусе. В этом случае компоненты указанных групп хотя и являются составными частями общего конструкторского замысла, но их изготавливают независимо и параллельно на различных технологических линиях либо приобретают у различных производителей.

Пример интеграции исполнительных элементов через гибридную сборку – мехатронный модуль фирмы *Dunkermotoren*, представленный на Ганноверской выставке в 2004 г., показан на рис. 1.32.

В состав модуля входят асинхронный двигатель, редуктор и тормозное устройство.

На рис. 1.33 представлены модули фирмы *Siemens*, в которых механические и электротехнические изделия собраны уже с интеллектуальными компонентами.

Модули содержат следующие сборочные единицы: вентильный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, планетарный или червячный редуктор, тормозное устройство, фотопульсный датчик (инкодер), силовой преобразователь (конструктивно закрепляется на крышке двигателя), управляющее устройство, интерфейс для подключения к шине "Profibus".

Однако мехатронные модули, полученные способом гибридной сборки, имеют и существенные ограничения в применении и эксплуатации:

- комбинация в одном корпусе всех элементов приводит к увеличению массы и габаритов модуля движения по сравнению с традиционными приводами, где управляющие устройства и силовые преобразователи расположены отдельно от исполнительных компонентов. Такое увеличение критично для некоторых мехатронных машин, например манипуляторов, имеющих последовательную кинематическую цепь;

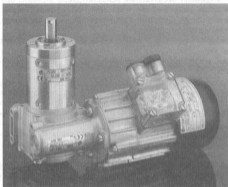


Рис. 1.32. Мехатронный модуль фирмы Danfossmotoren [27]

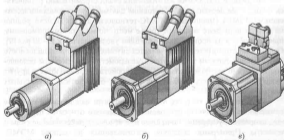


Рис. 1.33. Мехатронные модули фирмы Siemens:  
 а, б – модули "Simodrive Posmo A"; в – модуль "Simodrive Posmo SI"

- в процессе эксплуатации исполнительные элементы оказывают температурные, вибрационные, электромагнитные воздействия на интеллектуальные блоки; чем плотнее монтаж и выше мощность модуля, тем сильнее это негативное влияние.

Указанные ограничения гибридной сборки дают основание считать наиболее перспективной для мехатроники интеграцию элементов на более ранней технологической фазе (см. рис. 1.31) – уже при изготовлении элементов.

Гибридные технологии предусматривают использование *общих материалов* (например, полупроводников) и *общих технологических процессов* при производстве как исполнительных, так и интеллектуальных элементов. Это позволяет радикально уменьшить размеры мехатронного модуля, добываясь качественно новых свойств в особо компактных и миниатюрных модулях. При серийном выпуске таких изделий стоимость мехатронного модуля зачастую даже уменьшается по сравнению с традиционными технологиями.

Перспективной для мехатронных технологий является группа "активных" материалов, которые способны трансформировать энергию определенного физического поля (электрического, магнитного, теплового и т.п.) в различные механические эффекты либо изменять свои свойства под воздействием внешних полей. К числу таких материалов можно отнести кварц, керамику, магнитострикционные сплавы, "интеллектуальные" сплавы с памятью формы.

Гибридные технологии изготовления стали стремительно развиваться в последнее десятилетие, в основном для микроэлектромеханических систем (МЭМС). Приложения МЭМС-технологий в области мехатроники на сегодняшний день занимают третье место по масштабам применения, при этом объем их производства ежегодно увеличивается в 15–20 раз [9]. Основным потребителем здесь является автомобильная промышленность (наибольшим спросом пользуются акселерометры для системы безопасности), однако все более активно эти устройства используются в других мехатронных системах: мобильных роботах, беспилотных летательных аппаратах и т.п.

В мехатронных модулях МЭМС-технологии нашли самое широкое применение. К типичным измеряемым параметрам относятся перемещение, скорости и ускорения (линейные или угловые), действующие силы и моменты. Примерами сенсоров, изготовленных на основе МЭМС-технологий, могут служить акселерометры – датчики ускорений. Датчик, разработанный в НПК "Технологический центр" МИЭТ, показан на рис. 1.34.

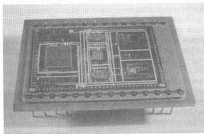


Рис. 1.34. Микросистема для измерения виброускорений

Данная микросистема, где использованы чувствительные элементы балочного типа, позволяет измерять ускорения в диапазоне  $\pm 5g$  в диапазоне рабочих частот 5...100 Гц, размер корпуса  $39,5 \times 29,5 \times 7,5$  мм. Конструктивной основой акселерометра является подложка, которая выполняет две главные функции: она одновременно является платой для микроэлектронных элементов и вибрирующей инерционной массой. На выходе сенсора получаем широтно-модулированные сигналы, в которых длительность импульсов пропорциональна соответствующим компонентам вектора ускорения.

Развитие МЭМС-технологий позволило создать интеллектуальные сенсоры, где реализовано объединение функций измерения текущих параметров механического движения, их преобразования и обработки по заданным алгоритмам в едином блоке. Интеллектуализация сенсоров позволяет добиться более высокой точности измерения, программным путем обеспечивая фильтрацию шумов, калибровку, линеаризацию характеристик вход/выход, компенсацию гистерезиса, перекрестных связей и дрейфа нуля.

### 1.3.3. Цифровые технологии управления движением

Современные технологии для систем управления движением объединяют новые аппаратные решения, ставшие возможными благодаря достижениям микроэлектроники, и соответствующее программное обеспече-

печение, построенное на основе новых информационных технологий. Электронные блоки должны выполнять заданные управляющие, преобразующие и информационные функции и при этом конструктивно быть встроены в мехатронные модули.

Встраиваемые интеллектуальные элементы по сравнению со своими типовыми аналогами должны иметь повышенную стойкость к внешним воздействиям (тепловым, вибрационным, электромагнитным и др.), а также миниатюрные размеры. Технологически это достигается за счет высокой концентрации и плотной упаковки схем, уменьшения монтажных соединений и использования твердотельных элементов. Благодаря редкому упрощению сборки микросистемных устройств и автоматизации процесса изготовления, их стоимость является относительно низкой.

Объем функциональных задач, решаемых электронными и компьютерными устройствами в мехатронике, постоянно возрастает. Следовательно, перспективные блоки должны быть многофункциональными и обладать широкими коммуникационными возможностями.

Ниже приведены начальные сведения по:

- силовым электронным приборам;
- цифровым сигнальным процессорам (DSP-процессоры);
- программируемым вентильным матрицам (FPGA);
- контроллерам движения (motion controllers).

В области микросистемной важном технологическим фактором стало появление нового поколения *силовых электронных приборов*. Основными типами силовых приборов, которые в настоящее время широко используются в мехатронных модулях, являются: силовые полевые транзисторы (MOSFET), биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), коммутируемые тиристоры (GTO) и интеллектуальные силовые модули (IPM). Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (для транзисторов MOSFET частота коммутации составляет до 100 кГц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (например, для транзисторов IGBT предельная сила коммутируемого тока – до 2400 А, предельное коммутируемое напряжение – до 3300 В), малыми коммутационными потерями и малой мощностью управления.

Интеллектуальные модули выполняют функции силового преобразователя в канале управления движением, защиты устройства в аварийных режимах и диагностики неисправностей. В мехатронике эти полупроводниковые приборы стали базой для создания новых силовых преобразователей, которые являются связующим звеном между устройством компьютерного управления и исполнительными двигателями (см. рис. 1.25). Компактность конструкций и интеллектуальность силовых

преобразователей, созданных на базе нового поколения приборов, позволяет конструктивно объединять их с электродвигателями в составе интеллектуальных мехатронных модулей (см. рис. 1.33).

Новой элементной базой цифровых систем управления для выполнения вычислительных функций стали *цифровые сигнальные процессоры* (DSP – digital signal processors). Для построения систем управления движением главными являются следующие требования к вычислительным устройствам:

- высокая скорость вычислений, особенно при выполнении базовых математических операций умножения и суммирования;
- цифровая обработка сигналов в реальном масштабе времени;
- время, требуемое на выполнение команд, должно быть известно точно и заранее.

В мехатронных системах управляющие вычислительные устройства выполняют следующие специальные функции:

- решение прямой и обратной кинематических задач;
- координированное управление всеми степенями подвижности манипулятора, включающее расчет управляющих воздействий и формирование синхронизированных во времени сигналов управления на исполнительные приводы мехатронной системы;
- реализация алгоритмов адаптивного и интеллектуального управления;
- фильтрация сигналов о положении, скорости и ускорении, поступающих от датчиков обратной связи;
- обмен данными с компьютером верхнего уровня управления.

Микропроцессоры (МП), такие как Pentium компании Intel, обычно представляют собой центральное процессорное устройство (ЦПУ), выполненное на одном кристалле, которому требуются дополнительные микросхемы для реализации всех вычислительных функций. Ориентированные в первую очередь на вычислительные задачи общего назначения, МП недостаточно хорошо приспособлены к задачам цифровой обработки сигналов. Например, они не поддерживают реализацию операции умножения с последующим сложением за один машинный цикл. Эта операция очень важна для цифровых фильтров реального времени, умножения матриц, манипуляции с графическими изображениями. DSP-процессоры оптимизированы для реализации таких задач со скоростью, достаточной для цифровой обработки сигналов в реальном масштабе времени, выполняя арифметические операции и накопление результата за один машинный цикл.

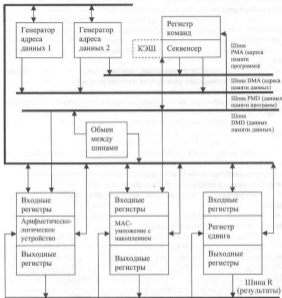


Рис. 1.35. Архитектура ядра процессора ADSP-21  
фирмы Analog Devices

DSP-процессоры выполняют следующие основные операции:

- фильтрация входного аналогового сигнала;
- аналого-цифровое преобразование;
- цифровая обработка сигналов по заданным вычислительным алгоритмам, оптимизированная для многократно повторяющихся математи-

ческих операций в реальном масштабе времени (производительность до  $75 \cdot 10^6$  операций в секунду);

– цифроаналоговое преобразование.

В состав цифрового сигнального процессора входят: ЦПУ, ОЗУ, ПЗУ, последовательный/параллельный интерфейсы, схема обработки прерываний.

Архитектура ядра процессора ADSP-21 представлена на рис. 1.35 [66].

Гибкая архитектура процессоров семейства ADSP-21 и соответствующий набор команд позволяют достичь высочайшей степени параллелизма при выполнении операций. За один цикл DSP семейства ADSP-21 может выполнить следующие операции:

- генерация адреса и выбор команды программы;
- выполнение двух перемещений данных;
- обновление двух указателей адреса;
- выполнение вычислительной операции;
- передача или прием данных от двух последовательных портов;
- обновление регистра таймера.

В современном процессоре более 2 Мбит внутренней памяти размещается в  $1 \text{ см}^2$  корпуса, толщина которого составляет 1,35 мм, в сочетании с низкой потребляемой мощностью (0,4 мА на MIPS). Например, процессор ADSP-2188M, обладающий производительностью 75 MIPS, имеет память программ и данных в общей сложности 2028 Кбит. Потребляемая мощность данного процессора составляет менее 100 мВт.

*Программируемые вентильные матрицы* (FPGA – Field Programmable Gate Arrays) представляют собой интегральные микросхемы, которые содержат большое количество (от десятков до нескольких тысяч) стандартных логических ячеек. Эти ячейки объединяются в матрицу с помощью программируемых переключателей. Логическая микросхема состоит из следующих основных блоков:

- блока ввода-вывода (БВВ), осуществляющего соединение внутренней логики кристалла с выводами корпуса микросхемы;
- конфигурируемых логических блоков (КЛБ), реализующих логические и регистровые функции;
- блочной памяти;
- модулей управления синхронизацией (DLL);
- трассировочных ресурсов для соединения всех элементов.

Программирование микросхем FPGA в отличие от традиционных логических микросхем осуществляет пользователь. Для этого применяет-



ся 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.

Блоки FPGA позволяют программно реализовать практически все необходимые управляющие функции: декодирование сигналов, цифровую широтно-импульсную модуляцию, математические операции и т.д. При этом они обладают уникальным сочетанием очень высокой производительности (скорость вычислений сопоставима с аппаратными компонентами) с возможностью программирования (и перепрограммирования при необходимости) как обычные микропроцессорные устройства. На выходе блоков FPGA можно сформировать широтно-модулированный сигнал, который имеет цифровое представление.

Если разработка идет в большую серию, то эффективным является использование технологии ASIC – микросхем, выпускаемых под конкретную задачу пользователя. Микросхемы ASIC представляют собой "одночиповое" решение, имеющее ряд преимуществ по сравнению с перепрограммируемыми схемами FPGA. К их достоинствам следует отнести: дешевизну, надежность, невозможность копирования, малую потребляемую мощность, энергонезависимость. Однако микросхемы ASIC нельзя перепрограммировать, поэтому модернизация изделий на их основе сопряжена с длительным циклом разработки и затратами.

Современные технологии управления движением позволили перейти в системах управления от внешних управляющих устройств к контроллерам движения (motion controllers). Например, по данным аналитического обзора [78], для упаковочных машин сейчас преобладают решения на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК). Главная задача ПЛК – это эффективные операции исключительно с дискретной информацией. Поэтому построение на базе ПЛК систем управления движением мехатронными модулями, и тем более мехатронными системами, нельзя признать перспективным.

Перспективы мехатроники связаны с системами управления на основе персональных компьютеров (типа PC-NC [36]), а также встроенных контроллеров движения. Встроенные контроллеры, которые технологически реализованы на отдельной плате (board-level controllers) или одном чипе (chip-based controllers), уже в настоящее время используются в 50 % приложений и в ближайшей перспективе ожидается, что их доля возрастет до 68 %.

Столь активное развитие рынка контроллеров движения обусловлено их следующими основными преимуществами и особенностями:

- координированное управление движением по нескольким осям одновременно (как правило, 4–8 шаговых двигателей или управляемых приводов с аналоговыми или импульсными входами);
- обеспечение высококачественных движений благодаря реализации сложных законов управления (цифровые ПИД-регуляторы и фильтры, корректирующие связи по управляющему воздействию, трехконтурные системы подчиненного управления);
- планирование и генерация сложных траекторий (управление движением по положению, скорости и ускорению, модификация параметров в процессе движения);
- развитое программное обеспечение для инсталляции, программирования и мониторинга движений;
- взаимодействие с компьютером верхнего уровня, работа с программами пользователя, операционной системой реального времени, возможность загрузки программ по сети Интернет;
- широкие интерфейсные возможности благодаря встроенным цифровым счетчикам, АЦП, ЦАП, дискретным входам/выходам, наличию цифровой шины;
- выдача аналоговых и импульсных командных сигналов, получение и обработка информации от датчиков обратной связи.

Лишь в простейших приводах иногда используются отдельные контроллеры, которые привлекательны для пользователей своей относительной дешевизной. Функции такого контроллера ограничены задачей управления механическим движением по одной координате (редко по двум), некоторые модификации имеют стандартный интерфейс для включения в более сложные управляющие структуры. Однако необходимость программирования непосредственно оператором на языке достаточно низкого уровня (типа BASIC), малое количество каналов связи и ограниченный объем памяти делают этот тип контроллеров неперспективным для многокоординатных мехатронных систем с интеллектуальными методами управления.

Задачу управления движениями мехатронных систем можно разделить на две основные части: *планирование движения* и его *исполнение во времени*. Планирование функциональных движений осуществляется оператором на компьютере верхнего уровня с использованием пакетов прикладных программ. Функцию программного расчета и выдачи управляющих сигналов непосредственно на исполнительные приводы выпол-



Рис. 1.36. Система управления мехатронными модулями на базе контроллера движения

няет контроллер движения. Типичным является трапецеидальный закон изменения скорости движения, включающий участки разгона, перемещения с постоянной скоростью и торможения с заданным ускорением. Таким образом, сочетание компьютера и контроллера в архитектуре системы управления является обоснованным с точки зрения разделения решаемых подзадач. Блок-схема системы управления на базе контроллера движения приведена на рис. 1.36.

Архитектура контроллера движения, разработанного гонг-конгской фирмой Google Technology, представлена на рис. 1.37 [101]. В состав контроллера входят современные цифровые устройства: рассмотренные выше сигнальный процессор (DSP), программируемая вентильная матрица (FPGA), а также flash-память и оперативное запоминающее устройство (RAM).

Данный контроллер позволяет пользователю организовать управление движением мехатронных модулей (до 8 осей одновременно) в позиционном и скоростном режимах. Структура регулятора в позиционном контуре приведена на рис. 1.38.

Контроллер имеет программно-реализованные ПИД-регулятор (с лимитируемой интегральной составляющей и фильтром на входе пропорциональной компоненты), форсирующие связи по скорости и ускорению входного сигнала и ограничитель выходного сигнала.

Традиционный подход предусматривает, что структура и коэффициенты всех регуляторов определяются при проектировании системы и далее остаются фиксированными в процессе ее эксплуатации. В современных системах управления вид и параметры регуляторов автоматически модифицируются в зависимости от цели конкретного движения и усло-



Рис. 1.37. Архитектура контроллера движения фирмы Google Technology

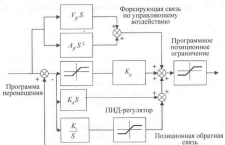


Рис. 1.38. Позиционный регулятор контроллера движения фирмы Google Technology:

$S$  – оператор Лапласа;  $V_p$  – коэффициент прямой связи по скорости управляющего сигнала;  $A_p$  – коэффициент прямой связи по ускорению управляющего сигнала;  $K_p$  – коэффициент пропорциональной составляющей регулятора;  $K_d$  – коэффициент дифференциальной составляющей;  $K_i$  – коэффициент интегральной составляющей регулятора

ний, в которых оно фактически осуществляется. Это позволяет адаптировать движение мехатронной системы к начальной неопределенности и изменяющимся условиям работы. Адаптивная настройка регуляторов необходима, если введенные отрицательные обратные связи в исполнительных приводах не способны парировать влияние возмущающих воздействий и изменения параметров объекта управления, которые вызывают недопустимое снижение показателей качества управляемого движения.

Благодаря отмеченным преимуществам контроллеры движения, DSP-процессоры и программируемые матрицы (FPGA) находят все более широкое применение в системах управления сложными мехатронными системами. Примеры построения на их базе цифровых систем управления приведены в гл. 2 и 5.

Обобщая рассмотренные в этом параграфе материалы, следует отметить, что качественно новые свойства мехатронных систем в решающей степени зависят от применяемых мехатронных технологий. Эффективность производственных, технологических и информационных процессов, которые лежат в основе мехатронных технологий, и особенно их интеграция определяют качество машин и систем нового поколения.

## Глава 2

# МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ И СИСТЕМ

---

Совершенство достигается не тогда, когда уже нечего прибавить, а когда уже ничего нельзя отнять.

*А. Сент-Экзюпери*

### 2.1. ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ И СИСТЕМ

Основой метода мехатроники является интеграция составляющих частей, которая закладывается на этапе проектирования и затем реализуется в технологических процессах производства и эксплуатации мехатронных модулей и систем. На современном этапе развития мехатроники особенно актуальным является решение следующих интеграционных задач:

1. Функциональная, структурная и конструктивная интеграция элементов в мехатронных модулях.
2. Аппаратно-программная интеграция исполнительных и интеллектуальных элементов в интеллектуальных мехатронных модулях.
3. Разработка и внедрение гибридных технологий производства интегрированных модулей и машин.
4. Создание информационных сред для поддержки решенной междисциплинарных мехатронных задач.
5. Построение математических и компьютерных моделей мехатронных модулей и систем, отражающих их интеграционную специфику.
6. Интеграционные подходы в организационно-экономической деятельности предприятий, выпускающих мехатронные изделия.
7. Междисциплинарная подготовка специалистов, способных к системной интеграции в области мехатроники.

На рис. 2.1 показана иерархия уровней интеграции в мехатронных системах.

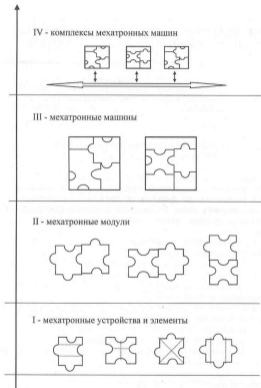


Рис. 2.1. Уровни интеграции в мехатронных системах

Первый уровень интеграции образуют мехатронные устройства и составляющие их элементы. Второй уровень включает интегрированные мехатронные модули. Набор мехатронных устройств определяет тип мехатронного модуля (см. рис. 1.24). В общем случае для интеллектуального модуля можно выделить две основные группы устройств (см. рис. 1.25): в исполнительную группу входят механические устройства и двигатели, а группа интеллектуальных устройств является совокупностью электронных, информационных и управляющих компонентов. На третьем уровне интеграция из мехатронных модулей komponуются многокоординатные мехатронные машины. Высший (четвертый) уровень предполагает построение на единой интеграционной платформе комплексов мехатронных машин для реконфигурируемого производства.

В целом проектирование мехатронных систем является сложной многофакторной проблемой выбора и оптимизации принимаемых технических и технологических, организационно-экономических и информационных решений. Раскрытие всех возникающих при этом закономерностей и связей выходит далеко за оговоренные рамки этой книги. Здесь мы сосредоточим внимание только на одной, но крайне важной проектной задаче – интеграция элементов в мехатронных модулях и машинах.

Узким местом (по-английски "bottleneck" – бутылочное горлышко) мехатронных модулей и машин являются интерфейсы между составляющими устройствами и элементами.

Понятие "интерфейс" является ключевым для предлагаемого подхода к проектированию мехатронных модулей и систем. В первую очередь отметим, что взаимодействие основных устройств в мехатронной системе (см. рис. 1.25) осуществляется не напрямую, а через некоторые соединительные блоки, обозначенные на рисунке стрелками. С физической и технической точки зрения это могут быть совершенно различные устройства, однако они имеют одинаковое функциональное назначение. Их главная функция – это выполнение энергетического и информационного обмена между сопрягаемыми структурными элементами системы.

В данной книге будем трактовать понятие "интерфейс" применительно к мехатронным системам именно в таком – расширительном смысле. Место интерфейса в структуре мехатронной системы задается связями с входными и выходными устройствами. Технические характеристики интерфейса определяются способом и процедурой передачи (при необходимости – преобразования, хранения и синхронизации) воздействий, сигналов и информации, а также аппаратно-программной реализацией используемых каналов связи.



## 2.1. Основные интерфейсы мехатронной системы

Характеристики интерфейса		
Устройство на входе	Устройство на выходе	Передаваемые воздействия/ сигналы/ информация
Человек-оператор или компьютер верхнего уровня	Устройство компьютерного управления (УКУ)	Цель движения
УКУ	Силовые электронные преобразователи	Сигналы управления приводами
Силовые электронные преобразователи	Исполнительные двигатели	Управляющие напряжения
Исполнительные двигатели	Механическое устройство	Движущие силы и моменты
Механическое устройство	Информационное устройство	Информация о состоянии механического устройства
Исполнительные двигатели	Информационное устройство	Информация о состоянии двигателей
Информационное устройство	УКУ	Сигналы обратной связи

“Проблема интерфейсов” обусловлена многогранностью структурного и технологического базисов мехатроники (см. рис. 1.29 и 1.30). В табл. 2.1 перечислены основные мехатронные интерфейсы, обозначенные направленными стрелками в обобщенной структуре мехатронных машин (см. рис. 1.25).

Как следует из приведенной таблицы, многочисленные интерфейсы в мехатронной машине связывают устройства различной физической природы (механические, электронные и информационные), что предопределяет их конструктивную и аппаратно-программную сложность. При традиционном проектировании интерфейсы представляют собой само-

стоятельные устройства и узлы. Обычно это блоки, которые выпускаются специализированными фирмами, но многие интерфейсы приходится разрабатывать и изготавливать самим пользователям. В машине с компьютерным управлением по трем координатам, построенной на традиционных приводах, только для связи основных устройств необходимо соединить порядка 100 сигнальных и силовых проводов. Опыт эксплуатации комплексных машин и систем показывает, что до 70 % проблем их функционирования связаны с надежностью связей и соединений.

Суть *мехатронного подхода* состоит в объединении элементов в интегрированные модули уже на этапах проектирования и изготовления, освобождая таким образом конечного потребителя от решения "проблемы интерфейсов" при эксплуатации мехатронной машины.

Интегрированные мехатронные модули и машины отличаются повышенной надежностью, устойчивостью к неблагоприятным внешним воздействиям, точностью выполнения движений, модульностью и компактностью конструкции. С точки зрения потребителя – это целостные изделия, удобные при настройке и программировании движений. Интегрированные решения, в конечном счете, экономически выгодны для потребителя, так как машина принимается "под ключ", упрощается ее сервис и повышается ремонтопригодность.

Безусловно, системы с глубокой степенью интеграции элементов имеют и оборотную сторону – такие машины являются менее гибкими, т.е. имеют ограниченные возможности для модернизации и реконфигурации. Поэтому мехатроника предлагает конечным потребителям мехатронные модули различного уровня интеграции, что позволяет находить разумный компромисс для конкретных задач автоматизации.

Идея интеграции широко используется в инженерной практике при проектировании устройств и систем самого различного назначения. Характерным примером реализации этой инженерной идеи в бытовой технике является MP3-Player – современное цифровое устройство, в котором объединены аудио-плеер, радиоприемник, диктофон и магнитофон. Очевидны преимущества этого комбинированного устройства – многофункциональность, компактность, выигрыш в цене по сравнению с покупкой всех компонент отдельно, пользователь освобожден от проблем с подключением кабелей и разъемов. Однако покупатель должен четко отдавать себе отчет в том, что это система негибкая, отдельные ее компоненты нельзя заменить и модернизировать, все они могут эксплуатироваться и ремонтироваться только совместно.

Решение "проблемы интерфейсов" в мехатронике можно трактовать как задачу минимизации структурной сложности мехатронной системы. Структурная сложность комплексных систем в общем случае определяется количеством соединяемых элементов, числом и интенсивностью их взаимосвязей [40].

В основе рассматриваемого подхода лежат три фундаментальных направления теории системного проектирования сложных систем:

- функционально-структурный анализ и эволюционный синтез сложных технических систем;
- методология параллельного проектирования систем;
- структурный синтез и оптимизация технических систем по критериям сложности.

Кратко рассмотрим ключевые положения перечисленных направлений.

Функционально-структурный подход базируется на идее приоритета функции системы над ее структурной организацией. Задачей проектировщика является определение такой структуры, которая позволит системе выполнять предписанные функциональные задачи с максимальной эффективностью по выбранным критериям качества. Основные положения этого метода были разработаны акад. Е.П. Балашовым и проф. Д.В. Пузанковым применительно к задачам проектирования информационно-управляющих комплексов и вычислительных устройств [6, 7]. Метод эволюционного синтеза предусматривает нахождение рациональных решений путем многоэтапной процедуры оптимизации. Поиск вариантов производится из базы перспективных структурных решений, которая открыта для развития и имеет иерархическую структуру. Как доказано в работах проф. Ю.В. Илюхина [20, 21], проектирование мехатронных систем на основе эволюционного метода позволяет повысить качество проекта и снизить требования к интуитивным способностям разработчика.

Методологической основой разработки мехатронных систем служат методы параллельного проектирования. При традиционном проектировании управляемых машин разработка механической, электронной, информационной и компьютерной частей ведется последовательно и независимо друг от друга (рис. 2.2).

Задачами системной интеграции занимается разработчик системы управления. При этом его возможности крайне ограничены, так как основные конструкторские решения уже приняты на предыдущих этапах. Выбранные двигатели и механические устройства образуют так называе-



Рис. 2.2. Традиционный алгоритм проектирования

мую "неизменяемую часть", состав и характеристики которой нельзя корректировать при разработке электронной и управляющей частей системы. Методология параллельного проектирования заключается в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех устройств мехатронной системы (рис. 2.3).

Разработанная процедура проектирования интегрированных мехатронных модулей и машины представлена на рис. 2.4.

Она предусматривает четыре взаимосвязанных звена:

- определение функций мехатронных модулей на основе анализа исходных требований к мехатронной машине;
- функционально-структурный анализ с целью выбора структуры всех мехатронных модулей и формирование структурной модели системы;
- структурно-конструктивный анализ и конструирование модулей, формирование конструктивной модели системы;
- планирование и оптимизация функциональных движений, разработка программ движения машины и ее модулей.



Рис. 2.3. Алгоритм параллельного проектирования мехатронных систем

Исходные требования к мехатронным машинам, которые определяют основные проектные решения, формируются путем анализа выполняемых технологических операций. В качестве примера в табл. 2.2 приведены предпочтительные значения параметров контурного движения рабочего органа для ряда роботизированных операций [20].

Рекомендации технологов, как правило, ограничиваются выбором номинальных режимов движения машины. При проектировании мехатронной системы обычно задаются исходные данные, которые включают информацию о программных движениях и комплексе ограничений.



Рис. 2.4. Процедура проектирования интегрированных мехатронных модулей и машин

## 2.2. Предпочтительные значения параметров движения РО

Технологическая операция	Максимальная скорость РО, мм/с	Отношение рабочих скоростей РО, $v_{max} / v_{min}$	Допустимая погрешность обработки траектории, мм
Лазерная резка	66,7	66,7	0,05
Воздушно-плазменная резка	83,3	5,0	0,1
Окраска распылением	500	10	5,0
Дуговая сварка	11	2,2	0,5

Требования к траекториям движения содержат описание программных траекторий рабочего органа в пространстве и допустимую погрешность их обработки. Программные траектории рабочего органа определяются геометрией контуров и поверхностей объектов работ (например, на рис. 1.20 показана форма лопатки газотурбинного двигателя). Криволинейные пространственные траектории удобно задавать в параметрической форме:

$$\vec{X} = \vec{X}(\lambda) \quad (0 \leq \lambda \leq \lambda_{\max}), \quad (2.1)$$

где  $\vec{X}$  – вектор, описывающий положение рабочего органа в выбранном декартовом базисе программирования (см. рис. 1.10);  $\lambda$  – путь, пройденный рабочим органом (скаляр, называемый лонгальным параметром).

Требуется, чтобы погрешность обработки траектории (см. рис. 1.28) не превышала допустимого значения:

$$\delta \leq \delta_{\text{доп}}; \quad |\Delta\alpha| \leq \Delta\alpha_{\text{доп}}; \quad \left| \frac{v}{v_{\text{ном}}} - 1 \right| \leq \Delta v_{\text{доп}}; \quad |F| \leq F_{\text{доп}}. \quad (2.2)$$

Система неравенств (2.2) задает также ограничения на погрешности ориентации ( $\Delta\alpha$ ) рабочего органа, допустимое отклонение ( $\Delta v_{\text{доп}}$ ) фактической скорости движения ( $v$ ) от номинального значения ( $v_{\text{ном}}$ ), ограничение на предельную величину развиваемой силы ( $F_{\text{доп}}$ ).

Для синтеза системы управления мехатронными машинами удобно использовать показатели добротности [75]:

$$D_v = \frac{v_{\text{max}}}{\delta_{\text{доп}}}; \quad D_a = \frac{v_{\text{max}}^2}{\delta_{\text{доп}} R_{\text{min}}}; \quad D_F = \frac{F_{\text{max}}}{\delta_{\text{доп}}}. \quad (2.3)$$

Здесь  $D_v$ ,  $D_a$ ,  $D_F$  – соответственно показатели добротности по скорости, ускорению и силе;  $v_{\text{max}}$ ,  $F_{\text{max}}$  – максимальные значения соответственно контурной скорости и силы;  $R_{\text{min}}$  – минимальный радиус кривизны траектории.

На втором этапе проектирования формируется структура мехатронных модулей со схемой энергетических и информационных потоков, затем – на третьем этапе проводится конструирование всех модулей и мехатронной машины в целом. Применяя процедуры функционально-структурного и структурно-конструктивного анализа, разработчик оценивает проектные варианты, стремясь добиться высокого уровня инте-

грации элементов. Таким образом, задача проектирования заключается в нахождении наилучшего соответствия между заданной функцией и техническим исполнением.

Построение функциональной, структурной и конструктивной моделей позволяет применять в мехатронике методы и средства автоматизированного анализа, проектирования и конструирования.

Заключительный этап рассматриваемой процедуры состоит в планировании и оптимизации функциональных движений мехатронной машины. Результатом этого этапа является создание программ движения совокупности мехатронных модулей. Разработанные способы моделирования и оптимизации движений для многомерных мехатронных систем представлены в гл. 5.

Следует отметить, что все проектные этапы имеют циклический характер, что подчеркнуто наличием обратных стрелок на рис. 2.4. Например, на втором этапе прямая задача состоит в определении структуры модулей по заданной функциональной модели. Но верна и обратная закономерность, когда структурные модификации приводят к изменению функциональных возможностей системы.

Для реализации разработанного подхода к проектированию интегрированных мехатронных модулей разработаны *три метода интеграции*. Методы интеграции можно классифицировать по характеру объединения составляющих устройств и способу решения "проблемы интерфейсов" проектировщиком и производителем мехатронных модулей и систем. Каждый из методов может применяться как самостоятельно, так и в комбинации с другими методами, поскольку они реализуются на различных этапах проектирования.

*Первый метод* состоит в построении интегрированных мехатронных модулей и машин путем исключения из их структуры промежуточных преобразователей и соответствующих интерфейсов. Это наиболее глубокий уровень интеграции, позволяющий получать мехатронные решения, полностью соответствующие пониманию синергизма в определении мехатроники. Исключение многоступенчатого преобразования энергии и информации в мехатронных модулях создает фундаментальную основу для достижения высокой точности и быстродействия, компактности и надежности мехатронных машин.

*Второй метод* предполагает аппаратно-конструктивное объединение устройств различной физической природы в едином корпусе многофункционального мехатронного модуля. Все структурные блоки встраиваются в единый конструктив вместе с другими устройствами, поэтому



для пользователя такие модули движения, по сути, представляются едиными изделиями.

*Третий метод интеграции* отражает современную тенденцию при построении машин нового поколения, которая заключается в *переносе функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным* (электронным, компьютерным и информационным) устройствам. Интеллектуальные устройства, в отличие от механических элементов придают системе гибкость, поскольку их легко перепрограммировать под новую задачу. При этом их цена постоянно снижается, а функциональные возможности быстро расширяются. Использование данного метода позволяет минимизировать механическую сложность мехатронной системы.

## 2.2. МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ИНТЕРФЕЙСОВ

Целью этого метода интеграции является минимизация структурной сложности мехатронных модулей исключением промежуточных преобразователей. При проектировании из традиционной структуры исключается по крайней мере один промежуточный блок и соответствующие интерфейсы. При этом сохраняется функциональное преобразование, выполняемое мехатронным модулем в целом, его входные и выходные переменные. Эта цель может быть достигнута на втором этапе проектирования мехатронных систем (см. рис. 2.4), когда ведется синтез структуры модулей.

Инструментарием для поиска структурных синергетических решений в мехатронике служит методика функционально-структурного анализа проектных решений.

Известны два основных подхода к построению моделей сложных технических систем. Первый заключается в *функциональном определении* рассматриваемой системы через ее поведение по отношению к внешним объектам и внешней среде. Второй подход основан на *структурном представлении* системы и связей между ее элементами. Исследование и оптимизация взаимосвязей между функцией и структурой системы лежит в основе функционально-структурного подхода, который мы применяем к задачам мехатроники.

Определение мехатроники, которое дано во введении, может быть отнесено к структурному типу, так как мехатронная система описывается через три ее внутренние подсистемы (механическая, электронная и компьютерного управления) или, другими словами, как "белый ящик".



Рис. 2.5. Функциональное представление мехатронной системы

Для методически корректного проектирования необходимо рассмотреть функциональную организацию мехатронной системы (МС). Функциональное представление МС с определенными входными и выходными переменными (модель типа "черный ящик") показано на рис. 2.5. Главная функциональная задача мехатронной системы заключается в преобразовании информации о программе движения в целенаправленное управляемое движение ее конечного звена.

Программа движения может быть задана компьютером верхнего уровня управления или – в случае дистанционного управления – человеком-оператором (см. рис. 1.25). Управляемое движение осуществляется звеньями механического устройства, причем конечное звено – рабочий орган взаимодействует с внешней средой. В процессе движения на механическое устройство действуют внешние силы со стороны объектов работ (например, силы резания при шлифовальных и фрезерных операциях, контактные силы и моменты при роботизированной сборке). Информационная обратная связь необходима для оценки в режиме реального времени текущего состояния управляемой системы и внешней среды.

Разумеется, выделенная основная функция не является единственной для мехатронных систем. Некоторые дополнительные функции, такие как: реконфигурация системы, обмен сигналами и информацией с другим технологическим оборудованием, самодиагностика, также должны быть реализованы для ее эффективной и надежной работы. Но именно выполнение заданного функционального движения является главной функцией, которая определяет поведение МС во внешней среде.



Рис. 2.6. Функциональная модель мехатронного модуля

Функциональное представление мехатронного модуля в форме "черного ящика" (см. рис. 2.5) содержит два информационных входа (программа движения и информационная обратная связь), дополнительный механический вход (силы реакции внешней среды) и один выход – целенаправленное механическое движение. Следовательно, в общем случае функциональная схема мехатронного модуля может быть построена как информационно-механический преобразователь.

Для физической реализации мехатронного информационно-механического преобразования необходим внешний энергетический источник. На современной стадии развития мехатроники для этой цели в основном используют электрические источники энергии. Введя соответствующие электроэнергетические преобразования, получаем следующую функциональную модель мехатронного модуля (рис. 2.6).

Полученная функциональная модель в общем случае содержит семь базовых преобразователей, связанных энергетическими и информационными потоками.

Отметим, что электрическая энергия является только промежуточной энергетической формой между входной информацией и выходным механическим движением. Следовательно, электрическая подсистема отнюдь не является единственно возможной для выполнения главной

функции, как это постулировано в приведенном определении мехатроники. Безусловно, и другие виды энергетических процессов могут быть использованы в мехатронных системах для промежуточных преобразований и должны рассматриваться как альтернативные варианты на этапе концептуального проектирования.

Выбор физической природы промежуточного преобразователя определяется возможностями технической реализации, исходными требованиями и особенностями применения. В мехатронных модулях широко применяют:

- гидравлические преобразователи, которые наиболее эффективны в машинах, испытывающих тяжелые нагрузки, в первую очередь благодаря их высокой удельной мощности;
- пневматические преобразователи, которые крайне просты, надежны и обладают высоким быстродействием;
- химические преобразователи применяются в биоприводах, аналогичных по принципу действия мускулам живых организмов;
- тепловые энергетические процессы используются в микромехатронных системах и основаны на использовании материалов с памятью формы;
- комбинированные преобразователи, основанные на энергетических процессах различной физической природы.

Итак, в мехатронном модуле следует реализовать семь функциональных преобразований (см. рис. 2.6). Три из них назовем моноэнергетическими (информационный, электрический и механический преобразователи), где входные и выходные переменные имеют одну и ту же физическую природу. Остальные четыре являются дуальными (двойственными), так как в них входные и выходные переменные принадлежат различным физическим видам. К этой группе относятся информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи функциональной модели, а также электронформационный и механико-информационный преобразователи в цепях обратной связи.

Структурная модель мехатронного модуля (ММ) должна отражать состав его элементов и связи между ними. В теории автоматического управления принято структурные модели графически представлять в виде блок-схем. Звенья обычно обозначают в виде прямоугольников с указанием входной и выходной переменных, а также передаточных функций.



Рис. 2.7. Структура традиционного электропривода с компьютерным управлением

В качестве исходной структуры ММ рассмотрим традиционный электропривод с компьютерным управлением (рис. 2.7).

Для дальнейшего анализа в представленной структурной схеме выделим управляющую и электромеханическую подсистемы. Структурная модель электропривода включает в себя следующие элементы:

- устройство компьютерного управления (УКУ) движением, функциональной задачей которого является информационное преобразование (обработка цифровых сигналов, цифровое регулирование, расчет управляющих воздействий, обмен данными с периферийными устройствами);
- цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), реализующий функцию информационно-электрического преобразования;
- силовой преобразователь, обычно состоящий из усилителя мощности, широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и трехфазного инвертора (для асинхронных двигателей);
- управляемый электродвигатель (переменного или постоянного тока), который выполняет электромеханическое преобразование;
- механическое устройство, которое реализует заданное управляемое движение, и рабочий орган, взаимодействующий с внешними объектами;
- устройство обратной связи, которое дает информацию о значениях электрических напряжений и токов в силовом преобразователе;
- датчики обратной связи (по положению, скорости движения звеньев), выполняющие функцию механико-информационного преобразования;
- интерфейсные устройства, обозначенные на блок-схеме как Ю–Ю8.

В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как механическими, так и интеллектуальными преобразователями. Примерами механических интерфейсов являются передачи и трансмиссии, связывающие механическое устройство с двигателем (интерфейс *I4*) и датчиками обратной связи (*I7*, *I8*).

Интеллектуальные интерфейсы расположены на входах и выходах устройства компьютерного управления мехатронного модуля и предназначены для его сопряжения со следующими структурными элементами:

- компьютером верхнего уровня управления и другими модулями мехатронной системы (интерфейс *I0*);
- цифроаналоговым преобразователем (интерфейс *I1*) и далее с силовым преобразователем модуля (*I2*);
- датчиками обратной связи (интерфейс *I8*), который в случае применения сенсоров с аналоговым выходным сигналом строится на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- устройствами обратной связи для контроля уровня электрических токов и напряжений в силовом преобразователе (интерфейс *I6*).

В традиционной приводной технике интерфейсы являются separатыными устройствами. Поэтому их проектирование, изготовление и наладка становятся серьезной проблемой для разработчика привода, особенно когда требуется надежно соединять нестандартные и специализированные элементы различных производителей. Мехатронные структуры отличаются высокой степенью интеграции элементов, причем эти решения закладываются уже на стадии проектирования и изготовления модулей и машины.

Сравнивая функциональную модель мехатронного модуля (см. рис. 2.6) и структурную модель традиционного электропривода (см. рис. 2.7), можно сделать вывод о том, что суммарное количество основных и интерфейсных блоков в структуре электропривода значительно превышает число выполняемых функциональных преобразований. Другими словами, можно говорить о структурной избыточности традиционного электропривода. Наличие избыточных блоков приводит к снижению надежности и точности технической системы, ухудшению ее массогабаритных и стоимостных показателей.

Задачей функционально-структурного анализа является поиск мехатронных структур, реализующих заданные функциональные преобразования с помощью минимального количества структурных блоков. Представленные решения основаны на совместном анализе функциональной

### 2.3. Примеры проектирования решений для мехатронных модулей (см. рис. 2.7)

Мехатронное решение	Исключаемые промежуточные преобразователи		
	Функциональные преобразователи	Структурные блоки	Интерфейсы
Вентильный высокомоментный двигатель	Механический	Механическое устройство	14
Мехатронный модуль с "бес-сенсорным" управлением	Механико-информационный	Датчики обратной связи	17, 18
Интеллектуальный силовой преобразователь	Электронинформационный	Устройство обратной связи	15

модели мехатронного модуля и структуры традиционного электропривода. В качестве локальных точек интеграции мы будем рассматривать интерфейсы привода, обозначенные на рис. 2.7 как 10–18.

Примеры проектных решений для мехатронных модулей, основанные на рассматриваемом методе интеграции элементов, приведены в табл. 2.3.

Рассмотрим подробнее мехатронные решения, представленные в таблице.

Применение вентильных высокомоментных двигателей (ВМД) позволяет заменить пару "двигатель + механический преобразователь движения" на один исполнительный элемент–двигатель. Здесь исключается механический преобразователь из функциональной модели (см. рис. 2.6) и, соответственно, механическое устройство и интерфейс 14 из традиционной структуры привода (см. рис. 2.7).

К основным преимуществам мехатронных модулей с ВМД относятся компактность и модульность конструкции, повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров, кинематических погрешностей, упругих деформации звеньев, а также исключение трения в механической трансмиссии. В современных машинах используются ВМД как углового, так и линейного типов. Примеры построения меха-

тронных модулей на базе линейных высокомоментных двигателей показаны на рис. 1.6–1.8, а также в гл. 4.

Для определения положения полюсов на роторе двигателя в конструкции вентиляционного ВМД встраивают датчик положения (обычно датчик Холла). В исполнительных приводах информацию с этого датчика можно использовать и как сигнал позиционной обратной связи. Следовательно, применение ВМД со встроенными датчиками позволяет упростить не только исполнительную часть модуля, но и цепи обратной связи.

Построение мехатронных модулей с так называемым "бессенсорным" управлением означает исключение датчиков обратной связи вместе с соответствующими интерфейсами 17 и 18, которые традиционно выполняют функциональное механико-информационное преобразование. При этом информация о скорости и положении ротора двигателя определяется в устройстве компьютерного управления косвенными методами.

Данный способ позволяет существенно снизить стоимость изделия и повысить надежность его работы, радикально облегчить механическую конструкцию модуля, возложив задачу организации обратной связи на электронные и компьютерные устройства. Фактически в данном случае метод исключения промежуточных преобразователей сочетается с третьим методом интеграции (п. 2.4), который направлен на расширение функций интеллектуальных устройств в мехатронике.

Создание "бессенсорных" способов управления особенно актуально в настоящее время для мехатронных модулей на базе двигателей переменного тока, широкое применение которых сдерживалось отсутствием эффективных систем управления. Мировой рынок этих модулей оценивался в 2003 г. в 12 млрд долл. и прогнозируется его дальнейший рост (около 12 % в год) [79]. Столь большой интерес к двигателям переменного тока вызван тем, что они обладают высоким показателем цена/качество по сравнению с машинами постоянного тока. Так, по данным обзора [80], только за последние десять лет цена единицы мощности асинхронных машин снизилась примерно в 10 раз, при этом компактность конструкции улучшилась в 15 раз.

На сегодняшний день разработано большое число методов косвенного определения скорости вращения ротора, с которыми можно ознакомиться в специальной литературе. Эти методы можно классифицировать по виду исходной информации и применяемым математическим моделям. В качестве исходных данных обычно берутся значения электрических напряжений и токов, протекающих в обмотках статора и/или ротора (рис. 2.8).





Рис. 2.8 Схема настройки системы "бессенсорного" управления:  $U_s$ ,  $I_s$  – соответственно входные напряжение и ток статора двигателя;  $X_m$ ,  $X$  – выходные переменные соответственно реального двигателя и компьютерной модели;  $\epsilon$  – погрешность оценки

Наиболее распространенными являются три группы моделей, описывающих электромагнитные процессы в двигателях: аналитические модели в форме дифференциальных уравнений с фиксированными параметрами, адаптивные самонастраивающиеся модели и модели, построенные на базе интеллектуальных технологий (нейросетевые, нечеткая логика и т.д.). Практическая реализация методов "бессенсорного" управления стала возможна благодаря появлению быстродействующих цифровых вычислителей (см. п. 1.3).

Проблемы практической реализации метода "бессенсорного" управления связаны с построением адекватных компьютерных моделей для процессов, протекающих в двигателях. Характер этих процессов существенно различается для участков разгона и торможения, движения с номинальной скоростью и в зоне малых скоростей, на холостом ходу и при наличии внешних моментов. Необходимым условием работоспособности такой системы является организация всех вычислительных процедур в реальном масштабе времени.

В состав современных мехатронных модулей входят интеллектуальные силовые преобразователи (ИСП) (см. табл. 2.3), объединяющие электрическое и электронформационное преобразования. Особенность ИСП

состоит в том, что они содержат встроенные блоки микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций, – управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. ИСП строят на базе полупроводниковых приборов нового поколения. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (MOSFET), биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), запираемые тиристоры с полевым управлением (МСТ) (см. п. 1.3).

Использование ИСП в составе мехатронных модулей позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели.

Перспективные решения на базе рассмотренного метода интеграции основываются на применении гибридных производственных технологий и новых конструкционных материалов, общих для исполнительных и интеллектуальных компонентов.

### 2.3. МЕТОД ОБЪЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ В ЕДИНОМ КОРПУСЕ

Целью второго метода интеграции является минимизация конструктивной сложности мехатронных модулей путем создания интегрированных мехатронных модулей, реализующих несколько функциональных и структурных преобразований. Эта цель может быть достигнута на третьем этапе проектирования мехатронных систем – этапе структурно-конструктивного анализа (см. рис. 2.4). Структуру модуля, которая сформирована на предыдущем этапе, теперь считаем известной. Задача разработчика состоит в выборе конструктивных решений, реализующих заданный набор элементов и связей между ними.

Рассматриваемый метод интеграции заключается в аппаратно-конструктивном объединении выбранных элементов и интерфейсов в едином корпусе. Технологической базой для данного метода интеграции является гибридная сборка узлов и элементов (см. п. 1.3). Аппаратное и конструктивное объединение элементов в единые модули должно обязательно сопровождаться разработкой интегрированного программного обеспечения.

Методическим ключом при поиске вариантов является рассмотрение интерфейсных блоков ИВ–ИВ (см. рис. 2.7) в качестве локальных точек, где потенциально возможна интеграция элементов. Для получения высоко-

#### 2.4. Мехатронные модули, построенные методом объединения элементов в едином корпусе (см. рис. 2.7)

Многофункциональные мехатронные модули	Функциональные преобразования	Встраиваемые элементы	
		Структурные блоки	Интерфейсы
Модули движения	Электромеханическое и механическое	Двигатель, механическое устройство	<i>I4</i>
Мехатронные модули движения	Электромеханическое, механическое и механико-информационное	Двигатель, механическое устройство, датчик обратной связи	<i>I4, I7</i>
Интеллектуальные мехатронные модули	Информационное, информационно-электрическое, электрическое, электро-механическое, механическое, электро-информационное и механико-информационное	УКУ, силовой преобразователь, двигатель, механическое устройство, датчики обратной связи, устройство обратной связи	<i>I0...I8</i>

интегрированных модулей можно рекомендовать при проектировании опираться сразу на несколько интерфейсных точек.

Группы мехатронных модулей, построенные методом объединения элементов в едином корпусе, приведены в табл. 2.4. (Понятия модуля движения, мехатронного модуля и интеллектуального мехатронного модуля были введены в п. 1.2).

В корпусе модуля движения объединены исполнительный двигатель и механическое устройство, причем вал двигателя является элементом механического преобразователя движения. Модули движения реализуют электромеханическое и механическое функциональные преобразования; их проектирование основано на исключении интерфейса *I4* как самостоятельного (с точки зрения пользователя) блока.

Примерами модулей движения могут служить: мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-шпиндель и мотор-барабан [17]. В состав современных

модулей движения помимо двигателей и преобразователей движения входят и другие виды механических устройств – тормозные и люфтовывбирающие механизмы, направляющие и преобразователи движения. Так, мехатронный модуль фирмы *Dunkermotoren* на базе асинхронного двигателя (см. рис. 1.32) содержит дополнительно тормозное устройство. НПЦ “Редуктор” (Санкт-Петербург) производит мотор-редукторы с планетарно-фрикционными вариаторами скорости. К модулям движения можно отнести также высокооборотные мотор-шпиндели, которые получены объединением ротора электродвигателя и вала инструмента (см. рис. 1.5).

Мехатронные модули движения являются многофункциональными изделиями, которые выполняют электромеханическое, механическое и механико-информационное преобразования (см. табл. 2.4). В едином корпусе модуля находятся: двигатель, механическое устройство и датчик обратной связи. Точками структурно-конструктивной интеграции этих элементов являются интерфейсы *I4* и *I7*. Примером такого решения может служить мехатронный модуль фирмы *Maxon*, представленный на рис. 1.9. В состав ротационного модуля входят: коллекторный электродвигатель, планетарный редуктор и фотонимпульсный датчик обратной связи (инкодер).

Главной особенностью современного этапа развития мехатроники является создание принципиально нового поколения модулей – интеллектуальных мехатронных модулей (ИММ). По сравнению с мехатронными модулями движения в конструкцию ИММ дополнительно встраиваются компьютерные устройства и силовые электронные преобразователи, что придает этим модулям интеллектуальные свойства и является их главным отличительным признаком.

Интеллектуальные мехатронные модули реализуют все семь функциональных преобразований, представленных на рис. 2.6. Структурно-конструктивная интеграция в ИММ осуществляется по всем интерфейсным точкам (*I0–I8*).

В общем случае интеллектуальный мехатронный модуль состоит из следующих основных элементов:

- электродвигатель (хотя возможно использование движителей и других типов, например гидравлических);
- механическое устройство;
- датчики и устройства обратной связи;
- устройство компьютерного управления (УКУ);
- электронный силовой преобразователь;
- интерфейс *I0* для связи УКУ с компьютером верхнего уровня управления, а также внутренние интерфейсы (*I1–I8*).

Рассмотрим основные преимущества, которые дает применение интеллектуальных мехатронных модулей:

- способность ИММ выполнять сложные движения самостоятельно, без обращения к верхнему уровню управления, что повышает автономность модулей, гибкость и живучесть мехатронных систем, работающих в изменяющихся и неопределенных условиях внешней среды;

- упрощение коммуникаций между модулями и центральным устройством управления (вплоть до перехода к беспроводным коммуникациям), что позволяет добиваться повышенной помехозащищенности мехатронной системы и ее способности к быстрой реконфигурации;

- повышение надежности и безопасности мехатронных систем благодаря компьютерной диагностике неисправностей и автоматической защите в аварийных и нештатных режимах работы;

- создание на основе ИММ распределенных систем управления с применением сетевых методов, аппаратно-программных платформ на базе персональных компьютеров и соответствующего программного обеспечения;

- использование современных методов управления (программных, адаптивных, интеллектуальных, оптимальных) непосредственно на исполнительном уровне, что существенно повышает качество процессов управления в конкретных реализациях;

- интеллектуализация силовых преобразователей, входящих в состав ИММ, для реализации непосредственно в мехатронном модуле интеллектуальных функций по управлению движением, защите модуля в аварийных режимах и диагностики неисправностей;

- интеллектуализация сенсоров для мехатронных модулей позволяет добиться более высокой точности измерения, программным путем обеспечить в самом сенсорном модуле фильтрацию шумов, калибровку, линеаризацию характеристик вход/выход, компенсацию перекрестных связей, гистерезиса и дрейфа нуля.

Встраивание интеллектуальных устройств непосредственно в мехатронный модуль порождает и ряд ограничений. К ним следует отнести сложность модернизации, увеличение массогабаритных показателей модуля движения (по сравнению с приводами, где управляющие и электронные устройства вынесены в отдельные шкафы), а также существенные механические и температурные воздействия исполнительных устройств на встроенные электронные и компьютерные компоненты.

Пример ИММ представлен на рис. 1.33, а, это мехатронный модуль "Simodrive Posmo SI" фирмы Siemens. Отличительной чертой этого моду-

ля является то, что силовой преобразователь и управляющее устройство конструктивно объединяются с двигателем типа 1FK6. С помощью штекерной техники осуществляется подключение цифровых входов и диагностических сигналов, а также электрическая связь между двигателем и силовым преобразователем. Связь с центральным устройством управления и другими модулями организуется через стандартную шину "PROFIBUS", соединение производится подготовленным кабелем с присоединительным фланцем.

#### 2.4. АНАЛИЗ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ

Методы интеграции элементов, рассмотренные в двух предыдущих параграфах, основаны на совместном анализе функциональной и структурной моделей мехатронных модулей. Принятый подход к проектированию мехатронных модулей и систем заключается в нахождении оптимального соответствия между функциональной и структурной моделями синтезируемой системы. С инженерной точки зрения заданная последовательность функциональных преобразований может быть реализована различным набором структурных блоков. Процесс проектирования интегрированных мехатронных модулей и систем требует численных мер для оценки уровня интеграции элементов для обоснованного выбора среди вариантов решений. Предлагаемый показатель позволяет количественно оценивать функционально-структурный уровень интеграции, сравнивать и классифицировать различные мехатронные структуры на ранних этапах разработки.

Алгоритм анализа мехатронной системы на основе показателя функционально-структурной интеграции имеет следующий вид.

1. Структурная модель исследуемой системы представляется в виде связного ориентированного графа  $G_S = G_S(U_S, V_S)$ , где множество вершин  $V_S$  составляет структурные элементы системы, а множество ребер  $U_S$  отображает связи между ними. Для геометрического представления ориентированное ребро показывают в виде дуги со стрелкой, направление которой совпадает с направлением потока энергии или информации между соединяемыми вершинами.

2. Для построенной структурной модели  $G_S$  определяется число вершин графа  $N_S$ , равное числу отдельных блоков, используемых в данном структурном варианте.

3. Функциональная модель мехатронной системы также строится в виде связанного ориентированного графа  $G_{FB} = G_{FB}(U_{FB}, V_{FB})$ , где множество вершин  $V_{FB}$  графа образует функциональные преобразователи, а множество ребер  $U_{FB}$  отображает связи между ними.

4. Если в исходной функциональной модели две соседние вершины соответствуют одинаковым по типу функциональным преобразованиям, то они объединяются в одну вершину. В результате этой операции получаем сжатый функциональный граф  $G_F = G_F(U_F, V_F)$ , который содержит только оригинальные преобразователи.

5. Для сжатого функционального графа  $G_F$  определяют число вершин  $N_F$ , равное числу оригинальных функциональных преобразователей в исследуемой мехатронной системе.

6. Показатель функционально-структурной интеграции (ФСИ) для данной мехатронной системы рассчитывают как отношение

$$I^{FS} = N_F / N_S - 1. \quad (2.4)$$

Введенный показатель ФСИ представляет собой численную оценку уровня интеграции составляющих элементов. При проектировании интегрированных мехатронных систем следует стремиться к повышению показателя ФСИ, т.е. реализовывать наибольшее количество функциональных преобразований минимально возможным числом структурных элементов. В этом смысле выгодно исключать промежуточные структурные преобразователи и самостоятельные интерфейсы, а также создавать многофункциональные мехатронные модули. Рассмотренные в предыдущих параграфах два метода интеграции дают путь к решению именно этих задач.

Оценим на основании введенного показателя ФСИ степень интеграции элементов в приведенных ранее примерах. Традиционный электропривод с компьютерным управлением (см. рис. 2.7) содержит 7 основных структурных блоков и 8 интерфейсов, которые выполняют 7 функциональных преобразований (см. рис. 2.6). Следовательно, только если все интерфейсы встроить в основные блоки, то имеем нулевое значение показателя ФСИ:

$$I^{FS} = N_F / N_S - 1 = 7 / 7 - 1 = 0.$$

В случае, когда хотя бы один интерфейс представляет собой сепаратный блок, получаем отрицательные величины показателя.

В общем случае показатель  $I^{FS}$  будет отрицательным для избыточных структур, где число отдельных структурных элементов в системе



Рис. 2.9. Показатели функционально-структурной интеграции для традиционных приводов и мехатронных решений

превышает число заданных функциональных преобразований. Для мехатронных решений целесообразно принять за базовую степень интеграции значение  $I^{FS} = 0$  (рис. 2.9).

Базовая степень интеграции достигается при равенстве между числом требуемых функциональных преобразований и выполняющих их структурных блоков. Другими словами, каждый из семи функциональных преобразователей (см. рис. 2.6) технически реализуется одним самостоятельным устройством.

Применение мехатронных решений, основанных на различных методах интеграции, позволяет получить структурные решения с положительными значениями показателя ФСИ (см. рис. 2.9). Зависимость показателя ФСИ от числа интегрируемых элементов при заданном числе функциональных преобразований имеет гиперболический характер. Особенно высокая степень интеграции достигается при объединении в мехатронном модуле более пяти элементов. Этому условию удовлетворяют интеллектуальные мехатронные модули, в которых максимум функциональных преобразований сосредоточен в одном (с точки зрения пользователя) структурном элементе.



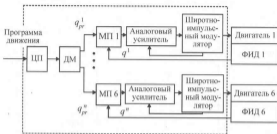


Рис. 2.10. Структура традиционной системы управления манипулятора "PUMA-560";

ЦП – центральный процессор; ДМ – демультиплексор; МП – микропроцессор; ФНД – фотонимпульсный датчик

Введенный показатель ФСИ может быть рассчитан не только для мехатронного модуля полного состава, но и его отдельных подсистем. Рассмотрим в этой связи примеры проектирования и сравнительного анализа подсистем компьютерного управления для манипуляционного робота "PUMA-560". Эти разработки выполнены специалистами кафедры "Робототехника и мехатроника" МГТУ "СТАНКИН" совместно с коллегами из других организаций.

Манипулятор "PUMA-560", который входит в состав серийно выпускаемого промышленного робота PM-01 обладает сложной антропоморфной кинематической схемой с шестью степенями подвижности (см. рис. 1.13). Робот оснащен электромеханическими приводами на базе двигателей постоянного тока с фотонимпульсными датчиками обратной связи. Устройство управления (в серийном варианте – типа "Сфера"), предназначенное для позиционного и контурного управления, имеет двухуровневую многопроцессорную архитектуру [68]. Структура традиционной системы управления для манипулятора "PUMA-560" представлена на рис. 2.10.

Верхний уровень системы управления содержит центральный процессор (DES LSI-11/02), который решает задачи тактического уровня управления (в первую очередь это работа с человеко-машинным интерфейсом и планирование траектории), а также демультиплексор, задаю-

щий программу перемещений по обобщенным координатам манипулятора. Исполнительный уровень управления реализован на шести микропроцессорах МП1...МП6 (типа "Rockwell 6503") со встроенными цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП). Каждый из этих микропроцессоров по своему каналу управления через ЦАП, аналоговый усилитель и широтно-импульсный модулятор выдает мощные ШИМ-сигналы на коллекторные двигатели постоянного тока, установленные в шарнирах робота.

На исполнительном уровне управления, предназначенном для отработки траектории движения робота, реализованы две петли обратной связи. Первый контур предназначен для вычисления в реальном времени позиционной ошибки как разности между программным ( $q_{pr}^i, i = 1, \dots, n$ ) и текущим ( $q^i$ ) положением данного привода. Внутренний контур построен на аналоговых устройствах и реализует обратную связь по скорости движения. Оба контура имеют фиксированные коэффициенты регуляторов, которые заданы предварительно и не могут быть изменены пользователем.

Таким образом, главный недостаток в построении традиционной системы управления заключается в том, что центральный процессор не участвует в отработке программной траектории. Это не позволяет учитывать в процессе управления важные для манипуляционных роботов динамические эффекты (взаимодействие степеней подвижности, переменность приведенных моментов инерции звеньев, нелинейность кинематических и динамических моделей), что существенно ухудшает качество управления, особенно на низких и высоких скоростях.

Построим функциональную модель для традиционной системы управления роботом (рис. 2.11), ограничившись рассмотрением только управляющей подсистемы, так как исполнительная подсистема в данном исследовании не будет подвергаться изменениям.

В состав модели входят общий информационный преобразователь, а также три функциональных преобразователя по каждому из каналов управления (это информационный, информационно-электрический и электрический преобразователи). Эти функциональные преобразования в традиционной структуре (см. рис. 2.10) реализуются двумя модулями (центральный процессор и демультиплексор), которые являются общими для всех каналов управления, и тремя структурными блоками (МП, аналоговый усилитель и широтно-импульсный модулятор) дополнительно на каждый привод.

Следуя принятому алгоритму расчета, два последовательно соединенных информационных преобразователя при расчете считаем одним



Рис. 2.11. Функциональная модель традиционной системы управления манипулятора "PUMA-560"

функциональным преобразованием. Тогда показатель ФСИ для традиционной системы, имеющей  $n$  каналов управления, рассчитываем по формуле

$$I_1^{FS} = \frac{3n}{n(1+1)+2} - 1 = -\frac{2}{3n+2}. \quad (2.5)$$

Характерные численные значения показателя  $I_1^{FS}$  для различного числа степеней подвижности робота приведены ниже:

Число каналов	1	2	3	4	5	6
$I_1^{FS}(n)$	-0,40	-0,25	-0,18	-0,14	-0,12	-0,1

Функция  $I_1^{FS}(n)$  для положительных значений аргументов  $n$  представляет собой возрастающую гиперболу, которая достигает максимального значения  $I_1^{FS} = 0$  при бесконечно большом числе каналов управления. Причем для любого числа каналов (в частности, при  $n = 6$ , что соответствует кинематике манипулятора "PUMA-560") получаем из (2.5) отри-

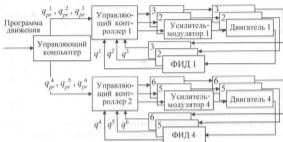


Рис. 2.12. Структура системы управления робота "PUMA-560" на основе управляющих контроллеров

цательное значение показателя ФСИ. Следовательно, согласно предложенной классификации (см. рис. 2.9) рассмотренная традиционная структура системы управления содержит избыточное число модулей по отношению к базовому уровню и ее нельзя считать мехатронным (интегрированным) решением.

Дальнейшие разработки осуществлялись на основе функционально-структурного подхода с целью реализации каждого из заданных функциональных преобразований на одном структурном модуле. Представленная в данном разделе система управления является совместной разработкой Будапештского технического университета и МГТУ "СТАНКИН" в рамках программы научно-технического сотрудничества между университетами [82]. Структурная интеграция элементов в традиционной системе управления робота проводилась по двум направлениям:

- объединение аналогового усилителя и широтно-импульсного модулятора, что технически реализовано в виде усилителя-модулятора;
- использование управляющего контроллера вместо демультиплексора и шести микропроцессоров с цифроаналоговыми преобразователями.

Структура разработанной системы управления представлена на рис. 2.12.

Верхний уровень управления реализован на компьютере IBM PC (Pentium II), который выполняет две основные функции: оперативное взаимодействие с пользователем и координация выполнения программных подзадач двумя управляющими контроллерами. Компьютер выдает позиционные уставки на вход контроллеров с максимальной частотой 2 кГц.

Исполнительный уровень системы аппаратно выполнен на двух управляющих контроллерах (типа "Advantech PCL-832"), каждый из которых одновременно управляет тремя степенями подвижности робота. Контроллеры установлены в параллельные слоты компьютера, в их состав входит декодер, вычислительное устройство и ЦАП, работа которых синхронизирована. На вход каждого усилителя-модулятора (типа АМС-25А) от контроллера поступает маломощный аналоговый сигнал, где он преобразуется в широтно-модулированные силовые импульсы, непосредственно управляющие вращением двигателей. Таким образом, управляющие контроллеры сочетают функции информационного и информационно-электрического преобразователей.

Важным преимуществом рассматриваемой системы (см. рис. 2.12) по сравнению с традиционной структурой (см. рис. 2.11) является доступ в реальном времени компьютера верхнего уровня к информации о текущем состоянии системы, что позволяет применять алгоритмы адаптивного управления движением.

Формула расчета показателя функционально-структурной интеграции для данной управляющей подсистемы для  $n$  каналов управления имеет вид

$$I_2^{FS} = \frac{3n}{1+2+n} - 1 = \frac{2n-3}{n+3}. \quad (2.6)$$

Зависимость показателя ФСИ от числа степеней подвижности манипулятора представляет собой участок возрастающей гиперболы, которая в пределе стремится к показателю  $I_{max} = 2$ . Характерные численные значения функции  $I_2^{FS}(n)$  в диапазоне  $n = [1, 6]$  приведены ниже.

Число каналов	1	2	3	4	5	6
$I_2^{FS}(n)$	-0,25	+0,20	+0,50	+0,71	+0,86	+1,00

Таким образом, рассматриваемая структура неэффективна (показатель отрицателен) для однокоординатной системы (при  $n = 1$ ), и значения показателя ФСИ становятся положительными только начиная с двух каналов управления. Для шестистепенного манипулятора "PUMA-560" показатель ФСИ равен 1,0, что позволяет отнести эту структуру к мехатронным решениям.

Этот класс систем управления в настоящее время предлагается на рынке целым рядом ведущих фирм (Galil, Delta Tau, MEI), которые производят системы компьютерного управления движением для многокоординатных роботов, производственных машин и мехатронных систем. Высокая эффективность управляющих контроллеров по критерию ФСИ хорошо коррелируется с их оценками по стоимости и компактности, что в свою очередь положительно влияет на массогабаритные и ценовые характеристики конечной продукции – мехатронных и робототехнических систем.

Продолжим функционально-структурный анализ системы управления робота с целью дальнейшего повышения значений показателя ФСИ. Проектирование системы управления нового уровня представляется целесообразным сосредоточить на двух главных точках интеграции:

- реализация всех функций информационного преобразователя в едином структурном модуле;
- сосредоточение функции информационно-электрического преобразования в одном структурном блоке.

Таким образом, в предлагаемой системе робот является единым объектом управления, а не набором отдельных звеньев. С прикладной точки зрения указанные решения позволяют также устранить два существенных недостатка, присущих рассмотренным выше системам: наличие аналоговой связи между контроллером и усилителем-модулятором и замыкание контуров скоростной и токовой обратной связей в усилителе. В производственных условиях интерфейсы аналогового типа значительно уменьшают помехозащищенность и робастность системы управления.

Один из возможных вариантов системы управления, где реализованы указанные решения, представлен на рис. 2.13.

Ядром разработанной системы управления является контроллер движения (КД), который выполняет все заданные информационные преобразования. В состав системы входят также усилитель с широтно-импульсным входом и фотопульсные датчики обратной связи.

Важнейшим преимуществом данной системы управления является участие КД как в планировании траектории робота, так и в обработке



Рис. 2.13. Структура системы управления робота "PUMA-560" на основе контроллера движения

программного движения. Это позволяет применять современные методы интеллектуального и адаптивного управления роботами и манипуляторами. Контроллер движения в представленном варианте реализован как аппаратно-программное сочетание цифрового сигнального процессора (DSP-processor) и блоков FPGA (Field Programmable Gate Arrays), которые описаны в п. 1.3. В системе исключено цифроаналоговое преобразование сигналов, так как на выходе блоков FPGA сразу формируется широтно-модулированный сигнал, который, по сути, имеет цифровое представление.

Функцию информационно-электрического преобразования выполняет усилитель с ШИМ-входом. ШИМ-сигнал, поступающий от контроллера движения, может иметь только два уровня (высокий и низкий) и при этом является маломощным, что принципиально отличает данную схему от традиционных широтно-импульсных модуляторов.

Показатель функционально-структурной интеграции для рассматриваемой системы (см. рис. 2.13) в общем случае (для  $n$  каналов управления) имеет вид

$$I_3^{FS} = \frac{3n}{1+n} - 1 = \frac{2n-1}{n+1}. \quad (2.7)$$

Численные значения функции  $I_3^{FS}(n)$ , которая, как и в предыдущем случае, является гиперболой, приведены ниже.

Число каналов	1	2	3	4	5	6
$I_3^{FS}(n)$	+0,5	+1,0	+1,25	+1,4	+1,5	+1,57

Для шестистепенного робота получили  $I_3^{FS} = 1,57$ , т.е. наибольшее значение показателя ФСИ из всех рассмотренных вариантов построения системы управления.

Очевидно, что все аспекты анализа, классификации и проектирования столь сложных систем, как мехатронные, не могут быть оценены единственным численным критерием. Тем не менее введенный показатель ФСИ дает возможность сравнивать структуры мехатронных систем и определять уровень достигнутой интеграции для конкретного технического решения.

## 2.5. МЕТОД ПЕРЕНОСА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Большой интерес представляет распределение функций между структурными элементами мехатронной системы. Современная тенденция при построении машин нового поколения заключается в переносе функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерным и информационным) компонентам, которые легко перепрограммируются под новую задачу и при этом являются относительно дешевыми. Использование данного метода интеграции позволяет минимизировать механическую сложность мехатронной системы.

На рис. 2.14 представлен характерный график, который отражает динамику этого процесса в производственных машинах за 30 лет, начиная с 1970-х годов.

Анализ показывает, что еще в начале 90-х годов XX века подавляющее большинство функций машины (более 70 %) реализовывалось механичес-



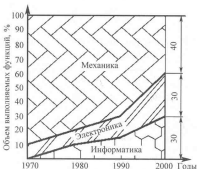


Рис. 2.14. Распределение функциональной нагрузки в современных производственных машинах

ким путем. Однако сейчас механические устройства все чаще становятся узким местом в сложных машинах. Это объясняется их недостаточной функциональной гибкостью, наличием трения, люфтов и упругостей в передачах, все возрастающей стоимостью изготовления.

Поэтому в последующие десятилетия происходило постепенное вытеснение механических узлов сначала электронными, а затем и компьютерными блоками. Производители отдают предпочтение упрощенным механическим решениям, но со сложными интеллектуальными системами управления. В настоящее время в мехатронных системах объем функций (а соответственно и стоимость) распределен между механическими, электронными и компьютерными компонентами практически поровну. При этом доля компьютерной части возросла за последнее 10-летие вдвое, и есть все основания прогнозировать сохранение этой тенденции в технике будущего.

Мехатронный подход предполагает не дополнение, а замещение функций, традиционно выполняемых механическими элементами системы, на электронные и компьютерные блоки. Если одна и та же функция может быть реализована устройствами различной физической природы, то разработчик системы должен руководствоваться технологическими и организационно-экономическими критериями.

В п. 2.4 был показан пример переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства, это способ бессенсорного управления мехатронными модулями. Другим примером может служить метод электронной редукции, когда управляемый исполнительный механизм отслеживает движение задающего устройства (рис. 2.15).

По сути метод электронной редукции является аналогом способа копирующего управления, который был разработан и широко используется для дистанционно управляемых роботов и манипуляторов [16, 31]. Коэффициент редукции определяет отношение скоростей между степенями подвижности задающего (master) и исполнительного (slave) устройств. Значение коэффициента устанавливается программным путем и допускается его коррекция в процессе движения системы.

Для количественного анализа и оценки мехатронных модулей и систем введем специальную меру – показатель распределения функциональной нагрузки (РФН). Показатель РФН позволяет оценить объем функциональной нагрузки, которую несет каждый из структурных элементов или блоков в исследуемой системе. Чем выше значение данного показателя, тем большее влияние оказывает данный элемент на качество системы в целом, т.е. ее стоимость, надежность и другие комплексные характеристики. Показатель РФН является численной мерой, которая определяет важность структурной единицы (элемента, группы элементов, подсистемы) на основе наличия и числа ее связей с другими элементами системы. Чем выше ранг данного узла, тем большую функциональную нагрузку он несет, тем больше он влияет на качество системы в целом.

В данном учебном пособии используется метод анализа значимости структурных элементов, разработанный на основе теории графов и матриц [39, 40, 42, 69]. Алгоритм вычисления рангов структурных элементов и анализ распределения функциональной нагрузки внутри системы имеет следующий вид.

1. Структурная схема исследуемой системы представляется в виде ориентированного графа  $G = G(V, U)$ , где множество вершин  $V$  составляет структурные элементы системы, а множество ребер  $U$  отображает связи между ними. Для геометрического представления ориентированное ребро  $u \in U$  показывается в виде дуги со стрелкой, направление которой совпадает с направлением потока энергии или информации между соединяемыми вершинами. Рассматриваются только связные графы, в которых для любой пары вершин  $(v_i, v_j) \in V$ ,  $(i, j = 1, \dots, n)$  существует соединяющий их путь.

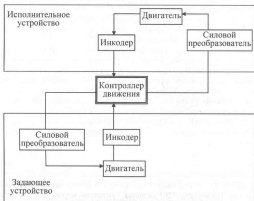


Рис. 2.15. Система управления движением на основе метода электронной редукции

2. Для построенного графа формируется матрица смежности  $A = A(V, U)$ .

Пусть структура системы содержит  $n$  вершин  $(X_1, X_2, \dots, X_n) \in V$ , соединенных  $m$  ребрами  $(u_1, u_2, \dots, u_m) \in U$ . Тогда получаем матрицу  $A$  размером  $(n \times n)$ , которая состоит из нулей и единиц. Элемент матрицы  $a_{ij} = 1$ , если граф содержит ребро  $u_{ij} \in U$ , направленное от вершины  $X_i$  к  $j$ -му узлу. В противном случае принимается, что  $a_{ij} = 0$ . Число единичных элементов в матрице  $A$  будет равно числу ребер.

3. Определяем матрицу  $R$  по следующей формуле [39]:

$$R = A + A^2 = A(E + A), \quad (2.8)$$

где  $A$  – матрица смежности;  $E$  – единичная матрица.

4. Ранг элемента  $X_i$  определяется как сумма элементов  $i$ -й строки матрицы  $R$ :

$$\text{rang} X_i = \sum_{j=1, \dots, n} r_{ij}. \quad (2.9)$$

Таким образом, ранг структурного элемента представляет собой векторную норму первого порядка матрицы  $R$  в пространстве  $C^n$  ( $n$  – мерное вещественное пространство). Иногда такой вектор еще называется манхэттенским вектором, т.е. его ранг рассчитывается суммированием элементов в строках матрицы.

5. Показатель РФН для структурного элемента  $X_i$  определяется выражением

$$J_i^{\text{DFN}} = \frac{\text{rang} X_i \cdot 100\%}{\sum_{i=1, \dots, n} \text{rang} X_i}. \quad (2.10)$$

Как следует из формулы (2.10), значение этого показателя определяется в процентном соотношении и нормализуется таким образом, что сумма показателей РФН всех элементов системы единична для любого исходного графа, т.е.

$$\sum_{i=1, \dots, n} J_i^{\text{DFN}} = 1.$$

Такая нормализованная форма удобна для сравнительного анализа распределения функциональной нагрузки в системах различной сложности и с различными типами структуры.

6. Расчет общего показателя РФН группы элементов, входящих в определенную подсистему  $g \in G$ , производится суммированием показателей РФН составляющих элементов.

Например, если заданная группа  $g$  состоит из  $k$  элементов  $V \supset (X_1, X_2, \dots, X_k)$ , тогда показатель РФН группы получается как сумма  $k$  показателей:

$$I_g^{DFL} = \sum_{i=1, \dots, k} I_i^{DFL}. \quad (2.11)$$

Для оценки функциональной нагрузки целесообразно определить среднее значение показателя РФН для элементов данной группы:

$$\bar{I}_g = I_g^{DFL} / k. \quad (2.12)$$

7. Ранжирование элементов мехатронной системы производится на основе значений их показателей РФН и делается заключение о распределении функциональной нагрузки в исследуемой системе.

Представленную методику расчета показателя РФН рассмотрим на примере трех вариантов системы управления робота "PUMA", которые были изложены ранее (см. рис. 2.10–2.13). Структура исследуемой системы включает в себя как управляющую подсистему, так и электромеханическую часть (электродвигатель и фотонипульсные датчики обратной связи), которая будет неизменной при выполнении всего анализа. Полученные значения показателей РФН рассчитаны для трех вариантов построения подсистемы управления. Графы, представляющие структурные модели рассматриваемых систем, показаны на рис. 2.16, 2.17, 2.18.

Граф  $G_1$ , который соответствует традиционной системе управления, имеет наибольший размер: он содержит 32 вершины ( $n = 32$ ) и 43 ребра ( $m = 43$ ). Для графа  $G_2$ , разработанного для системы второго уровня интеграции, имеем  $n = 21$  и  $m = 26$ . Наименьшее число структурных элементов (а следовательно, и вершин), содержит граф  $G_3$  для системы управления на базе контроллера движения ( $n = 19$ ,  $m = 30$ ).

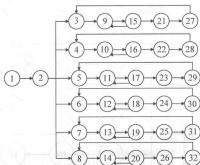


Рис. 2.16. Структурная модель традиционной системы управления манипулятора "PUMA-560":

1 – центральный процессор; 2 – демультиплексор; 3–8 – микропроцессоры; 9–14 – аналоговые усилители; 15–20 – широтно-импульсные модуляторы; 21–26 – двигатели; 27–32 – фотодиодные датчики обратной связи

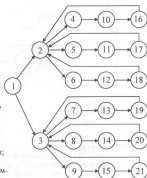


Рис. 2.17. Структурная модель системы управления роботом "PUMA-560" на основе управляющих контроллеров:

1 – управляющий компьютер; 2, 3 – управляющие контроллеры; 4–9 – усилители-модуляторы; 10–15 – двигатели; 16–21 – фотодиодные датчики обратной связи

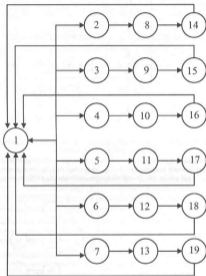


Рис. 2.18. Структурная модель системы управления робота "PUMA-560" на основе контроллера движения:

1 – контроллер движения; 2–7 – усилители с ШИМ-входом;  
8–13 – двигатели; 14–19 – фотоимпульсные датчики обратной связи

Матрица соответствия  $A_1(32 \times 32)$  для графа  $G_1$  содержит 1024 элемента, из которых 42 являются единичными (по числу ребер в графе  $G_1$ ), остальные элементы – нулевые. Единичные значения имеют следующие элементы матрицы  $A_1$ : [1, 2], [2, 3], [2, 4], [2, 5], [2, 6], [2, 7], [2, 8], [3, 9], [4, 10], [5, 11], [6, 12], [7, 13], [8, 14], [9, 15], [10, 16], [11, 17], [12, 18], [13, 19], [14, 20], [15, 9], [15, 21], [16, 10], [16, 22], [17, 11], [17, 23], [18, 12], [18, 24], [19, 13], [19, 25], [20, 14], [20, 26], [21, 27], [22, 28], [23, 29], [24, 30], [25, 31], [26, 32], [27, 3], [28, 4], [29, 5], [30, 6], [31, 7], [32, 8].

Матрицы соответствия  $A_2(32 \times 32)$ ,  $A_3(21 \times 21)$  и  $A_4(19 \times 19)$  для графов соответственно  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  имеют следующий вид:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 01100000000000000000 \\ 00011100000000000000 \\ 00000011100000000000 \\ 00000000010000000000 \\ 00000000001000000000 \\ 00000000000100000000 \\ 00000000000010000000 \\ 00000000000001000000 \\ 00000000000000100000 \\ 00000000000000010000 \\ 00000000000000001000 \\ 00000000000000000100 \\ 00000000000000000010 \\ 00000000000000000001 \\ 01000000000000000000 \\ 01000000000000000000 \\ 01000000000000000000 \\ 00100000000000000000 \\ 00100000000000000000 \end{bmatrix};$$



$$A_3 = \begin{bmatrix} 01111110000000000000 \\ 10000001000000000000 \\ 10000000100000000000 \\ 10000000010000000000 \\ 10000000001000000000 \\ 10000000000100000000 \\ 10000000000010000000 \\ 00000000000000100000 \\ 00000000000000010000 \\ 00000000000000001000 \\ 00000000000000000100 \\ 00000000000000000010 \\ 00000000000000000001 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \end{bmatrix}.$$

Далее определяем матрицы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , которые задаются выражениями:

$$R_1 = A_1 + A_1^2, \quad R_2 = A_2 + A_2^2, \quad R_3 = A_3 + A_3^2,$$

где  $A_i$  – матрица смежности графа  $G_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

В соответствии с (2.11) показатели РФН были определены для всех элементов исследуемых структурных вариантов на основе полученных матриц  $R_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Результаты расчета показаны на рис. 2.19.

Особый интерес представляет анализ функциональной нагрузки, которую несут компьютерные компоненты мехатронных систем. В традиционной системе управления (см. рис. 2.16, 2.19, а) центральный процессор и демультиплексор являются наиболее нагруженными элементами, в

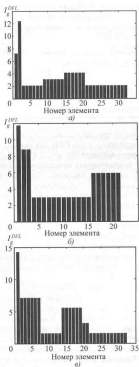


Рис. 2.19. Показатели распределения функциональной нагрузки для элементов: а – традиционной системы управления; б – системы управления на основе управляющих контроллеров; в – системы управления на основе контроллера движения

### 2.5. Средний показатель РФН для элементов компьютерной и электронной группы

Структурные варианты подсистемы управления	Средний показатель РФН, %
Традиционная структура (первый уровень интеграции)	7,6
Структура второго уровня интеграции	12,4
Структура третьего уровня интеграции	21,3

то время как шесть микропроцессоров несут функциональную нагрузку в несколько раз меньшую (показатель РФН для каждого из них составляет около 2 %). Для второго варианта (см. рис. 2.17, 2.19, б) показатель РФН для каждого из трех компьютерных компонентов существенно превосходит нагрузку других элементов системы. Наибольший показатель РФН среди всех рассматриваемых компьютерных компонентов имеет контроллер движения в системе третьего уровня интеграции (см. рис. 2.18, 2.19, в). Показатель РФН этого блока равен 14 % при управлении движением шестистепенного робота.

В табл. 2.5 приведены средние значения показателя РФН для группы элементов, содержащих компьютерные и электронные компоненты. Эта группа содержит структурные блоки, ответственные за информационное, информационно-электрическое и электронинформационное функциональные преобразования в мехатронной системе. Расчет проводился по (2.13) рассмотренного алгоритма.

Как следует из приведенной таблицы, среднее значение показателя РФН для подсистемы управления на основе контроллеров движения почти в 3 раза выше, чем в случае традиционного структурного варианта.

Таким образом, предложенные две новые численные меры – критерий функционально-структурной интеграции и показатель распределения функциональной нагрузки – в совокупности позволяют на начальном этапе проектирования оценивать и классифицировать структурные решения в мехатронике. Конечно, далеко не все важные аспекты такой сложной системы, как мехатронная, могут быть оценены несколькими числовыми показателями. Тем не менее становится возможным сравнивать и анализировать важные структурные характеристики системы на стадиях разработки концепции системы и проектирования ее составных частей.

## Глава 3

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ МОДУЛИ

### 3.1. МОДУЛИ ДВИЖЕНИЯ

Согласно принятой терминологии в модуле движения (МД) конструктивно объединены управляемый двигатель и механическое устройство (см. п. 1.2), причем вал двигателя является элементом механического преобразователя движения.

Мотор-редукторы, по-видимому, исторически первые по принципу своего построения модули движения, которые стали выпускаться серийно и нашли широкое применение в приводах различных машин [49]. Мотор-редуктор представляет собой компактный конструктивный модуль, объединяющий электродвигатель и редуктор. По сравнению с традиционным соединением двигателя и редуктора через муфту мотор-редукторы обладают целым рядом существенных преимуществ:

- меньшими габаритными размерами;
- сниженной стоимостью за счет сокращения числа присоединительных деталей, уменьшения затрат на установку, наладку и запуск изделия;
- улучшенными эксплуатационными свойствами: минимальным уровнем вибраций, пыле- и влагозащищенностью, безопасностью и надежностью работы в неблагоприятных производственных условиях.

Конструктивное исполнение модуля мотор-редуктора определяется типом редуктора и электродвигателя [17]. Так, НТЦ "Редуктор" (Санкт-Петербург) выпускает одно-, двух- и трехступенчатые мотор-редукторы: цилиндрические (передаточное отношение  $i = 1,6...12,5$ ; частота вращения выходного вала  $n_2 = 450...3,55 \text{ мин}^{-1}$  и крутящий момент на выходном валу  $T_2 = 18...8530 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ), цилиндро-червячные ( $i = 16...1600$ ;  $n_2 = 98,75...0,47 \text{ мин}^{-1}$  и  $T_2 = 6...69300 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ), червячные ( $i = 5...4000$ ;  $n_2 = 300...0,187 \text{ мин}^{-1}$  и  $T_2 = 4...63200 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ), планетарные ( $i = 4...400$ ;  $n_2 = 280...3,55 \text{ мин}^{-1}$  и  $T_2 = 60...8600 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) и волновые ( $i = 80...125$ ;  $n_2 = 18...6,3 \text{ мин}^{-1}$  и  $T_2 = 35...4500 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) на лапах, фланцевые и с полым выходным валом.

На рис. 3.1 представлен планетарно-цепочный одноступенчатый мотор-редуктор, состоящий из электродвигателя 1 и преобразователя движения 2, которые соединены в единый корпус винтами 3.

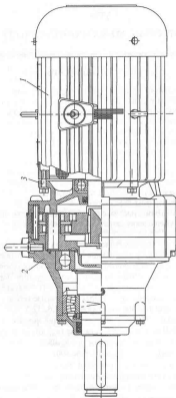


Рис. 3.1. Планетарно-цепочный одноступенчатый мотор-редуктор

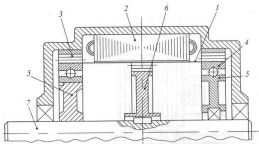


Рис. 3.2. Мотор-редуктор на основе волнового механизма [56]:

1 – гибкое колесо; 2 – электромагнитный генератор волны; 3 – колесо;  
4 – подшипник; 5 – кулачок; 6 – зубчатое колесо; 7 – выходной вал

Мотор-редуктор на основе волнового механизма с электромагнитным генератором волны изображен на рис. 3.2. Он состоит из: гибкого колеса 1, электромагнитного генератора волны 2, жесткого колеса 3, гибкого подшипника 4, кулачка 5, зубчатого колеса 6 и выходного вала 7.

В состав современных модулей движения могут входить и другие механические устройства – тормозные и люфтовывбирающие механизмы, вариаторы и направляющие. На рис. 3.3 показана компоновочная схема волнового мотор-вариатора-редуктора, выпускаемого НТИЦ "Редуктор" (Санкт-Петербург), а ниже даны технические характеристики для различных типоразмеров этих модулей движения.

#### Технические характеристики волновых мотор-вариаторов-редукторов

Типоразмер мотор-вариатора-редуктора .....	МВВэ-50; МВВэ-63; МВВэ-80; МВВэ-100; МВВэ-125; МВВэ-160; МВВэ-200; МВВэ-250; МВВэ-315
Диапазон регулирования .....	3,5; 5,3; 5,8
Частота вращения выходного вала $n_2$ , мин <sup>-1</sup> :	
max .....	1,36...2,1
min .....	8,0...12,5
Мощность двигателя $P_1$ , кВт .....	0,18...5,5

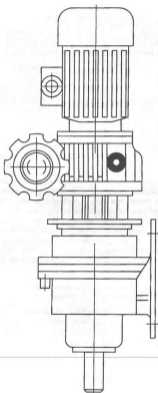


Рис. 3.3. Волновой мотор-вариатор-редуктор

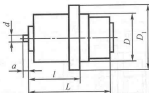


Рис. 3.4. Мотор-шпиндели типа ШФ (производство АМО "ЗИЛ", Москва)

К модулям движения относятся также высокоскоростные мотор-шпиндели. В настоящее время выпускается широкая номенклатура мотор-шпинделей с частотой вращения  $9000 \dots 250\,000 \text{ мин}^{-1}$ , предназначенных для обработки различных металлов и неметаллических материалов шлифованием, фрезерованием, сверлением, а также специального назначения. Так, АМО "ЗИЛ" (Москва) выпускает электро- и пневмошпиндели типов: Ш, ШК, ШП, ШФ, ШКС, ШКФ, ШФВ, ШПЛ, ШКЛ, АС, СФС, АП.

Мотор-шпиндели горизонтального типа: Ш, ШК, ШП, ШФ, ШКС предназначены для внутришлифовальных станков, имеют частоту вращения до  $150\,000 \text{ мин}^{-1}$  и мощность  $0,6 \dots 30 \text{ кВт}$ . Они снабжены жидкостным охлаждением. Шпиндель приводят во вращение с помощью асинхронного электродвигателя. Смазывание подшипниковых опор осуществляют масляным туманом. Электрошпиндели типа ШП и ШКС имеют устройство внутренней температурной защиты. На рис. 3.4 изображен внешний вид мотор-шпинделя типа ШФ, а в табл. 3.1 приведены их технические параметры.

### 3.1. Геометрические параметры электрошпинделей типа ШФ

Тип электрошпинделя	Размеры, мм						Масса, кг
	$D$	$D_1$	$L$	$l$	$a$	$d$	
ШФ 36-48	100	125	207	110	11	20	7,7
ШФ 60-90	80	110	150	95	6	12	4,5
ШФ 90-120	80	110	150	95	6	8	5,0
ШФ 120-150	80	110	150	95	6	7	5,0



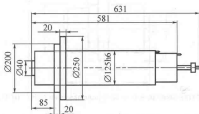


Рис. 3.5. Мотор-шпиндели типа ШКФ (производство АМО "ЗИЛ", Москва)

Электрошпиндели типа ШКФ (рис. 3.5) с автоматической сменой инструмента, частотой вращения  $30\,000\text{ мин}^{-1}$  и мощностью 25 кВт предназначены для использования в станках для скоростного фрезерования деталей из легких сплавов.

### 3.2. МЕХАТРОННЫЕ МОДУЛИ ДВИЖЕНИЯ

Мехатронный модуль движения (ММД) представляет собой конструктивно целостное изделие, объединяющее в одном корпусе двигатель, механическую, электрическую и информационную части, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями. В связи с развитием новых электронных технологий, которые позволили создать миниатюрные датчики и электронные блоки для обработки их сигналов, в мехатронных модулях движения появились электронные и информационные устройства, что является их главным отличием от модулей движения.

Для создания современных движущихся систем и технологических машин необходимы разнообразные мехатронные модули движения. Требования к развиваемым силам, точности и скорости движений диктуются особенностями технологической операции, а требование минимизации размеров мехатронного модуля движения – необходимостью встраивания его в технологическую машину. Попытка синтеза мехатронного модуля движения из серийно выпускаемых компонентов может привести к технически и экономически неэффективным решениям. Поэтому более ра-

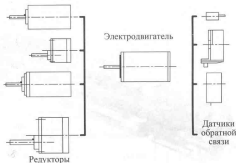


Рис. 3.6. Блочная-модульная схема построения мехатронных модулей движения

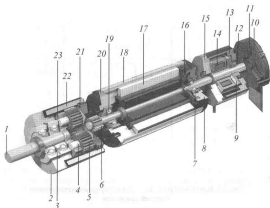
ациональным является проектирование специализированного модуля, наиболее полно отвечающего служебному назначению машины.

На рис. 3.6 показана конструктивная схема ММД, позволяющая подключать к электродвигателю различные типы редукторов и фотопульсных датчиков обратной связи.

Эта схема реализует метод объединения элементов мехатронного модуля в едином корпусе, который был описан в п. 2.3. Применение этого метода интеграции элементов позволяет комбинировать в ММД двигатели и преобразователи движения различных типов и мощностей, обеспечивая широкий спектр механических характеристик модуля движения по скорости и вращающему моменту.

Примером мехатронных модулей вращательного движения могут служить ММД фирмы Maxon. Новая серия модулей EC-max имеет диаметр 16...40 мм, длину 24...88 мм и мощность до 120 Вт. Конструктивная схема модулей представлена на рис. 3.7.

Модули построены путем объединения в едином корпусе: бесконтактного двигателя постоянного тока, планетарного редуктора, тормозного устройства и инкодера (фотопульсного датчика).



**Рис. 3.7. Конструкция мехатронных модулей движения семейства ЕС-max фирмы Maxon:**

- 1 – выходной вал; 2 – фланцевая крышка; 3 – подшипник выходного вала; 4 – керамическая или стальная ось; 5 – сателлиты планетарной передачи; 6 – малое зубчатое колесо; 7, 19 – шариковый подшипник; 8 – фланец; 9 – тормозной диск; 10 – печатная плата; 11 – кодирующий диск инкодера; 12 – корпус инкодера; 13 – корпус тормозного устройства; 14 – статор; 15 – разделительная крышка; 16 – печатная плата с датчиками Холла; 17 – статорный пакет; 18 – корпус модуля; 20 – фланец; 21 – центральное зубчатое колесо; 22 – крышка редуктора; 23 – водило

Бесконтактными (или вентильными) двигателями постоянного тока (brushless motors – англ.) называются электрические машины, где функции коллектора и щеток выполняют полупроводниковые управляемые ключи. Они свободны от недостатков, присущих традиционным двигателям постоянного тока, которые обусловлены наличием щеточно-коллекторного узла. Вентильные двигатели по сравнению с коллекторными аналогами имеют преимущества:

- высокую надежность, большой срок службы, не требуется обслуживание при эксплуатации (так как нет коллекторного искрения и износа щеток, уменьшено трение и нагрузка на подшипники);
- улучшенные тепловые характеристики (отсутствуют тепловыделяющие элементы в роторе, поэтому тепло рассеивается только на обмотках статора), малые сечения проводов;
- высокое быстродействие за счет малого момента инерции ротора, стабильную частоту вращения, которая не зависит от частоты напряжения питающей сети;
- большую перегрузочную способность по моменту, постоянный момент во всем диапазоне регулирования скорости;
- широкий диапазон регулирования скорости, линейные механические и регулировочные характеристики, равномерное вращение на низких скоростях.

Бесконтактные двигатели постоянного тока состоят из трех основных элементов:

- 1) электрической машины синхронного типа с  $m$ -фазной обмоткой на статоре и ротором в виде постоянного магнита;
- 2) датчика положения ротора (ДПР), выполненного в одном корпусе с двигателем и предназначенного для выработки сигналов управления моментами времени и последовательностью коммутации токов в обмотках статора;
- 3) электронного коммутатора, осуществляющего по сигналам ДПР коммутацию токов в обмотках статора.

Датчики положения ротора определяются их чувствительными элементами, которые могут быть построены с использованием ЭДС Холла, фотоэффекта и т.д.

Принцип действия бесконтактного двигателя рассмотрим на примере упрощенной схемы (рис. 3.8). Двигатель имеет: три обмотки на статоре, смещенные в пространстве на  $120^\circ$  и соединенные в звезду, ДПР с одним сигнальным элементом (СЭ) и тремя чувствительными элементами (ЧЭ) (их число равно числу обмоток статора), а также коммутатор, выполненный на трех транзисторах, работающих в ключевом режиме.

В положении ротора, показанном на рис. 3.8, сигнальный элемент через чувствительный элемент  $A$  открывает транзистор  $T_A$ . Намагничивающая сила (НС) обмотки  $F_A$  взаимодействует с потоком постоянного магнита ротора. Возникает вращающий момент, и двигатель приходит во вращение (1-й такт на рис. 3.9, *a*). Вместе с ротором поворачивается и

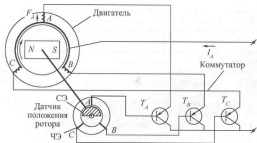


Рис. 3.8. Упрощенная принципиальная схема бесщеточного двигателя постоянного тока

сигнальный элемент ДПР. При повороте ротора на угол, чуть больший  $30^\circ$ , СЭ воздействует сразу на два чувствительных элемента  $A$  и на  $B$ . В результате открываются два транзистора:  $T_A$  и  $T_B$ . Ток протекает по обеим обмоткам  $A$  и  $B$  и возникает результирующая сила  $F_{AB}$ , повернутая на  $60^\circ$  по сравнению с первым положением (2-й такт, рис. 3.9, б).

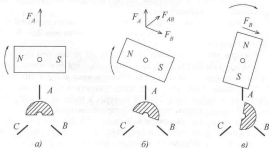


Рис. 3.9. Три такта в работе бесщеточного двигателя постоянного тока

Эта сила продолжает взаимодействовать с полем постоянного магнита и двигатель развивает вращающий момент. Когда угол поворота станет чуть больше  $90^\circ$ , транзистор  $T_A$  закроется, ток будет проходить только по обмотке  $B$ . Поле ротора будет взаимодействовать только с НС этой обмотки, однако вращающий момент по-прежнему будет вращать ротор двигателя в том же направлении (3-й такт, рис. 3.9, в). В конечном итоге двигатель разовьет такую скорость, при которой его момент будет уравниваться моментом нагрузки.

Если бы бесконтактный двигатель имел столько же обмоток, чувствительных элементов и транзисторов, сколько обычный двигатель имеет коллекторных пластин, то по своим свойствам и характеристикам они ничем бы не отличались друг от друга. Однако увеличение числа элементов сильно усложняет конструкцию машины. Поэтому в реальных двигателях число обмоток, а соответственно и число чувствительных элементов и транзисторов не превышает 3...4. Малое число обмоток обуславливает ряд особенностей работы бесконтактного двигателя постоянного тока, вызванных скачкообразным перемещением НС статора. Это пульсация вращающего момента, пульсация токов в обмотках статора и суммарного тока двигателя, что объясняется дискретным питанием обмоток (в тот момент, когда открыты два транзистора, потребляемый ток вырастает в 2 раза по сравнению с режимом, когда открыт только один транзистор).

Частоту вращения бесконтактных двигателей можно регулировать в широких пределах путем изменения амплитуды напряжения питания либо скважности (длительности импульсов) для широтно-импульсного метода управления.

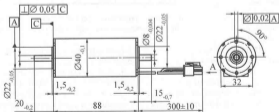


Рис. 3.10. Двигатель серии ЕС-тах фирмы Maxon

### 3.2. Технические характеристики бесконтактных двигателей фирмы Махов (номинальная мощность 120 Вт, напряжение 48 В)

Частота вращения холостого хода, $\text{мин}^{-1}$	10000	7140	4650	3550
Пусковой момент, Н·м	2,190	1,540	1,070	0,854
Ток в режиме холостого хода, мА	306	194	113	81,7
Сопротивление обмотки фаза-фаза, Ом	0,999	1,99	4,37	7,16
Максимальный КПД, %	85	83	81	79
Коэффициент момента двигателя, Н·м/А	0,045	0,063	0,097	0,127
Коэффициент ЭДС двигателя, В · $\text{мин}^{-1}$	210	150	97,9	75
Механическая постоянная времени, мс	4,9	5,0	4,6	4,5
Момент инерции ротора, $\text{г·см}^2$	101	101	101	101
Индуктивность обмотки фаза-фаза, мГн	0,196	0,383	0,898	1,53

Конструкция бесконтактных двигателей серии ЕС-тах фирмы Махов представлена на рис. 3.10, технические характеристики даны в табл. 3.2.

Пресобразователи движения на основе планетарных зубчатых передач находят широкое применение в мехатронных модулях. Это объясняется их компактностью и малой массой, реализацией больших передаточных отношений, малой нагрузкой на опоры, большим коэффициентом полезного действия, высокой кинематической точностью и жесткостью. Конструкция планетарного редуктора, входящего в состав мехатронных модулей движения серии ЕС-тах, приведена на рис. 3.11, а технические характеристики – ниже.

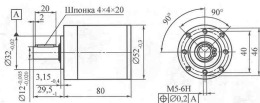


Рис. 3.11. Планетарный редуктор для ММД серии EC-max фирмы Maxon

Датчики мехатронных модулей должны иметь конструкцию, позволяющую размещать их в местах с ограниченным для установки оборудованием объемом; обладать помехоустойчивостью, возможностью эксплуатации в условиях электромагнитных помех, колебаний напряжения и частоты сети, а также устойчивостью к механическим воздействиям (ударам, вибрациям) и к изменениям параметров окружающей среды (температуры, влажности и т.п.).

#### Технические характеристики планетарного редуктора

Материал выходного вала . . . . .	Коррозионно-стойкая сталь
Подшипник выходного вала . . . . .	Шариковый
Радиальный люфт на расстоянии 12 мм от фланца, мм. . . . .	0,06
Аксиальный люфт при нагрузке более 5 Н, мм. . . . .	0,3
Максимально допустимая аксиальная нагрузка, Н . . . . .	200
Максимально допустимое усилие напрессовки, Н . . . . .	500
Допустимая частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	< 6000
Допустимый диапазон температур, °С	-20...+80
Максимально допустимая аксиальная нагрузка на расстоянии 12 мм от фланца, Н . . . . .	500, 700, 900, 900 соответ- ственно при числе ступе- ней редуктора 1, 2, 3, 4





Рис. 3.12. Инкодеры серии ES-тах фирмы Maxon

Принцип действия фотоэлектрических датчиков основан на использовании физического эффекта периодического изменения освещенности в зависимости от перемещения (угла поворота). Эти датчики являются бесконтактными и дискретными. В цифровых фотоэлектрических датчиках измеряемое непрерывное значение угла и скорости поворота вала преобразуется в цифровой двоичный (реже десятичный) код, т.е. кодовую комбинацию электрических сигналов. В таком виде они могут непосредственно поступать в ЭВМ без дополнительных преобразований.

Инкрементальные фотоимпульсные датчики не имеют ограничений по диапазону углов поворота и измеряют только приращения перемещений. Для устранения ошибок, вызванных помехами, и организации абсолютного отсчета вводится синхронизирующий импульс (ноль-импульс), который подается в третий канал при каждом проходе через отсчетное положение датчика. Для определения начала отсчета применяют специальные схемные решения и дополнительные калибровочные датчики, например потенциометры, точные механические упоры с концевыми выключателями, риски и т.п. Основным показателем импульсных датчиков является разрешающая способность.

При выборе импульсного датчика необходимо учитывать предельную скорость вращения его вала и требуемую точность позиционирования выходного звена мехатронного модуля. Соединение валов импульсного датчика и мехатронного модуля производят с помощью специальных соединительных муфт или безлюфтового кинематического преобразователя движения.

Внешний вид фотоимпульсных датчиков для мехатронных модулей движения фирмы Maxon показан на рис. 3.12, а технические характеристики приведены в табл. 3.3.

### 3.3. Технические характеристики фотоп импульсных датчиков фирмы Maxon

Тип инкодера	225783	228452	225785	228456	225787
Число импульсов на 1 оборот вала	256	500	512	1000	1024
Число каналов	3	3	3	3	3
Максимальная частота следования импульсов, кГц	80	200	160	200	320

На рис. 3.13 приведена схема мехатронного модуля движения, разработанного совместно ЦНИИ автоматизации и гидравлики и МГТУ "СТАНКИН" [10].

Модуль состоит из трехфазного бесконтактного электродвигателя, шарико-винтового преобразователя движения, индуктивного датчика положения (ИДП) и направляющих.

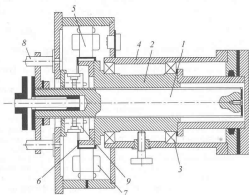


Рис. 3.13. Мехатронный модуль движения

Ротор 6 электродвигателя соединен с гайкой 2 шарико-винтового преобразователя движения, установленной на подшипниках 3 в корпусе 4. Токи, протекающие по фазным обмоткам 7 статора 5, приводят к появлению электромагнитного момента двигателя, вызывающего вращение гайки 2. При этом винт 1 совершает линейное перемещение вдоль направляющих 8. Для измерения перемещения винта 1 применен индуктивный датчик положения 9. Роль его подвижного элемента выполняет винт 1. Неподвижная часть 9 закреплена в корпусе 4 мехатронного модуля движения и частично помещена внутрь полого ротора 6 двигателя.

На роторе 6 электродвигателя размещено 20 высокоэффективных постоянных магнитов. На статоре 5, имеющем 24 паза, размещены фазные обмотки 7 якоря двигателя, а также трехфазные тахометрические обмотки, служащие для измерения скорости вращения ротора, и обмотки возбуждения датчика положения ротора (ДПР).

Исполнение ДПР имеет особенности, которые позволяют существенно упростить конструкцию и уменьшить объем мехатронного модуля движения. В отличие от применяемых обычно ДПР на базе датчиков Холла используемый в данном модуле ДПР не является самостоятельным конструктивным элементом, а представляет собой "невяное" устройство. Его функции реализуются с помощью нескольких элементов: тахометрических обмоток, обмоток возбуждения, находящихся в специально изготовленных отверстиях статора в непосредственной близости от тахометрических обмоток, и электронной аппаратуры мехатронного модуля движения.

Преимущество рассматриваемого "невяного" ДПР заключается в отсутствии необходимости его фазировки при настройке модуля, поскольку она обеспечивается конструкцией двигателя. Кроме того, такой ДПР подает сигналы положения ротора непрерывно, что позволяет без особых проблем формировать синусоидальные токи в фазных обмотках двигателя. Подобная возможность улучшает свойства мехатронного модуля в результате снижения пульсации момента двигателя.

Неподвижная часть индукционного датчика положения, внутри которой поступательно перемещается винт, имеет винтовую нарезку, аналогичную самому винту, и является, по сути, гайкой. Отличие состоит в том, что винт имеет левую резьбу, а гайка датчика – правую. Кроме того, для обеспечения свободного движения винта внутри ИДП внутренний диаметр гайки датчика должен быть несколько больше внешнего диаметра винта. Неподвижная часть ИДП состоит из двух полууглек, одна из которых развернута относительно другой на пол-оборота. Внутри нее размещены аксиальная обмотка возбуждения и намотанные в пазах выходные обмотки (синусная и косинусная обмотки датчика), каждая из кото-

рых имеет по четыре секции, включенные последовательно и попарно встречно. Магнитный поток, создаваемый переменным током, протекающим по обмоткам возбуждения, замыкается через первую полугайку, винт и вторую полугайку. При этом он пронизывает синусную и косинусную обмотки ИДП и индуцирует в них ЭДС. Выступы резьбы винта и гайки датчика играют роль полюсных наконечников.

При изменении положения винта в результате смещения витков резьбы винта относительно выступов резьбы гайки датчика по-разному меняются сопротивления магнитных цепей, обуславливающих формирование ЭДС, наводимых в выходных обмотках ИДП. В результате ЭДС в синусной и косинусной обмотках датчика имеют различные амплитуды, которые зависят от положения винта относительно неподвижной гайки.

Использование вентильных двигателей (ВМД) позволяет заменить традиционную пару двигатель-механический преобразователь одним высокомоментным двигателем, исключив таким образом избыточный преобразователь (п. 2.2). Пример мехатронного модуля движения на базе ВМД показан на рис. 3.14. ВМД применяется здесь для вращения поворотного стола, который предназначен для позиционирования деталей при обработке на фрезерных, сверлильных и расточных станках [12].

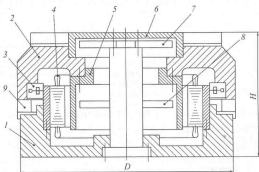


Рис. 3.14. Поворотный стол на базе высокомоментного двигателя:

- 1 – основание; 2 – поворотный стол; 3 – упорные подшипники;  
4 – электродвигатель; 5 – ротор; 6 – планшайба; 7 – датчик положения;  
8 – датчик скорости; 9 – гидротормоз

### 3.4. Основные технические характеристики безредукторных поворотных столов

Наименование	Модель				
	СП 200	СП 320	СП 630	СП 630В	СП 1000
Номинальный вращающий момент $T$ , Н·м	20	300	600	1500	2500
Максимальный вращающий момент $T$ , Н·м	40	600	1200	3000	5000
Внешний диаметр $D$ , мм	191	398	644	584	930
Высота $H$ , мм	170	240	250	200	280
Погрешность позиционирования $\delta$ , угл. с	3				

Модуль состоит из основания  $1$  и собственно поворотного стола  $2$ , опирающегося на упорные подшипники  $3$ , встроенного электродвигателя  $4$ , ротор  $5$  которого скреплен с планшайбой  $6$ , датчика положения  $7$ , датчика скорости  $8$  и гидротормоза  $9$ , обеспечивающего фиксацию планшайбы в нужном положении.

Безредукторное совмещение ротора электродвигателя и планшайбы позволяет полностью исключить люфт, увеличить точность позиционирования стола и расширить его технологические возможности. При этом упрощается конструкция стола, уменьшается число деталей, повышается жесткость. В табл. 3.6 приведены основные технические характеристики безредукторных поворотных столов [12].

### 3.3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕХАТРОННЫЕ МОДУЛИ

Интеллектуальные мехатронные модули (ИММ) являются третьим, принципиально новым поколением современных модулей движения (см. п. 1.2, 2.3). По сравнению с мехатронными модулями движения в конструкцию ИММ дополнительно встраиваются управляющие устройства и силовые электронные преобразователи, что придает им интеллектуальные свойства. Объединение производителем в едином модуле управляющих и электронных устройств, двигателя, механической и информационной частей освобождает пользователя от решения "проблемы интерфейсов" (п. 2.1).



Рис. 3.15. Типовая архитектура распределенной системы управления

Для работы с ИММ пользователю достаточно только связать мехатронные модули с центральным устройством управления через локальную сеть, в результате получается децентрализованная распределенная система управления, типовая архитектура которой представлена на рис. 3.15.

При этом расстояние между компьютером верхнего уровня управления и контроллерами интеллектуальных модулей может достигать нескольких сотен метров. Обмен информацией и управляющими командами между этими устройствами осуществляется через высокоскоростную компьютерную сеть.

Применение распределенных систем позволяет эффективно решить ряд проблем управления, характерных для мехатроники. К числу основных преимуществ систем данного типа следует отнести:

- отсутствие многочисленных соединительных кабелей и проводов, что особенно важно для многокоординатных мехатронных систем в первую очередь с точки зрения надежности, удобства наладки и эксплуатации машин;
- возможность применения современных вычислительных алгоритмов и методов управления движением (математические операции с плавающей точкой, обработка информации в реальном масштабе времени, интеллектуальные методы управления на основе нечеткой логики и т.д.);

- открытая архитектура придает системе управления высокую гибкость, возможность оперативно формировать законы управления в соответствии с требованиями технологического процесса, быстро реконфигурировать и расширять систему для решения новых функциональных задач;
- высокая надежность и робастность системы, диагностика работы в процессе выполнения операций.

Общий вид ИММ фирмы SIEMENS показан на рис. 1.33. Интеллектуальные мехатронные модули "Simordrive Posmo A" (см. рис. 1.33, а, б) состоят из следующих элементов:

- вентильного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов;
- планетарного (рис. 3.16, а) или червячного (рис. 3.16, б) преобразователя движения, который также может отсутствовать (рис. 3.16, в);
- тормозного устройства (устанавливается по желанию потребителя);
- встроенного фотопульсного датчика;
- силового преобразователя, который конструктивно закрепляется на крышке двигателя;
- комплектного управляющего устройства, включающего регулятор двигателя, блоки позиционирования и программирования, а также коммуникационный интерфейс для подключения к шине "PROFIBUS".

Отличительной особенностью конструкции является съемная крышка для подключения силового преобразователя, которая содержит интегрированный переключатель адреса шины "PROFIBUS" и тормозной резистор, что позволяет при необходимости отключить двигатель без разрыва коммуникационных и силовых (по питанию) связей в других устройствах. Благодаря объединению коммуникационной и силовой шин достигается упрощение внутренней структуры модуля и обеспечивается его компактность.

Управление модулем осуществляют по стандартной шине "PROFIBUS", при этом возможны следующие режимы движения:

- перемещение в конечную позицию с программно заданной скоростью и регулируемым ускорением;
- движение с регулируемой частотой вращения вала и регулируемым ускорением.

Оператор с помощью специального программного обеспечения может задавать в программе движения временные или логические условия, использовать методы компенсации зазора (люфта), получать сообщения о текущем положении и диагностике состояния модуля.

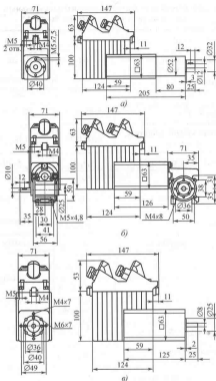


Рис. 3.16. Интеллектуальные мехатронные модули "Simordrive Posmo A":  
 а – с планетарным редуктором; б – с червячным редуктором; в – без редуктора



### 3.5. Технические характеристики интеллектуальных мехатронных модулей "Simordrive Posmo A"

Мощность модуля, Вт	75	300
Напряжение питания, В	24	48
Тип двигателя	Бесщеточный серводвигатель с возбуждением от постоянных магнитов	
Номинальная частота вращения вала двигателя, $\text{мин}^{-1}$	3300; 2000	3500; 3000
Номинальный момент двигателя, Н · м	0,18; 0,36	0,48; 0,95
Номинальный ток двигателя $I$ , А	4,5; 9	5; 10
КПД двигателя, %	65	75
Момент инерции двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$6 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$
Датчик обратной связи	Фотоимпульсный	Инкрементальный
Разрешение датчика, имп/об	816	4096
Масса модуля, кг:		
без редуктора	3,1	3,9 (4,0)
с 1-ступенчатым зубчатым редуктором	3,5	5,1 (5,2)
с 2-ступенчатым зубчатым редуктором	3,7	5,4 (5,5)
с 3-ступенчатым зубчатым редуктором	3,9	–
с червячным редуктором	3,5	–

Примечание. В скобках – масса модуля с тормозом.

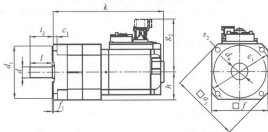


Рис. 3.17. Интеллектуальный мехатронный модуль "Simordrive Posmo SI"

Технические данные некоторых модулей "Simordrive Posmo A" приведены в табл. 3.5.

Интеллектуальный мехатронный модуль "Simordrive Posmo SI" фирмы SIEMENS (рис. 1.33, в, 3.17) предназначен для реализации движений по одной управляемой координате при децентрализованном управлении мехатронной системой.

В состав модуля входят:

- вентильный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов (напряжение питания 600 В);
- преобразователь движения и тормозное устройство;
- блок силовой электроники;
- встроенный фотодиодный датчик (ФДД);
- вентилятор для принудительного охлаждения;
- управляющее устройство, включающее управляющий контроллер, блоки позиционирования и программирования, а также коммуникационный интерфейс для шины "PROFIBUS".

Геометрические параметры и технические характеристики интеллектуального мехатронного модуля "Simordrive Posmo SI" приведены в табл. 3.6 и 3.7.

### 3.6. Геометрические параметры интеллектуального мехатронного модуля "Simordrive Posmo Si"

Тип модуля	$a_1$	$d_1$	$c_1$	$e_1$	$f$	$f_1$	$g_2$	
							интервал прямой	интервал угловой
6SN2460	155	110	10	130	126	3,5	179	174,8
6SN2480	186	130	13	165	155	3,5	193,5	198,3
6SN2500	240	180	13	215	192	4	194	189,8

*Продолжение табл. 3.6*

Тип модуля	$h$	$t_2$	$k$	$d$	$d_s$	$l$
6SN2460	63	50	349	24	M8	45
6SN2480	77,5	58	357	32	M12	50
6SN2500	96	80	379	38	M12	75

Функциональные возможности модуля:

- позиционирование по одной оси с возможностью свободного программирования последовательности движений;
- использование в качестве ведомого устройства (Slave) в сети "PROFIBUS-DP" с быстрым циклическим обменом данными с ведущим устройством (Master);
- интерполяционный вид движения совместно с другими приводами благодаря иерархической системе управления с контроллером движения и шиной "PROFIBUS-DP";
- встроенная система измерения абсолютных значений перемещений;
- быстрый ввод в эксплуатацию всех приводов на шине "PROFIBUS-DP" благодаря специальной программе SimoCom U, работающей под Windows 95/98/NT.

### 3.7. Технические характеристики интеллектуального мехатронного модуля "Simordrive Posmo SI"

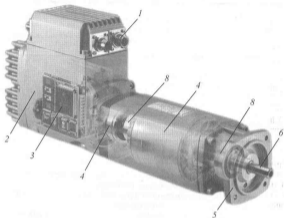
Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальный момент, Н · м	Момент инерции ротора без/с тормозом $J_{\text{р}}, \cdot 10^{-4}$ , кг · м <sup>2</sup>	Номинальный ток, А	Масса без тормоза/с тормозом, кг
1FK6	2,1	4,0	8,6/9,5	3	12,0/12,5
	3,7	6,0	16,1/17,0	5,2	16,3/16,8
	2,8	6,8	15,0/18,0	3,9	16,3/17,8
	5,3	10,5	27,3/30,3	7,4	21,0/22,5
	6	12	55,3/63,2	8,2	23,9/26,3

Примечание. Номинальная частота вращения 3000 мин<sup>-1</sup>, номинальное напряжение питания 600 В.

Фирма SIEMENS, производитель данных модулей, отмечает их следующие достоинства:

- минимизация затрат потребителя на стойку управления благодаря размещению модуля непосредственно в машине;
- быстрая установка машины благодаря установке модуля и объединению коммуникационных и силовых шин;
- непосредственное подключение сигналов с помощью 4 клемм, которые настраиваются как входы или выходы, установка модульной, удобной для использования штекерной техники и стандартных кабелей;
- вставляемая крышка подключений с интегрированным переключателем адреса "PROFIBUS-DP" позволяющая отключать модуль или приводной контур без прерывания других связей;
- быстрая диагностика благодаря светодиодам, показывающим неисправность и готовность к работе, а также передаче информации по шине "PROFIBUS-DP" и использованию специальной программы SimoCom U;
- быстрая замена модулей с помощью карты памяти (Memory Card).

Интеллектуальные мехатронные модули "Milan Drive AUMA" (рис. 3.18) применяются для децентрализованных систем автоматизации технологических процессов в различных отраслях производства. В едином корпусе данного модуля конструктивно объединены электродвигатель, электронные и информационные компоненты, а также все интерфейсные блоки, необходимые для создания распределенной мехатронной системы.



**Рис. 3.18. Интеллектуальный мехатронный модуль  
"Milan Drive AUMA":**

- 1 – блок электрических соединений; 2 – силовой электронный преобразователь; 3 – управляющий контроллер; 4 – датчик обратной связи; 5 – присоединительный фланец; 6 – выходной вал модуля; 7 – электродвигатель; 8 – подшипник вала двигателя

Блок электрических соединений содержит четыре разъема, которые обеспечивают соединение модуля с источником питания, общей компьютерной шиной, блоком дискретных входов-выходов и интерфейсов типа RS-232. Возможно соединение по общей шине как типа "PROFIBUS-DP", так и по шине "CAN-Open". Программное обеспечение контроллера позволяет выполнять как стандартные команды (типа "старт-стоп"), так и программируемые движения по заданным во времени сложным законам изменения скорости вращения выходного вала.

### 3.8. Технические характеристики интеллектуальных мехатронных модулей "Milan Drive AUMA"

Тип модуля	MI 1.5/075	MI 2/090	MI 4/110
Номинальный момент, Н·м	1,5	2,0	4,0
Максимальный момент, Н·м	3,0	5,0	9,0
Номинальная скорость, мин <sup>-1</sup>	6000	3000	3000
Длина модуля (без тормозного устройства), мм	346	384	398
Высота, мм	165	210	210
Ширина, мм	75	110	110

В качестве датчика обратной связи используется вращающийся трансформатор с разрешающей способностью 4096 имп/об. Модуль оснащен двигателями синхронного типа с номинальным моментом до 4 Н·м и максимальной скоростью вращения до 6000 мин<sup>-1</sup>. Отдельные модификации мехатронного модуля содержат также встроенное тормозное устройство.

Технические характеристики интеллектуальных мехатронных модулей "Milan Drive AUMA" для трех основных типоразмеров представлены в табл. 3.8.

## Глава 4

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

---

### 4.1. МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ ИНСПЕКЦИИ И РЕМОНТА ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Проблема эксплуатации и ремонта трубопроводов актуальна для нефте- и газопроводов, водопроводных и канализационных сетей (особенно крупных городов), каналов водосброса и водосабора. Применение мобильных роботов для телеинспекции и обслуживания магистралей позволяет предупреждать техногенные и экологические аварии и катастрофы (а не подсчитывать многомиллионный ущерб и описывать безвозвратные утраты в природе, чем зачастую заняты экологические службы) и внедрять бестраншейные методы ремонта.

Роботизация позволяет также осуществлять санацию ветхих магистралей, приемку новых трубопроводов, экологический мониторинг и контроль состояния действующих сетей, составлять карты подземных коммуникаций. Применение мобильных технологических роботов для инспекции и ремонта подземных трубопроводов является ярким примером выполнения мехатронной системой принципиально новых служебных функций.

Ведущим отечественным разработчиком и производителем инспекционных роботов для трубопроводов является НПО "Тарис" (Москва). При равном уровне качества цена мобильных роботов фирмы "Тарис" на 15...20 % ниже импортных аналогов, при этом очевидны выгоды в гарантийном и сервисном обслуживании техники на территории России и СНГ. По имеющимся оценкам годовой экономический эффект от применения инспекционных роботов приблизительно в 2 раза превосходит их стоимость. Схемы роботизированных операций в трубопроводе показаны на рис. 1.1, 1.2.

Общий вид инспекционных и технологических роботов фирмы "Тарис", которые в настоящее время применяются муниципальными службами Москвы, показан на рис. 4.1.

Осмотровый робот Р-200 предназначен для телеинспекции трубопроводов диаметром 150...1200 мм. Этот мобильный робот имеет набор сменных колес и цветную поворотную телекамеру. Управляется робот дистанционно оператором с поста управления, размещенного в автомо-

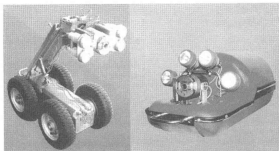


Рис. 4.1. Общий вид мобильных роботов фирмы "Тарис"

биле (длина кабеля до 200 м). Пост управления имеет цветной монитор и цифровую систему документирования на базе компьютера в промышленном исполнении. Телекамера оснащена устройством наведения (механизмы качания, ротации и подъема) для осмотра стенок трубы, блоками основного и дополнительного освещения, электромеханическим стеклочистителем, а также дистанционным приводом фокусировки.

Робот имеет герметичное исполнение, способен работать с погружением в воду, корпус накачивается азотом для предотвращения конденсации влаги внутри него и запотевания стекол телекамеры. Приводы перемещения представляют собой мехатронные модули типа "мотор-колесо" на базе двигателей постоянного тока. Помимо системы технического зрения робот оснащен датчиками пути, углов крена и дифферента корпуса, а также датчиками углов ориентации телекамеры. Эти сенсоры необходимы не только для управления движением робота, но и для трассировки залегания трубопровода, дают информацию о профиле трубы и координатах дефекта (свища, трещины) или обнаруженного постороннего предмета.

Мобильные роботы НИО "Тарис" позволяют не только обнаружить, но и устранить целый ряд дефектов. Одним из эффективных методов ремонта труб является бандажирование (рис. 4.2).



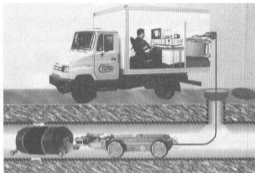


Рис. 4.2. Мобильный робот с бандажным устройством фирмы "Тарис"

Устанавливаемый бандаж состоит из металлической обечайки и слоя ткани, пропитанной полимером. Под действием давления, подаваемого по шлангам, пакер раздувается и прижимает обечайку с полимером к стенкам трубы. Применяются обечайки, изготовленные из коррозионно-стойкой или углеродистой стали. Вместо ткани с полимером в качестве материала для герметизации дефекта может применяться слой резины.

В состав мобильного робототехнического комплекса С-200 (рис. 4.3) входят: технологический робот, кабельный барабан, рабочая станция с системой технического зрения, пост управления оператора.

Робот комплектуется сменными рабочими органами – фрезерными и инструментальными головками для выполнения ремонтных операций внутри трубы. Рабочие органы предназначены для локальной зачистки поверхностей, сверления, подрезки выступающих элементов (наплывов, гратов на сварных швах, штырей), прорезки боковых отводов после санации трубы пластиком.

Стрелками на рис. 4.3 обозначены основные движения данной мехатронной системы: *A* – перемещение робота за счет колесного привода (скорость 0...0,2 м/с); *B* – выдвижение упора (сила 500 Н); *C* – выдвижение рабочего органа (ход 100 мм, сила 500 Н); *D* – поперечная пода-

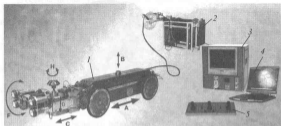


Рис. 4.3. Мобильный робототехнический комплекс С-200 фирмы "Тарис":  
 1 – робот; 2 – кабельный барабан; 3 – рабочая станция СD3;  
 4 – пост управления; 5 – пульт управления

ча инструментальной головки (ход 50 мм, сила 500 Н); *E* – ротация рабочего органа (угол  $\pm 180^\circ$ , момент 50 Н·м); *F* – качание видеокамеры (угол качания  $\pm 140^\circ$ ); *G* – перемещения стеклоочистителя видеокамеры; *H* – вращение инструментальной головки.

Перспективы развития мобильной робототехники связаны с интеллектуализацией устройств управления и сенсоров, что позволяет повысить качество проводимых операций и автономность их выполнения. Автоматическое принятие решений роботом (без непосредственного участия человека-оператора) целесообразно здесь на следующих операциях:

- автоматическое обнаружение и распознавание посторонних объектов в трубопроводе с использованием системы технического зрения и локационных датчиков;
- планирование траектории и скорости движения при прохождении поворотов на базе сигналов от датчика крена-дифферента и фотонимпульсных датчиков скорости;
- управление режимами работы инструментальной головки на основании информации о действующих силах и моментах при выполнении операций механообработки (зачистка внутренней поверхности трубы или сварных швов, обрезка выступающих внутрь трубы штырей и т.п.);
- диагностика состояния внутренней поверхности трубы и дефектоскопия сварных швов;

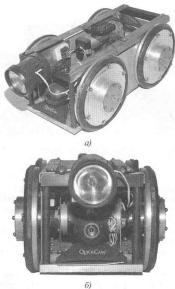


Рис. 4.4. Прототип мобильного робота "ИРИС-1":  
а – общий вид; б – вид спереди

– вскрытие боковых отводов в новой пластиковой трубе после процедуры релайнинга.

На кафедре робототехники и мехатроники МГТУ "СТАНКИН" был создан прототип мобильного робота "ИРИС-1". Значительная часть работ была выполнена в рамках проекта международного сотрудничества "Computer Aided Mobile Robotics for Severe Environmental Applications" при поддержке Королевского Общества (Великобритания). Участниками проекта являлись МГТУ "СТАНКИН" и Де Монфортский университет (Великобритания) [19].

Усовершенствование робота имело следующие цели:

- исследование новых методик для автономной навигации мобильных роботов;
- экспериментальное изучение влияния новых конструктивных решений, примененных в прототипе;
- тестирование различных сенсоров для распознавания окружающей среды;
- тестирование мультисенсорной технологии инспекции окружающей среды;
- создание прототипа для дальнейшего развития лабораторного оборудования.

Прототип мобильного робота с компьютерным управлением на основе двигателя постоянного тока состоит из базового, сенсорного, транспортного, электронно-коммуникационного, силового модулей и модуля управления (рис. 4.4).

Базовый модуль состоит из жесткой несущей рамы с множеством отверстий для варьруемого крепления сенсоров и транспортного модуля. Также на базовый модуль установлены две клеммные колодки для крепления силовых и информационных кабелей.

Сенсорный модуль (табл. 4.1) включает ультразвуковые и фотопульсные датчики, микроволновый датчик, видеокамеру, набор двумерных акселерометров. Для эффективного функционирования видеокамеры внутри трубы на роботе имеется источник дополнительного освещения.

#### 4.1. Сенсоры, используемые в прототипе мобильного робота

Тип сенсора	Функциональное описание
Акселерометры	Двухкоординатные акселерометры "Analogue Device ADXL205" для определения фактических параметров движения мобильного робота при его транспортной навигации
Фотопульсные датчики	Фотопульсные датчики "ЛИР-21" с разрешающей способностью 1000 имп/об для измерения параметров движения

*Продолжение табл. 4.1*

Тип сенсора	Функциональное описание
Ультразвуковые датчики	Однозонные релейные ультразвуковые датчики "Sigio" для определения дефектов трубы и обнаружения препятствий
Микроволновой датчик	Однозонный релейный микроволновой датчик "Falcon MWS-1" для определения дефектов трубы и обнаружения препятствий
Видеокамера	Видеокамера "Logitech" для изучения внутреннего состояния трубы и ее конфигурации. Может работать как в непрерывном, так и в дискретном режимах

Транспортный модуль состоит из двух мотор-редукторов (двигателей постоянного тока с встроенными червячными передачами). Робот имеет четыре колеса. Два задних колеса являются ведущими, к ним прилагается сепаратный крутящий момент от мотор-редукторов. Передние колеса – ведомые и соединены с фотопульсными датчиками. Все колеса опираются на подшипники качения и снабжены специализированными шинами (производство НПО "ТАРИС", Москва) для обеспечения высоких сцепных свойств внутри труб.

Электронно-коммуникационный и силовой модуль состоит из платы ЦАП-АЦП (производство L-Card, Россия) и силового блока для подачи управляющих сигналов на электродвигатели с обратной связью. Длина коммуникационных кабелей составляет 5 м. Кабель состоит из 16 проводов для передачи информационных и силовых сигналов.

Управляющий модуль состоит из управляющего компьютера (Pentium II-350) с программным обеспечением и служит для обработки информации, поступающей с датчиков, установленных на мобильном роботе.

На базе мобильного робота "ИРИС-1" на кафедре "Робототехника и мехатроника" МГТУ "СТАНКИН" была создана система дистанционного управления мобильным роботом с использованием сети Интернет. Применение сетевых технологий для решения задач дистанционного управления позволяет использовать такие преимущества глобальной сети Интернет, как широкая распространенность и доступность, возможность организации доступа широкого круга специалистов и студентов к уникальному дорогостоящему оборудованию. Описание этой системы дано в следующей главе.

## 4.2. МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

### 4.2.1. Робототехнологический комплекс механообработки

В настоящее время для механообработки деталей сложной формы в основном применяются многокоординатные станки и обрабатывающие центры с ЧПУ. Однако существует ряд операций сложной фасонной обработки со сниженными требованиями к точности, где применение такого дорогостоящего оборудования становится нецелесообразным. На таких операциях рационально применять технологические роботы. Это обусловлено тем, что манипуляторы обладают развитой кинематической структурой, что позволяет выполнять механообработку сложных деталей за один установ, повышая таким образом производительность робототехнологического комплекса (РТК). Также имеется возможность использовать робот не только на основных технологических операциях, но и одновременно в качестве измерительной машины или загрузочного устройства.

Робототехнологический комплекс предназначен для выполнения операций механообработки деталей из пластмасс и легких сплавов. К числу типичных операций относятся зачистка заусенцев, снятие облоя, шлифование контуров и поверхностей, сверление отверстий, снятие фасок. РТК разработан в рамках программы научно-технического сотрудничества между МГТУ "СТАНКИН" и Будапештским техническим университетом. В состав РТК входят (рис. 4.5):

- промышленный робот РМ-01, включающий манипулятор "PUMA-560" и устройство управления "Сфера-36";
- компьютер верхнего уровня типа IBM PC;
- блок пневмоэлектроаппаратуры;
- сменные рабочие органы (схваты, инструментальные головки) и комплект режущего инструмента (фрезы, напильники, металлические щетки) для обработки деталей, закрепленных на технологическом столе;
- устройство силомоментного оучувствления с блоком ввода аналоговых сигналов в устройство управления и многофункциональный адаптер ввода-вывода сигналов в компьютер.

Для выполнения на РТК технологических производственных процессов возможно включение в его состав роликового транспортера и механизма подачи палет с заготовками, а также поворотного стола с фиксаторами. Технологическое оборудование РТК обеспечивается пневмопитанием под давлением 0,5 МПа. В качестве рабочего органа используется специальная пневмоголовка (производства фирмы Nokia, Финляндия), которая крепится к наружному фланцу силомоментного датчика (рис. 4.6).

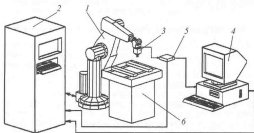


Рис. 4.5. Робототехнологический комплекс механообработки на базе робота РМ-01:

- 1 – манипулятор "PUMA-560"; 2 – устройство управления "Сфера-36";  
 3 – рабочий орган; 4 – компьютер верхнего уровня управления; 5 – устройство силомоментного чувствления; 6 – технологический стол



Рис. 4.6. Рабочий орган робота с силомоментным датчиком

Основные технические характеристики пневмоголовки: мощность 160 Вт, частота вращения выходного вала  $28\,000\text{ мин}^{-1}$ , масса 1,5 кг.

Электромеханический манипулятор "PUMA-560" (см. рис. 1.13) антропоморфного типа имеет 6 вращательных степеней подвижности. Грузоподъемность робота 2,5 кг, точность позиционирования 0,1 мм.

Устройство управления "Сфера" предназначено для позиционного и контурного управления движениями манипулятора. Система является многопроцессорной и двухуровневой: она содержит центральный процессор и шесть процессоров приводов. Модули устройства имеют унифицированные шины внутренней связи (типа Q-BUS) и стандартный интерфейс связи с технологическим оборудованием. Устройство силомоментного очувствления (УСМО) состоит из двух функциональных модулей: датчика силы и блока обработки силомоментной информации. Датчик силы конструктивно выполнен в виде плоских крестообразных пластин, на грани которых наклеены тензорезисторы. Конструкция датчика предусматривает измерение трех компонент вектора силы, действующей на рабочий орган робота: силы, перпендикулярной фланцу датчика силы ( $F_z$ ), и двух моментов в плоскости фланца ( $M_x$  и  $M_y$ ). В качестве чувствительных элементов используются фольговые тензорезисторы типа КФ 5П1-3200-А12. Датчик изготовлен из алюминиевого сплава Д16-Т, обладающего высоким значением модуля Юнга и малой удельной массой.

Блок обработки силомоментной информации предназначен для преобразования сигналов с тензоусилителя в три информационных сигнала о векторе сил, действующем на рабочий орган. Блок выполнен в виде отдельной платы и установлен в корпусе тензоусилителя.

Технические характеристики устройства силомоментного очувствления:

- число измеряемых компонент вектора сил – 3 (осевая нагрузка до 50 Н; поперечные силы по осям  $X$  и  $Y$  до 25 Н на плече 0,12 м);
- диапазон выходных сигналов для ввода в компьютер от  $-5$  В до  $+5$  В, для ввода в "Сферу-36" –  $0 \dots 5$  В;
- погрешность выходного сигнала не более 2 % номинала.

При управлении роботом на операциях механообработки основная функция компьютера состоит в обработке сигналов от датчика силомоментного очувствления и выработке сигналов коррекции движения. Если датчик сил и моментов содержит встроенный микропроцессор, то организация обмена информацией с компьютером не представляет труда. В противном случае необходимо использовать многофункциональный адаптер (МА), который осуществляет согласование аналоговых и цифровых сигналов с системной шиной компьютера.



Адаптер содержит следующие функциональные узлы: аналого-цифровой преобразователь с коммутатором на входе, цифро-аналоговый преобразователь, устройство параллельного ввода-вывода и таймер. Серийный комплект устройства управления "Сфера-36" не имеет возможности ввода и обработки аналоговой информации, поэтому на базе стандартного модуля аналогового ввода (МAB) этой стойки управления был реализован контроллер ввода аналоговых сигналов с силомоментного датчика. Шесть каналов модуля МAB служат для ввода сигналов с потенциометрических датчиков, расположенных в степенях подвижности манипулятора. Оставшиеся два канала АЦП, которые в штатном режиме используются для тестирования системы, переведены в режим связи с внешними генераторами сигналов. Связь между устройством управления "Сфера" и компьютером обеспечивается специальными драйверами.

Программирование движений технологического робота проводится с помощью специально разработанного комплекса подготовки управляющих программ (рис. 4.7). Таким образом, данный робототехнологический комплекс механообработки реализует современную концепцию построения производственных систем типа CAD/CAM, когда автоматизированное проектирование изделия и его автоматическое изготовление интегрированы в единую систему и задача пользователя состоит только в подготовке исходной компьютерной модели детали [92]. Данный подход имеет следующие основные преимущества:

- сокращается время на переналадку робота по сравнению с режимом обучения;
- используется единая среда программирования, если возможно программировать несколько роботов на одном рабочем месте;
- обеспечивается предварительная проверка логики работы робота, анализ его поведения в аварийных и нештатных ситуациях;
- человек-оператор выводится из потенциально опасной рабочей зоны;
- система программирования робота интегрируется с базами данных САПР;
- за счет применения языков высокого уровня становится возможным составление сложно структурированных программ, оптимизация движений робота по различным критериям.

В состав разработанной системы автоматизированного программирования входят четыре основные компонента: подсистема геометрического моделирования, подсистема моделирования динамической системы робот-рабочий орган-инструмент-рабочий процесс, подсистема про-



Рис. 4.7. Система автоматизированного программирования движений технологического робота

граммирования и оптимизации траекторий движения технологического робота, база данных технологических элементов.

Для начала выполнения программы необходимо выполнить привязку системы координат, задав в режиме дистанционного обучения исход-

ную точку в рабочей зоне робота. Затем происходит автоматическое выполнение функционального движения, при этом сила резания поддерживается на заданном уровне за счет регулирования контурной скорости рабочего органа (подробно алгоритмы управления рассмотрен в гл. 5).

#### 4.2.2. Мехатронный обрабатывающий центр MS 630

Мехатронный обрабатывающий центр MS 630 предназначен для высокоскоростной пятикоординатной обработки изделий со сложными пространственными формами [15]. Центр разработан в ОКБС и изготовлен на станкозаводе "Свердлов" (Санкт-Петербург).

Компоновка машины построена по блочно-модульному принципу на базе мехатронных модулей движения. В состав центра входят шесть мехатронных модулей движения (ММД): четыре низкооборотных ММД для перемещения шпиндельной бабки и обрабатываемого изделия, один высокоскоростной модуль типа "мотор-шпиндель" и мехатронный модуль линейного выдвижения шпинделя.

#### Технические характеристики центра MS 630

Число одновременно управляемых координат .....	5
Габариты (без дополнительного оборудования), мм .....	3020 × 1650 × 2500
Максимальные размеры обрабатываемого изделия, мм .....	500 × 500 × 400
Рабочая поверхность стола, мм .....	630
Точность позиционирования мехатронных модулей:	
вращательные модули, угл. с .....	2,0
линейный модуль, мкм .....	3,0
Грузоподъемность поворотного стола, кг	500
Скорость быстрого перемещения:	
вдоль оси шпинделя, мм/мин .....	20 000
поворотного стола, мин <sup>-1</sup> .....	18
Скорость вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup> .....	200...24 000
Мощность главного привода, кВт .....	20
Момент привода поворота стола, Н · м ....	1200
Инструментальный магазин, позиция .....	12

### 4.2.3. Мехатронная установка для контроля резьб нефтяного сортамента "Микрон-2"

Разработчиком и производителем установки для контроля резьб нефтяного сортамента является фирма ООО "ИнСис Лтд" (рис. 4.8). Установка предназначена для автоматизации контроля наружных и внутренних резьб нефтяного сортамента в цеховых условиях. Автоматизация контроля резьб на трубных базах обеспечивает значительное повышение надежности и уменьшение брака при бурении и капитальном ремонте скважин.

В состав установки входят измерительный блок со сменной перископической насадкой и блок управления на базе промышленного компьютера. Возможны стационарный и портативный варианты исполнения.

Основные преимущества мехатронной установки "Микрон-2":

- универсальность установки для контроля различных типов внутренних и наружных резьб;
- бесконтактный метод измерений и полная замена ручного контроля калибрами;
- 100%-ный контроль каждой трубы или муфты непосредственно на линии производства или ремонта;
- контроль всех параметров резьбы по ГОСТу, высокая точность и повторяемость результатов;
- возможность измерения толщины стенки под резьбой и внутренней фаски;

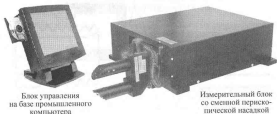


Рис. 4.8. Мехатронная установка контроля резьб нефтяного сортамента "Микрон-2"

- высокая надежность, отсутствие специальных требований к обслуживающему персоналу;
- отсутствие особых требований к базированию труб на позиции контроля;
- малые габариты и масса;
- сохранение результатов измерений в базе данных и отображение в виде графических и текстовых протоколов с возможностью распечатки;
- связь установки с АСУ производства для паспортизации труб.

Принцип работы основан на коноскопической профилометрии, т.е. бесконтактном измерении геометрии резьбы лазерным сканированием заданного количества сечений (рис. 4.9). Применяемая технология измерений обеспечивает высокую степень инвариантности к состоянию поверхности резьбы и позволяет использовать один лазерный микрометр для контроля различных типоразмеров с помощью сменных перископических насадок.

Сканирование отдельных профилей резьбы осуществляется мехатронным модулем на базе линейного двигателя со статором из редкоземельных магнитов, который реализует поступательное перемещение оптоэлектронного блока вдоль оси трубы. Привод вращения перископической насадки обеспечивает сканирование нескольких полных сечений резьбы контролируемого изделия. Уникальная технология "вращающегося лазерного луча" обеспечивает контроль и компенсацию погрешностей базирования, возникающих при установке труб/муфт на позиции контроля, а также позволяет контролировать толщину стенки под резьбой и внутреннюю фаску.

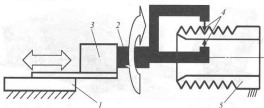


Рис. 4.9. Схема работы мехатронной установки:

- 1 — линейный двигатель; 2 — привод вращения перископической насадки;  
3 — лазерный микрометр; 4 — луч лазера; 5 — контролируемое изделие

Специализированное программное обеспечение использует полученные данные для дифференцированного поэлементного контроля отдельных параметров резьбы. По результатам измерений автоматически определяется соответствие резьбы требованиям ГОСТа и ее пригодность для последующего применения. Установка может работать как автономно, так и в составе АСУ производства с выдачей полученных результатов измерений и служебных сигналов в цифровой форме. Основными контролируемыми параметрами являются: шаг и длина резьбы, высота профиля, угол наклона стороны профиля, радиус закругления вершины и впадины профиля, конусность, диаметры и длина резьбы, толщина стенки под резьбой.

#### Основные технические характеристики установки

Разрешающая способность измерений, мкм .....	1
Погрешность измерений, мкм .....	15
Время контроля одной трубы, с, не более .....	90
Условия эксплуатации .....	Цеховые
Требования к базированию труб:	
точность позиционирования по продольной оси, мм .....	$\pm 2,0$
точность позиционирования торца, мм .....	$\pm 5,0$

Предварительно на поверхность резьбы должен быть нанесен слой мелкодисперсного талька методом напыления.

### 4.3. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МАШИНЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ И ГИБРИДНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

Как было показано в гл. 1, именно принципы и методы мехатроники являются фундаментальной и практической базой для проектирования и внедрения машин с параллельной и гибридной кинематикой. Построение машин этого класса основано на использовании трех методов интеграции, описанных в гл. 2. Благодаря появлению высокопроизводительных компьютеров и интеллектуальных мехатронных модулей стало возможным управление движением машин с нелинейной структурой в реальном масштабе времени. Мехатронный подход к интеграции прецизионной механики с микрoeлектронными, вычислительными и сенсорными устройствами делает перспективным создание и внедрение машин с параллельной и гибридной кинематикой в различных отраслях промышленности.

### 4.3.1. Мехатронный центр "ТЕКСАМEX-1" для аэрокосмической промышленности

В сентябре 2003 года мехатронный центр "ТЕКСАМEX-1" был представлен на международной промышленной выставке в Москве [60]. Центр разработан специалистами ряда российских научно-исследовательских институтов: Национального института авиационных технологий (НИАТ), Новосибирского государственного технического университета, компании "Сибирь – Мехатроника" и других организаций. Производитель машины – Савеловский машиностроительный завод.

Общий вид центра показан на рис. 4.10.

Центр предназначен для механообработки длинномерных (до 3 м) изделий в авиакосмической промышленности. Для этого в состав машины входит рабочий стол с линейным перемещением. Гексапод, имеющий шесть управляемых стержней, установлен на стальном восьмиугольном основании. Подвижная платформа, несущая шпиндель, изготовлена из сплава на основе титана и укреплена стальными секциями. Оптимизация конструкции мехатронной машины выполнена с помощью специальных программ, разработанных компанией "Сибирь – Мехатроника". Инструментальный магазин имеет 24 позиции.

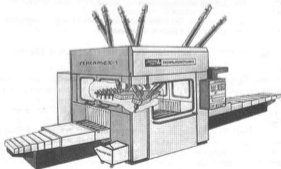


Рис. 4.10. Мехатронный центр "ТЕКСАМEX-1"

**Основные технические характеристики гексапода**

Рабочая зона, мм .....	3000×800×700
Ориентация рабочего органа, °:	
относительно оси В .....	± 30
относительно оси А .....	± 25
по обеим осям в центре рабочей зоны ...	± 45
Мощность шпинделя, кВт .....	30
Максимальная скорость вращения, мин <sup>-1</sup> .....	30 000
Максимальная скорость перемещения, м/мин	30
Максимальное ускорение .....	1g
Точность перемещения (на расстоянии 1000 мм), мкм .....	100

Машина оснащена системой ЧПУ PA 8000 NT HS фирмы Power Automaton GmbH, которая имеет открытую архитектуру. Для исключения особых и недопустимых конфигураций и движений гексапода был разработан специальный программный модуль. Этот модуль контролирует предельные значения скорости и ускорения в приводах, исключает возможность достижения границ рабочей зоны линейными или ориентирующими степенями подвижности. Все опасные ситуации визуализируются на дисплее системы управления.

**4.3.2. Технологические и координатно-измерительные мехатронные машины фирмы "ЛАПИК"**

Примером отечественной технологической машины-гексапода является прецизионное оборудование, предлагаемое ЗАО "ЛАПИК" (Саратов). Фирма выпускает на единой конструктивной базе гексаподы двух типов: координатно-измерительные машины (КИМ) и технологические модули (ТМ) для механообработки.

Сочетание функций обрабатывающего центра и КИМ дает возможность:

- точно "координировать" новые участки к уже готовым поверхностям;
- корректировать траектории движения инструмента с учетом деформации обрабатываемой детали (это особенно важно при обработке длинномерных изделий повышенной точности);
- аттестовывать и при необходимости дорабатывать изделия на одном рабочем месте.



Технологические модули предназначены для фасонной обработки изделий с высокой точностью методами фрезерования, шлифования, сверления, полирования, а также для выполнения операций гравировки, растачивания, разметки. Рабочая зона гексаподов варьируется у различных моделей в диапазонах: по оси  $X$  – 500...3000 мм, по оси  $Y$  – 400...1400 мм, по оси  $Z$  – 350...750 мм. Максимальный угол поворота подвижной платформы относительно каждой из осей составляет в 45...60°, скорость ее движения задается программно в интервале 0,01...160 мм/с. Технологические машины оснащаются мехатронными модулями типа "мотор-шпиндель" мощностью от 1,5...7,5 кВт с регулируемой частотой вращения в диапазоне 400...24 000 мин<sup>-1</sup>.

КИМ выполняют автоматические измерения и контроль размеров деталей (в том числе легкодеформируемых изделий) от конструкторских или технологических баз. Погрешность объемных измерений для КИМ-500 (машина базового исполнения) не превышает 3,8 мкм для измеряемого размера  $L = 300$  мм. В машинах специального прецизионного исполнения этот показатель достигает значения 1,1 мкм. Измерения выполняются с помощью специальной головки-щупа, оснащенной датчиками механического или токового касания. Контактное усилие при токовом касании не превышает 0,0003 Н, что позволяет измерять податливые и мелкоструктурные детали. Погрешность позиционирования рабочего органа для технологических машин типа ТМ составляет 5,0 мкм (на перемещениях на расстояние до 300 мм).

### 4.3.3. Мехатронный робот-станок "РОСТ 300"

Мехатронный робот-станок предназначен для финишной обработки: пера лопаток газовых и паровых турбин, энергетических станций и установок, газотурбинных двигателей, лопастей водяных турбин, гребных винтов различного назначения [4]. Схема станка представлена на рис. 4.11. Создание этой мехатронной машины вызвано необходимостью стабилизации геометрических параметров и качества поверхности лопаток, определяющих вибрационные и шумовые характеристики турбоагрегатов, а также автоматизировать тяжелые и вредные для здоровья человека технологические операции.

Машина имеет нелинейную компоновку, отличием которой является отсутствие традиционных прямолинейных направляющих (см. п. 1.1). Все формообразующие движения реализуются мехатронными модулями вращательного типа. Мехатронные модули построены на базе высокомоментных двигателей серии ТМА швейцарской фирмы ETEL S.A., кото-

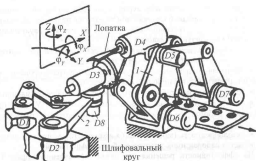


Рис. 4.11. Схема робота-станка "РОСТ 300" (ИМАШ РАН, ОАО "Микрол")

рые встроены в конструкцию машины. Станок оснащен цифровыми сервоприводами "Indramat DIAХ04" и устройством числового программного управления серии PA8000NT фирмы Power Automation AG. Оптико-электронная измерительная система позволяет осуществлять контроль обрабатываемой поверхности заготовки с целью привязки к базовым поверхностям станка и задания оптимальных режимов обработки.

#### Технические характеристики робота-станка "РОСТ 300"

Число одновременно управляемых координат .....	6
Масса машины, кг .....	2500
Максимальные размеры обрабатываемого изделия, мм .....	150 × 40 × 80
Диаметр шлифовального круга, мм .....	30...80
Точность контурной обработки, мм .....	0,025
Пределы рабочих подач по осям, мм <sup>-1</sup> .....	120...2000
Скорость быстрого перемещения, мм/мин .....	24 000
Скорость вращения шлифовального электрошпинделя, мин <sup>-1</sup> .....	6000...24 000

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

- 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.

## Глава 5

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

---

Современное поколение мехатронных машин и систем, предназначенных для выполнения новых служебных и функциональных задач, отличается рядом характерных особенностей. К ним относятся: нелинейность кинематической структуры, выполнение движений по криволинейным траекториям в пространстве и сложные законы перемещения во времени, функционирование в изменяющихся и неопределенных внешних средах.

Проблематика построения математических моделей мехатронных машин определяется следующими основными положениями.

### *А. Многомерность системы.*

В мехатронных системах нового поколения наиболее распространены универсальные механизмы, которые обеспечивают управляемое перемещение по шести степеням подвижности (см. п. 1.2). Однако все чаще находят применение кинематические структуры с избыточностью для выполнения операций в средах с препятствиями либо в реконфигурируемых системах.

### *Б. Взаимосвязанность движений звеньев.*

Многосвязность системы означает, что движение каждого звена кинематически и динамически влияет на движение остальных звеньев. Данное взаимовлияние происходит через механическое устройство, объект работ и источник энергии. К тому же для многих технологических задач параметры внешних воздействий, приложенных к рабочему органу, заранее не определены.

### *В. Нелинейность координатного базиса.*

Опыт применения производственных и специальных машин с гибридной и параллельной кинематикой (см. пп. 1.1, 1.3) выявил существенные трудности, которые возникают у инженерно-технического персонала при их установке, программировании и обслуживании. Переменность параметров в нелинейных уравнениях может приводить к потере управляемости системой в особых (сингулярных) конфигурациях. С точки зрения пользователя, наибольшую проблему представляют трансформации

движений рабочего органа из обобщенной системы координат в декартовую систему. Задача управления машиной состоит в исполнении желаемого движения рабочего органа, который целенаправленно действует на объект работ, испытывая при этом со стороны внешней среды возмущающее воздействие. Движение рабочего органа как конечного звена мехатронной машины обеспечивается взаимосвязанными перемещениями исполнительных приводов и звеньев механического устройства.

#### *Г. Неоднородность и анизотропия свойств машины.*

Мехатронные машины с нелинейным координатным базисом отличаются неоднородностью характеристик (кинематических, скоростных, динамических, упругих) в рабочей зоне. Это означает, что, например, желаемая скорость рабочего органа может быть достигнута только в ограниченной области рабочего пространства. Если объект работ расположен вне этой области, то машина не может выполнить заданную технологическую операцию. Различные свойства могут проявляться не только в разных точках рабочей зоны, но и в разных направлениях (анизотропия свойств). Анизотропия накладывает существенные ограничения на взаимное расположение рабочего органа и объекта работ, например на сборочных операциях, где требуется приложить вектор силы в заданном направлении.

#### *Д. Необходимость решения задачи управления в пространстве и во времени.*

Программа движения мехатронных систем предусматривает выполнение функциональных движений машиной в пространстве и во времени. Необходимо рассчитать и оптимизировать траектории движения всех звеньев в обобщенных координатах и рабочего органа – в декартовом пространстве. Для выполнения программы движения во времени должны быть определены и реализованы желаемые скорости, ускорения и развиваемые усилия для всех исполнительных приводов системы.

Характерной особенностью мехатронных систем является возможность разделения задач управления движением на пространственную и временную. Это означает, что траектория перемещения рабочего органа в пространстве и его контурная скорость могут планироваться раздельно и с использованием различных критериев оптимизации. Например, для робототехнологического комплекса механообработки (п. 4.2), программа перемещения и ориентации инструмента в пространстве определяется по геометрической модели обрабатываемой детали. Скорость движения ра-

бочего органа робота вдоль траектории должна быть выбрана с учетом специфики рабочего процесса: размеров и твердости материала заготовки, типа инструмента, а также технических возможностей приводов инструментальной головки и манипулятора.

Перечисленные особенности мехатронных машин обуславливают сложность построения их адекватных и при этом наглядных и удобных для синтеза управления математических моделей.

## 5.1. ТЕНЗОРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОЗВЕННЫХ МАШИН

Тензорное исчисление очень удобно для изучения сложных многомерных объектов, поскольку оно имеет дело со свойствами, которые не зависят от выбора координатной системы.

Тензорный анализ основан на исследовании *инвариантов*, которыми называются объекты, остающиеся неизменными при преобразованиях координат [62]. Инвариант можно описать в заданной координатной системе некоторым уравнением. Это уравнение изменит свою форму при изменении координатного базиса, но сам инвариант остается неизменным. Тензорный анализ дает законы вычисления в связи между координатами инварианта при переходе от одного базиса к другому.

Именно поэтому тензорный анализ стал эффективным методом аналитической механики и неевклидовой геометрии, теории упругости механики и сплошных сред [2, 33, 59, 62]. Проблема трансформации координат является ключевой и для мехатроники, особенно при анализе многозвенных машин со сложными координатными базисами.

Проектирование мехатронных систем является сложной многофакторной проблемой выбора и оптимизации принимаемых решений. На сегодняшний день теоретический фундамент не позволяет раскрыть все возникающие в процессе проектирования закономерности и связи и окончательные решения принимаются разработчиком зачастую на основе его опыта и видения задач. Поэтому крайне важным является представление ему информации о свойствах многозвенной мехатронной машины в наглядной геометрической форме. Сочетание методов тензорного анализа, матричного исчисления и многомерной геометрии дает такую возможность. Мы будем описывать свойства многозвенных систем в форме характеристических поверхностей, привязанных к отдельным точкам их рабочей зоны.

Рассмотрим метод построения математических моделей мехатронных машин, которые описывают их кинематические, динамические и

упругие свойства на основе тензорно-геометрического анализа соответствующих инвариантов.

### 5.1.1. Построение тензорно-геометрической модели для кинематического анализа многозвенных машин

В качестве кинематического инварианта для анализа движений мехатронных машин выберем квадрат модуля скорости концевой точки машины – ее рабочего органа. С технологической точки зрения модуль скорости рабочего органа – это важная величина, которая задается при программировании движений мехатронных машин, выполняющих операции механообработки, сварки, покраски и т.п. Эта величина является инвариантом, т.е. ее значение одинаково в любой системе координат.

В декартовых координатах кинематический инвариант  $I_k$  вычисляется простейшим образом:

$$I_k = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2,$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – проекции вектора скорости на оси декартовой системы координат. Однако в мехатронных машинах исполнительные приводы приводят в движения звенья, поэтому прикладной интерес представляет анализ скоростных возможностей машины в обобщенных координатах. Для перехода к обобщенной системе координат воспользуемся известным соотношением для  $n$ -звенного механизма:

$$\vec{v} = J \frac{dq}{dt}, \quad (5.1)$$

где  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$  – вектор-столбец ( $3 \times 1$ ) скорости рабочего органа в

декартовой системе координат;  $\frac{dq}{dt} = \left( \frac{dq_1}{dt}, \frac{dq_2}{dt}, \dots, \frac{dq_n}{dt} \right)$  – вектор-столбец ( $n \times 1$ ) обобщенных скоростей механизма;  $J$  – матрица Якоби размерности ( $3 \times n$ ).

Тогда в обобщенных координатах выбранный кинематический инвариант рассчитывается по формуле

$$I_k = \vec{v}^T \vec{v} = \left( \frac{d\vec{q}}{dt} \right)^T (J^T J) \left( \frac{d\vec{q}}{dt} \right), \quad (5.2)$$

где  $J^T$  – транспонированная матрица Якоби. Пример вычисления элементов прямой и транспонированной матриц для двухзвенного манипулятора "SCARA" дан в Приложении.

Основу полученного выражения составляет матрица манипулятивности  $M$  ( $n \times n$ ), введенная проф. Т. Инохикава:

$$M = (J^T J). \quad (5.3)$$

Например, для двухзвенного манипулятора типа "SCARA" матрица манипулятивности  $M$  имеет следующий вид:

$$M = J^T J = \begin{bmatrix} L_1^2 + 2L_1L_2 \cos q_2 + L_2^2 & L_1L_2 \cos q_2 + L_2^2 \\ L_1L_2 \cos q_2 + L_2^2 & L_2^2 \end{bmatrix}.$$

Характерно, что элементы матрицы  $M$  зависят только от второй обобщенной координаты  $q_2$  и длин звеньев.

В общем случае для многозвенной машины кинематический инвариант в обобщенных координатах определяется формулой

$$I_k = \left( \frac{dq}{dt} \right)^T M \left( \frac{dq}{dt} \right). \quad (5.4)$$

Полученное выражение можно представить как симметричную квадратичную форму обобщенных скоростей

$$I_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \frac{dq_i}{dt} \frac{dq_j}{dt}. \quad (5.5)$$

Квадратичные формы допускают геометрическую интерпретацию при помощи характеристических поверхностей. В общем случае для симметричных квадратичных форм характеристическая поверхность имеет форму  $n$ -мерного эллипсоида. Уравнение эллипсоида для выбранного кинематического инварианта имеет вид

$$\bar{U}^T M \bar{U} = 1, \quad (5.6)$$

где  $\bar{U}$  – вектор, задающий направление движения в пространстве.

Для двухзвенного механизма получаем эллипс, построенный в обобщенной системе координат, центр которого расположен в точке рабочей зоны с координатами  $(q_1, q_2)$ , где определена матрица Якоби (рис. 5.1). Квадрат расстояния от центра эллипса до его поверхности можно найти по формуле



$$1/R^2 = [\cos \beta, \sin \beta] M [\cos \beta, \sin \beta]^T, \quad (5.7)$$

где  $\beta$  – угол, задающий направление движения.

Тогда длины малой и большой полуосей эллипса будут обратно пропорциональны соответственно максимальному и минимальному собственным числам матрицы  $M$ :

$$R_{\min} = 1/\sqrt{\lambda_{\max}}; \quad R_{\max} = 1/\sqrt{\lambda_{\min}}. \quad (5.8)$$

Формула (5.8) справедлива и для общего случая  $n$ -мерного эллипсоида. Представление кинематического тензора в виде многомерного эллипсоида (будем для краткости называть его "эллипсоидом кинематики" мехатронной машины) позволяет дать наглядную геометрическую интерпретацию задачи поиска и выбора оптимального направления движения.

Примем, что оптимальным с кинематической точки зрения является направление, при котором достигается максимальная скорость рабочего органа при фиксированной норме обобщенных скоростей. Другими словами, необходимо найти направление, где можно добиться максимального эффекта по скорости рабочего органа при заданных "скоростных затратах" в степенях подвижности машины. В такой постановке задачи оптимизации мехатронная машина рассматривается как преобразователь обобщенных скоростей в скорость ее концевой точки – рабочего органа.

Рассмотрим математическую постановку этой задачи. Решение ищется в заданной точке рабочей зоны, следовательно, вектор обобщенных координат полагаем известным. Критерием оптимизации является значение кинематического инварианта (5.4). Условием поиска решения является постоянство нормы обобщенных скоростей. В последующих выводах принимается единичное значение данной нормы:

$$\left( \frac{dq}{dt} \right)^T \left( \frac{dq}{dt} \right) = 1. \quad (5.9)$$

Требуется найти направление движения рабочего органа, которое доставляет максимум выбранному критерию оптимальности при условии (5.9). Для плоской задачи (см. рис. 5.1) направление движения определяется углом ориентации  $\beta$  вектора скорости.



Рис. 5.1. Эллипсоид кинематики мехатронной машины

Из выражения (5.4) для кинематического инварианта следует, что оптимальным будет направление собственного вектора матрицы манипулятивности  $M$ , которому соответствует максимальное собственное число этой матрицы. На основании (5.8) определяем, что искомое направление задается углом  $\beta_{opt}$  для малой полуоси эллипса кинематики. Учитывая симметрию эллипсоида, получаем два решения поставленной задачи (см. рис. 5.1).



Рис. 5.2. Скоростная карта рабочей зоны

С помощью семейства характеристических поверхностей можно построить скоростную карту рабочей зоны мехатронной машины (рис. 5.2). В дальнейшем эту карту можно использовать для расчета траекторий движения в соответствии со скоростными ограничениями или критериями, обусловленными технологическим процессом, а также для планирования оптимальных по времени траекторий.

### 5.1.2. Построение тензорно-геометрической модели для анализа упругих свойств многозвенных машин

Необходимость анализа упругих свойств мехатронных машин возникает при автоматизации операций, где рабочий орган находится в силовом контакте с объектом работ. К числу таких операций можно отнести, например, механообработку и сборку [77]. При механообработке для обеспечения заданной размерной точности деталей необходимо, чтобы погрешность отработки траектории мехатронной машины (см. п. 1.2) не превышала допустимого значения. Доминирующим фактором, определяющим эту погрешность, является упругая деформация механических звеньев и преобразователей движения.

Для анализа податливости мехатронных машин построим тензорную модель, описывающую упругие свойства механического устройства. Рассмотрение ограничим рамками линейной теории и малыми упругими деформациями. Инвариантом для анализа упругих характеристик мехатронных машин может служить работа обобщенных сил на малых перемещениях:

$$I_y = (\vec{f} \cdot d\vec{q}), \quad (5.10)$$

где  $\vec{f}$  – вектор-столбец ( $n \times 1$ ) обобщенных сил;  $d\vec{q}$  – вектор-столбец ( $n \times 1$ ) упругих деформаций в степенях подвижности механического устройства.

Инвариант (5.10) – это скалярная величина, которая не зависит от выбора системы координат, поэтому можно записать ее матричное выражение как в обобщенной, так и в декартовой координатных системах:

$$I_y = \vec{f}^T d\vec{q} = \vec{F}^T d\vec{X}. \quad (5.11)$$

На основании равенства (5.11) с учетом (5.1) можно вывести связь между вектором обобщенных сил и вектором силы, приведенным к концевой точке мехатронной машины:

$$\vec{f} = J^T \vec{F}, \quad (5.12)$$

где  $\vec{F} = \text{col}[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]$  – вектор-столбец ( $6 \times 1$ ), объединяющий компоненты главного вектора и главного момента действующих сил, заданный в декартовой системе координат;  $J^T$  – транспонированная матрица Якоби размерности ( $n \times 6$ ).

Построим модель реального механического устройства как совокупность абсолютно жесткого механизма с идентичной кинематикой и эквивалентного упругого звена (ЭУЗ). ЭУЗ представляет собой условную многомерную пружину, привязанную к концевой точке механического устройства. Таким образом, абсолютно жесткий механизм моделирует кинематические характеристики машины, а ЭУЗ – ее податливость, условно сосредоточенную в конечном звене. С технологической точки зрения наибольший интерес представляют упругие свойства машины в концевой точке, так как именно здесь и происходит силовое взаимодействие рабочего органа и объекта работ.

Эквивалентное упругое звено можно описать диагональной матрицей  $C_{ЭУЗ}$  ( $6 \times 6$ ):

$$C_{ЭУЗ} = \text{diag}[C_x, C_y, C_z, C_{\alpha_x}, C_{\alpha_y}, C_{\alpha_z}]. \quad (5.13)$$

Элементами этой матрицы являются коэффициенты жесткости "пружины" ЭУЗ: три пружины сжатия-растяжения (с коэффициентами  $C_x, C_y, C_z$ ) и три пружины кручения (с коэффициентами  $C_{\alpha_x}, C_{\alpha_y}, C_{\alpha_z}$ ).

Введение матрицы ЭУЗ позволяет установить следующую связь между упругим отклонением концевой точки машины и главным вектором сил и моментов, приложенных к рабочему органу:

$$\vec{F} = C_{ЭУЗ} d\vec{X}, \quad (5.14)$$

где  $d\vec{X} = \text{col}[dx, dy, dz, d\alpha_x, d\alpha_y, d\alpha_z]$  – вектор-столбец ( $6 \times 1$ ) малых деформаций пружин эквивалентного упругого звена.

В реальной машине источники упругих деформаций находятся в ее степенях подвижности. Их величины могут быть определены расчетным или экспериментальным путем. Введем матрицу упругости  $C$  ( $n \times n$ ), которая описывает деформации в шарнирах механического устройства:

$$\vec{f} = C d\vec{q}, \quad (5.15)$$

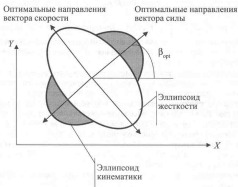


Рис. 5.3. Эллипсоид жесткости мехатронной машины

где  $\vec{f}$  – вектор-столбец ( $n \times 1$ ) обобщенных упругих сил;  $d\vec{q}$  – вектор-столбец ( $n \times 1$ ) упругих деформаций в степенях подвижности машины.

Из выражений (5.14) и (5.15) с учетом (5.12) получаем следующую матричную зависимость:

$$C_{3Y3} = J^{-T} C J^{-1}, \quad (5.16)$$

где  $J^{-T}$  – транспонированная обратная матрица Якоби.

Таким образом, формула (5.16) позволяет определить матрицу ЭУЗ по известной матрице  $C$  в заданной конфигурации мехатронной машины. Выражения для обратной и транспонированной матриц манипулятора типа "SCARA" приведены в Приложении.

Матрице (5.16) можно поставить в соответствие характеристическую поверхность – эллипсоид жесткости (рис. 5.3). Уравнение эллипсоида жесткости имеет вид

$$\vec{U}^T C_{3Y3} \vec{U} = 1. \quad (5.17)$$

Эллипсоид жесткости позволяет определить жесткость механического устройства, приведенную к его концевой точке, в любом интересующем направлении:

$$C_{3Y3}^e = \vec{e}^T C_{3Y3} \vec{e}, \quad (5.18)$$

где  $\vec{e}$  – единичный вектор, в направлении которого определяется жесткость машины.

Направления главных осей эллипсоида жесткости задают собственные векторы матрицы  $C_{3Y3}$ , а величины его полуосей определяются ее собственными числами. Центр эллипсоида расположен в фиксированной точке рабочей зоны. В общем случае размеры и ориентация эллипсоида жесткости зависят от координат рабочего органа. Как и в случае кинематического анализа (см. рис. 5.1), с помощью эллипсоида жесткости можно решать аналогичные задачи выбора оптимальных силовых направлений (см. рис. 5.3).

Важно отметить, что при принятых допущениях собственные векторы матриц манипулятивности (5.3) и эквивалентной жесткости (5.16) взаимно ортогональны. Это значит, что в направлении, которое оптимально с точки зрения развиваемой скорости, механическая система будет иметь наименьшую жесткость. Следовательно, при механообработке объект желательно размещать вдоль малой оси эллипсоида скорости. Тогда в касательном направлении система будет податливой, а в нормальном к траектории – предельно жесткой. Это позволит минимизировать упругие отклонения рабочего органа от программной траектории, вызванные действием сил резания.

По аналогии с механическим многомерным устройством подход к построению модели на базе эквивалентного упругого звена можно применить для построения моделей и других частей мехатронной машины (например, инструментальной головки) [18]. В результате формируются математическая и компьютерная модели сложной технологической системы мехатронная машина – рабочий орган – инструмент – рабочий процесс.

### 5.1.3. Построение тензорно-геометрической модели для динамического анализа многозвенных машин

Для построения динамической модели в качестве инварианта выбираем полную кинетическую энергию многозвенного механизма. Кинетическая энергия является скалярной величиной, исследование и анализ которой лежит в основе целого ряда динамических моделей, глубоко разработанных в робототехнике и аналитической механике.

В общем случае для  $n$ -звенной машины удвоенная кинетическая энергия (динамический инвариант) в обобщенных координатах определяется формулой

$$2T = I_a = \left( \frac{d\vec{q}}{dt} \right)^T I \left( \frac{d\vec{q}}{dt} \right), \quad (5.19)$$

где  $I$  – тензор инерции ( $n \times n$ ) многозвенового механизма.

Получим выражение для динамического инварианта на примере двухзвенового манипулятора, работающего в полярной системе координат (рис. 5.4). Полная кинетическая энергия рассматриваемой механической системы состоит из двух слагаемых:

$$T = T_a + T_p, \quad (5.20)$$

где  $T_a$ ,  $T_p$  – кинетическая энергия манипуляционного механизма и нагрузки.

Кинетическая энергия нагрузки определяется по формуле

$$T_p = \frac{1}{2} m_p v_p^2 + \frac{1}{2} I_p \omega_p^2, \quad (5.21)$$

где  $m_p$  – масса нагрузки;  $v_p$  – линейная скорость центра масс нагрузки;  $I_p$  – момент инерции нагрузки;  $\omega_p$  – угловая скорость вращения нагрузки.

Перечисленные переменные определяются следующим образом:

$$v_p = \dot{r}, \quad \omega_p = \dot{q}_2, \quad I_p = m_p r^2.$$

Кинетическая энергия манипуляционного механизма определяется по формуле

$$T_a = \frac{1}{2} m_a v_C^2 + \frac{1}{2} I_a \omega_a^2, \quad (5.22)$$

где  $m_a$  – масса манипулятора;  $v_C$  – линейная скорость центра масс  $C$  манипулятора;  $I_a$  – момент инерции манипулятора;  $\omega_a$  – угловая скорость вращения манипулятора.

Линейная и угловая скорости представляют собой обобщенные скорости механизма:

$$v_C = \frac{dr}{dt} = \dot{r}, \quad \omega_a = \dot{q}_2.$$

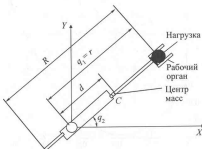


Рис. 5.4. Двухзвенный манипулятор с полярной системой координат

Момент инерции манипулятора относительно начала координат (рис. 5.4) можно рассчитать по формуле

$$I_o = I_C + m_a d^2 = \frac{m_a R^2}{12} + m_a \left( r - \frac{R}{2} \right)^2 = m_a \left( \frac{R^2}{3} + r^2 - rR \right),$$

где  $d$  – расстояние от центра масс до начала координат.

Складывая составляющие (5.21) и (5.22), получаем выражение для полной кинетической энергии в обобщенной системе координат:

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{q}_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{q}_2)^2, \quad (5.23)$$

где  $m_1, m_2$  – эквивалентные массы, приведенные к соответствующим обобщенным координатам.

Эквивалентные массы для рассматриваемого манипулятора можно вычислить по формулам:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_a + m_p; \\ m_2 &= (m_a + m_p) q_1^2 + (-m_a R) q_1 + \frac{1}{3} m_a R^2. \end{aligned} \quad (5.24)$$



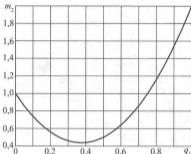


Рис. 5.5. Эквивалентные массы для двухзвенового манипулятора

Характерно, что масса  $m_2$  является переменной величиной, которая зависит от обобщенной координаты  $q_1$  – расстояния от полюса рабочего органа до начала координат. График зависимости, который построен для заданного набора параметров, представлен на рис. 5.5.

Тензор инерции для рассматриваемого манипулятора имеет следующую форму:

$$I = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2(q_1) \end{bmatrix}. \quad (5.25)$$

В общем случае для многозвеновой машины динамический инвариант (5.19) можно представить как симметричную квадратичную форму обобщенных скоростей:

$$I_A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij} \frac{dq_i}{dt} \frac{dq_j}{dt}, \quad (5.26)$$

где  $I_{ij}$  – элементы тензора инерции  $I$  ( $n \times n$ ) механического устройства.

Матрице (5.26) можно поставить в соответствие характеристическую поверхность, которую назовем эллипсоидом динамики. Уравнение эллипсоида динамики в общем случае для  $n$ -степенной машины имеет вид

$$\bar{U}^T I \bar{U} = 1. \quad (5.27)$$



Рис. 5.6. Эллипсоид динамики мехатронной машины

Эллипсоид динамики описывает инерционные свойства механического устройства в данной точке рабочей зоны и в интересующем направлении движения (рис. 5.6). Большая ось эллипсоида указывает направление, в котором машина имеет минимальный момент инерции. Именно это направление движения наиболее выгодно с динамической точки зрения. При этом планировать движение можно с учетом кинематических, упругих и динамических характеристик машины в их совокупности. Так, на рис. 5.6 представлен оптимальный вариант взаимного расположения эллипсоидов кинематики, жесткости и динамики для операции механообработки заданного контура.

Динамический инвариант можно записать не только в обобщенной, но и в декартовой системе координат. С учетом выражения (5.1) из (5.19) следует

$$I_x = 2T = \varphi^T I_x \varphi, \quad (5.28)$$

где  $I_x = J^{-T} I J^{-1}$  – эквивалентный тензор инерции многозвенного механизма.

Структура полученного тензора  $I_x$  аналогична матрице эквивалентного упругого звена (5.16). Таким образом, совокупность трех тензоров – тензора кинематики (5.2), тензора жесткости (5.11) и тензора динамики (5.19) – позволяет построить комплексную математическую модель, которая описывает кинематические, упругие и динамические характеристики мехатронной машины.

Основные преимущества тензорно-геометрического подхода:

1. Форма модели не зависит от числа степеней подвижности механизма и типов используемых шарниров, что делает ее универсальной для моделирования движений многомерных систем.

2. Взаимовлияние движений звеньев математически описывается через переменность коэффициентов и введение недиагональных элементов в соответствующие матрицы.

3. Тензорные модели строятся на основе инвариантов, поэтому легко трансформируются по известным правилам при преобразовании координатного базиса. Это особенно важно для мехатронных машин с нелинейной кинематикой, где система обобщенных координат является сложной и неудобной для программирования движений.

4. Геометрическая форма представления тензоров в виде характеристических поверхностей позволяет разработчику наглядно оценивать неоднородность и анизотропию свойств машины и оптимизировать ее движения, учитывая совокупность кинематических, динамических и жесткостных характеристик.

Определенные ограничения в применении тензорно-геометрического подхода обусловлены тем, что введенные инварианты вычисляются в заданных точках рабочей зоны. Таким образом, это локальные оценки свойств мехатронных машин. Для анализа глобальных движений можно строить карты, как показано на рис. 5.2, которые представляют собой семейство характеристических поверхностей в опорных точках траектории. Ориентация, форма и размеры характеристических эллипсоидов в общем случае являются переменными и описывают неоднородность и анизотропию свойств многомерных машин. Для формирования непрерывных моделей рекомендуется использовать параметрический подход, изложенный в следующем параграфе.

## 5.2. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ МНОГОЗВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

### 5.2.1. Динамическая модель с лонгальным параметром

Многие автоматизированные технологические операции требуют контурного управления движением многозвеной мехатронной машины по заданной траектории. К ним относятся: дуговая сварка, лазерная и водоструйная резка, зачистка зубцов на сложных профилях. При синтезе

движений мехатронных машин на операциях этого класса необходимо учитывать динамические факторы, которые обусловлены силовым взаимодействием рабочего органа с объектом работ, а также взаимовлиянием степеней подвижности. Эффективность решения задачи контурного управления во многом определяется выбранной формой математической модели многостепенной машины как управляемого объекта.

Одним из наиболее распространенных формализмов для задач управления движением многомерных систем является модель динамики на основе уравнений Лагранжа второго рода. Для  $n$ -степенного механизма математическая модель в лагранжевой форме имеет вид

$$I(\bar{q}) \frac{d^2 \bar{q}}{dt^2} + h \left( \bar{q}, \frac{d\bar{q}}{dt} \right) = \bar{Q}, \quad (5.29)$$

где  $n$  – число степеней подвижности механизма;  $\bar{q}, \frac{d\bar{q}}{dt}, \frac{d^2 \bar{q}}{dt^2}$  – векторы ( $n \times 1$ ) соответственно обобщенных координат, скоростей и ускорений;  $I(\bar{q})$  – матрица инерции механизма, зависящая от его конфигурации;  $h \left( \bar{q}, \frac{d\bar{q}}{dt} \right)$  – вектор ( $n \times 1$ ) центробежных и кориолисовых сил;  $\bar{Q}$  – вектор ( $n \times 1$ ) обобщенных сил, приложенных к звеньям механизма.

В частности, для манипулятора с полярной системой координат (см. рис. 5.4) уравнение динамики (5.29) имеет вид

$$\begin{cases} a_{11} \frac{d^2 q_1}{dt^2} + a_{12} \left( \frac{dq_2}{dt} \right)^2 = Q_1; \\ a_{21} \frac{d^2 q_2}{dt^2} + a_{22} \left( \frac{dq_1}{dt} \right) \left( \frac{dq_2}{dt} \right) = Q_2, \end{cases} \quad (5.30)$$

где коэффициенты уравнения задаются выражениями:

$$\begin{aligned} a_{11} &= m_1; & a_{12} &= -m_1 q_1 + \frac{1}{2} m_o R; \\ a_{22} &= m_2; & a_{21} &= 2m_1 q_1 - m_o R. \end{aligned}$$

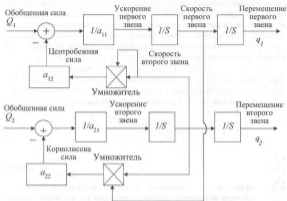


Рис. 5.7. Блок-схема динамической модели двухзвьевого манипулятора

Первые слагаемые в уравнениях (5.30) представляют собой силы инерции, пропорциональные приведенным массам  $m_1$  и  $m_2$  соответствующих звеньев, которые определяются формулами (5.24). Блок-схема моделирования движений манипулятора с полярной системой координат приведена на рис. 5.7. Между степенями подвижности робота существует динамическое взаимодействие, проявляющееся через действие центробежной силы на первое звено и кориолисовой – на второе звено робота, которые зависят от обобщенных координат и скоростей движения.

Математическая модель в форме (5.29) удобна для синтеза регуляторов исполнительных приводов, так как устанавливает непосредственную связь между векторами обобщенных сил и ускорений. Однако для задач контурного управления она не вполне адекватна по следующим причинам:

- при программировании движений мехатронных машин закон движения удобно задавать не в обобщенной, а в декартовой системе координат;

– система лагранжевых уравнений описывает машину как совокупность отдельных (хотя и взаимосвязанных) подсистем, в то время как в практических приложениях наибольший интерес представляют динамические характеристики машины как единого объекта;

– высокая размерность систем уравнений затрудняет ее использование для вычислений в реальном времени;

– реализация алгоритмов динамического управления на исполнительном уровне зачастую технически невозможна, так как регуляторы приводов настраиваются фирмой-изготовителем и недоступны для пользователей.

Для построения параметрической модели траекторию рабочего органа следует задать как функцию скалярного параметра (рис. 5.8):

$$\bar{X}(\lambda) = [x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda), \alpha_x(\lambda), \alpha_y(\lambda), \alpha_z(\lambda)], \quad (5.31)$$

где  $\bar{X}$  – вектор положения и ориентации рабочего органа в декартовой системе координат;  $\lambda$  – путь, пройденный рабочим органом вдоль траектории ( $0 \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ ).

Три компоненты вектора  $\bar{X}$  составляют декартовы координаты характеристической точки рабочего органа, а три остальные задают эйлеровы углы, описывающие его ориентацию как твердого тела в декартовом пространстве. Скаляр  $\lambda$  в дифференциальной геометрии называется лонгальным параметром.

Например, для полярного манипулятора, рабочий орган которого перемещается по прямолинейной траектории (рис. 5.9), параметрические функции (5.31) имеют следующий вид:

$$\begin{cases} x(\lambda) = x_0 + \lambda \cos \beta, \\ y(\lambda) = y_0 + \lambda \sin \beta, \end{cases} \quad (5.32)$$

где  $x_0, y_0$  – координаты начальной точки траектории (при  $\lambda = 0$ );  $\beta$  – угол наклона траектории к оси  $X$ .

Параметрическую траекторию вида (5.31), решив обратную задачу о положении, можно описать в обобщенной системе координат. В общем случае для  $n$ -степенного механизма получаем вектор-столбец параметрических функций

$$\bar{q}(\lambda) = \text{col}[q_1(\lambda), q_2(\lambda), \dots, q_n(\lambda)], \quad (5.33)$$

где  $q_i$  – обобщенные координаты механизма ( $i = 1, \dots, n$ ).

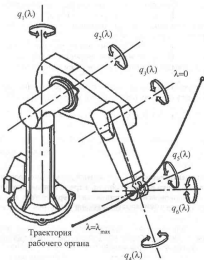


Рис. 5.8. Параметрическое представление траектории рабочего органа робота

Так, в рассматриваемом примере (см. рис. 5.9) для траектории вида (5.32) имеем следующие зависимости для обобщенных координат:

$$\begin{cases} q_1(\lambda) = \sqrt{x^2(\lambda) + y^2(\lambda)} = \sqrt{(x_0^2 + y_0^2) + 2(x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta) \lambda + \lambda^2}, \\ q_2(\lambda) = \arctg \left[ \frac{y(\lambda)}{x(\lambda)} \right] = \arctg \left[ \frac{y_0 + \lambda \sin \beta}{x_0 + \lambda \cos \beta} \right]. \end{cases} \quad (5.34)$$

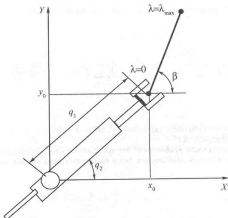


Рис. 5.9. Прямолинейная траектория движения рабочего органа для двухзвенного манипулятора

Если функции (5.33) являются дважды дифференцируемыми по параметру  $\lambda$ , то получаем параметрические векторные функции для обобщенных скоростей и ускорений многозвенного механизма:

$$\frac{dq_i}{dt} = \frac{dq_i}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dt} = \frac{dq_i}{d\lambda} \dot{\lambda}; \quad (5.35)$$

$$\frac{d^2 q_i}{dt^2} = \frac{d^2 q_i}{d\lambda^2} (\dot{\lambda})^2 + \frac{dq_i}{d\lambda} \ddot{\lambda}. \quad (5.36)$$

В общем случае параметрическая модель динамики многозвенного механизма на основе лонгального параметра имеет вид нелинейного дифференциального уравнения второго порядка:

$$a(\lambda) \ddot{\lambda} + b(\lambda) \dot{\lambda} = Q(\lambda). \quad (5.37)$$



Члены уравнения (5.37) вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}
 a(\lambda) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij}(\lambda) \frac{dq_i}{dt} \frac{dq_j}{dt}; \\
 b(\lambda) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij}(\lambda) \frac{dq_i}{dt} \frac{d^2 q_j}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk}(\lambda) \frac{dq_i}{dt} \frac{dq_j}{dt} \frac{dq_k}{dt}, \quad (5.38) \\
 c_{ijk} &= \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_{ij}}{\partial q_k^2} \quad (i, j, k = 1, \dots, n),
 \end{aligned}$$

где  $a(\lambda)$  – коэффициент силы инерции;  $b(\lambda)$  – коэффициент центробежной и кориолисовой сил.

Правая часть уравнения (5.38) представляет собой скалярное произведение векторов обобщенных сил и параметрических обобщенных скоростей:

$$Q(\lambda) = \left( \bar{Q} \cdot \frac{dq}{dt} \right) = \sum_{i=1}^n Q_i \frac{dq_i}{dt}. \quad (5.39)$$

Таким образом, динамический анализ  $n$ -степенного механизма сводится к решению одного дифференциального уравнения вида (5.37), в чем и состоит основное преимущество параметрических моделей. Использование в математических моделях лонгального параметра, который кажется наиболее естественным при программировании контурных движений, требует вычисления коэффициентов инерциальной, центробежной и кориолисовой сил вида (5.38). В системах управления реального времени, алгоритмы работы которых строятся на базе динамических моделей, организация таких процедур представляет серьезную вычислительную проблему.

### 5.2.2. Динамическая модель многостепенного механизма на базе кинетического параметра

Форма и соответственно сложность коэффициентов уравнения динамики вида (5.37) определяется выбранным параметром. В качестве параметра можно принять любую знакпостоянную функцию переменных состояния системы, которая:

- имеет положительную производную по времени;
- является стационарной функцией;
- инвариантна к системе координат, используемой для ее вычисления.

Таким образом, лонгальный параметр  $\lambda$  удовлетворяет перечисленным требованиям, однако не является единственно возможным. Так, акад. Г.С. Пospelовым для задач управления летательными аппаратами разработаны системы "с регулируемым ходом часов". В этих системах используется параметр  $\lambda = H/v$ , где  $H$ ,  $v$  – соответственно высота и скорость подъема аппарата.

Радикально упростить параметрическое уравнение динамики многозвенной системы позволяет введение параметра, предложенного проф. Дж.Л. Синджем. Производная по времени этого параметра ( $s$ ) определяется полной кинетической энергией движущейся системы

$$\frac{ds}{dt} = \sqrt{2T}. \quad (5.40)$$

Методология построения динамических моделей с данным параметром, который будем называть кинетическим, базируется на геометрической идее риманова пространства в приложении к задачам динамики.

В первую очередь следует подчеркнуть принципиальное методологическое отличие описания движения в тензорно-геометрическом методе от подходов, основанных на лагранжевом формализме. В предисловии к трактату "Аналитическая механика" (1788) Ж.-Л. Лагранж писал: "В этой работе совершенно отсутствуют какие бы то ни было чертежи. Излагаемые мною методы не требуют ни построений, ни геометрических или механических рассуждений; они требуют только алгебраических операций, подчиненных планомерному и однообразному ходу. Все любящие анализ с удовольствием убедятся в том, что механика становится новой областью анализа...".

Геометрический подход к динамике стоит на противоположных позициях, которые сформулированы Дж.Л. Синджем: "Мы воскрешаем геометрический дух, столь тщательно изгнанный из работ Лагранжа и Гамильтона, и наглядно представляем себе движение системы, причем как движение единственной точки риманова  $n$ -мерного пространства".

Обзор первых работ в этой области дан в основополагающей книге проф. Дж.Л. Синджа [59], более детально подход изложен в книгах по аналитической механике (например, [33]). В статье [113] математическая

модель на основе данного параметра была использована для выбора квазиоптимальных траекторий и оценки времени перемещения манипулятора по заданному контуру.

Рассмотрим структуру указанного риманова пространства. Его элементами являются множество кинематически и динамически допустимых состояний мехатронной машины. Метрика пространства определяется из условия равенства мгновенных значений кинетической энергии изображающей точки и кинетической энергии многозвенного механизма в каждой точке пространства.

Удвоенная кинетическая энергия исполнительного механизма при условии голономных и стационарных связей определяется как положительно определенная квадратичная форма обобщенных скоростей:

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 = 2T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n J_{ij} \frac{dq_i}{dt} \frac{dq_j}{dt}. \quad (5.41)$$

Выражение (5.41) совпадает с определением введенного динамического инварианта (5.26). Следовательно, квадрат метрики риманова пространства и динамический инвариант связаны соотношением

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 = I_s. \quad (5.42)$$

Движению многозвенной машины в обобщенных координатах ставится в динамическое соответствие движение условной изображающей точки (рис. 5.10). Это тело единичной массы, перемещающееся в римановом пространстве. Кинетическая энергия изображающей точки определяется формулой

$$T_p = \frac{1}{2} \left( \frac{d\vec{r}_p}{dt} \cdot \frac{d\vec{r}_p}{dt} \right). \quad (5.43)$$

Вектор скорости изображающей точки задается как сумма векторов

$$\frac{d\vec{r}_p}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \frac{dq_i}{dt}, \quad (5.44)$$

где  $\vec{F}_i$  – векторы координатного базиса риманова пространства  $R^n$ .

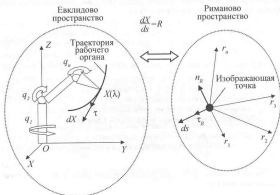


Рис. 5.10. Эквивалентность евклидова и риманова пространства при представлении движений многозвенных механизмов

Система базисных векторов строится на основе равенства выражений (5.41) и (5.43) в локальных точках пространства. Откуда определяются модули и взаимная ориентация векторов базиса:

$$\begin{cases} |\vec{r}_i| = \sqrt{I_{ii}}; \\ \cos(\vec{r}_i, \vec{r}_j) = \frac{I_{ij}}{\sqrt{I_{ii} I_{jj}}}, \end{cases} \quad (5.45)$$

где  $I_{ij}$  – элементы тензора инерции  $I$  ( $n \times n$ ) многозвенного механизма.

Таким образом, в общем случае базисные векторы являются неединичными и неортогональными, так как элементы матрицы инерции зависят от конфигурации механизма. Поэтому модули и ориентация векторов базиса изменяются в процессе перемещения машины, что определяет риманов (нелинейный) характер метрики (5.40).

Уравнение динамики, описывающее движение изображающей точки единичной массы в форме второго закона Ньютона, представляет собой равенство векторов силы и ускорения [45]:

$$\frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \vec{Q}. \quad (5.46)$$

В контравариантных проекциях на оси базиса  $\vec{e}_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) это уравнение сводится к классическому уравнению Лагранжа второго рода вида (5.29). Однако наиболее простая и наглядная форма модели получается для естественной системы координат, связанной с траекторией движения. Вектор ускорения в проекциях на орты касательной и нормали к траектории изображающей точки можно представить в форме

$$\frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \ddot{x} \vec{t}_R + (\dot{x})^2 \vec{n}_R = \ddot{x} \vec{t}_R + (\dot{x})^2 \frac{d\vec{t}_R}{ds}. \quad (5.47)$$

Тогда проекция вектора ускорения изображающей точки на орт касательной имеет вид

$$\ddot{x} = \left( \vec{Q} \cdot \frac{d\vec{q}}{ds} \right) = \sum_{i=1}^n \left( Q_i \frac{dq_i}{ds} \right). \quad (5.48)$$

Рассмотрим особенности и преимущества динамической модели с кинетическим параметром. Для этого сопоставим параметрические уравнения динамики (5.48) и (5.37). Структура уравнения (5.48) существенно проще: оно не содержит кориолисовой силы (коэффициент  $b = 0$ ), а коэффициент силы инерции является единичным. Последнее утверждение следует из общей формулы (5.38) для коэффициента  $a(\lambda)$  при подстановке в нее выражения (5.41) для римановой метрики:

$$a(s) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij} \frac{dq_i}{ds} \frac{dq_j}{ds} = 1. \quad (5.49)$$

Коэффициент  $b(\lambda)$ , как следует из зависимостей (5.38), для произвольного параметра  $\lambda$  определяет скорость изменения коэффициента  $a(\lambda)$  вдоль траектории. Следовательно, при постоянном значении коэф-

коэффициента  $a(z) = 1$  коэффициент  $b = 0$ , т.е. вектор кориолисовой силы ортогонален вектору скорости изображающей точки в римановом пространстве. Таким образом, применение кинетического параметра вообще исключает вычисление коэффициентов в уравнении динамики.

Методическая особенность подхода на основе кинетического параметра заключается в том, что исследование движения многостепенной механической системы сводится к анализу динамики материальной точки единичной массы. Такой подход особенно эффективен при планировании контурных движений, когда многомерная машина, состоящая из цепи звеньев, рассматривается как единый объект управления. Полученное дифференциальное уравнение имеет простую форму и классическую структуру математического решения.

Однако проблема заключается в том, что изображающая точка условна, она не является физической точкой мехатронной машины. Поэтому для практического применения данного подхода необходимо установить связь между римановым и евклидовым пространствами.

### 5.2.3. Метрический коэффициент: понятие, способы вычисления, геометрическая интерпретация

При рассмотрении контурных движений метрика  $dX$  евклидового пространства представляет собой расстояние между двумя бесконечно близкими точками траектории рабочего органа (см. рис. 5.10). Квадрат данной метрики определяется в векторно-матричной форме следующим образом:

$$(dx)^2 = d\bar{q}^T M d\bar{q}, \quad (5.50)$$

где  $d\bar{q} = \text{col}(dq_1, dq_2, \dots, dq_n)$  – вектор приращений обобщенных координат механизма;  $M = J^T J$  – матрица манипулятивности (5.3).

Формула для метрики риманова пространства  $R^n$  следует из выражения кинетического параметра (5.41):

$$(dx)^2 = 2T = d\bar{q}^T I d\bar{q}. \quad (5.51)$$

Коэффициенты квадратичных форм (5.50) и (5.51) являются переменными величинами, так как элементы матриц манипулятивности  $M$  и инерции  $I$  зависят от значений обобщенных координат.

Введем понятие метрического коэффициента как отношение метрик евклидова и риманова пространства:

$$R = \frac{dX}{ds}. \quad (5.52)$$

Рассмотрим способы расчета метрического коэффициента. С точки зрения тензорного анализа этот коэффициент представляет собой отношение кинематического и динамического инвариантов. Действительно, это следует из формул (5.2) и (5.42):

$$R = \frac{dX/dt}{ds/dt} = \sqrt{\frac{I_k}{I_\lambda}}. \quad (5.53)$$

Для вычисления метрического коэффициента в обобщенных координатах подставим выражения для указанных инвариантов (5.5) и (5.41) в формулу (5.53):

$$R = \frac{d\bar{q}^T M d\bar{q}}{d\bar{q}^T I d\bar{q}}. \quad (5.54)$$

Таким образом, основываясь на теории матриц [8, 69], данные метрики представляют собой отношения Рэлея и могут быть вычислены как отношения двух квадратичных форм, представленных в виде скалярных произведений.

Перейдем к расчету в декартовой системе координат. Выражение для кинематического инварианта в базовых декартовых координатах имеет вид

$$I_k = v^2, \quad (5.55)$$

где  $v$  – модуль вектора скорости рабочего органа в данной точке траектории.

Динамический инвариант в декартовых координатах вычисляется следующим образом:

$$I_\lambda = d\bar{q}^T I d\bar{q} = (J^{-1} \bar{v})^T I (J^{-1} \bar{v}) = \bar{v}^T (J^{-T} I J^{-1}) \bar{v}, \quad (5.56)$$

где  $J^{-T} = (J^{-1})^T$  – транспонированная обратная матрица Якоби.

Вектор скорости рабочего органа направлен по касательной к траектории (см. рис. 5.10) и может быть представлен таким образом:

$$\bar{v} = v \bar{\tau}, \quad (5.57)$$

где  $\bar{\tau}$  – орт касательной к траектории рабочего органа.

Подставим выражение (5.57) в уравнение (5.56) для динамического инварианта:

$$I_x = v^2 \left[ \dot{\tau}^T (J^{-T} L J^{-1}) \dot{\tau} \right], \quad (5.58)$$

Подставляя зависимости (5.55) и (5.58) в (5.53), получаем следующее выражение для вычисления метрического коэффициента в декартовых координатах:

$$R = \frac{1}{\sqrt{\dot{\tau}^T H \dot{\tau}}}, \quad (5.59)$$

где  $H = J^{-T} L J^{-1}$  – обобщенный тензор инерции многостепенного механизма.

Определение метрического коэффициента по формуле (5.59) допускает геометрическую интерпретацию при помощи характеристической поверхности. Обобщенному тензору инерции  $H$  можно поставить в соответствие эллипсоид, центр симметрии которого расположен в текущей точке траектории рабочего органа (рис. 5.11). Уравнение этого эллипсоида имеет вид

$$\bar{U}^T H \bar{U} = 1, \quad (5.60)$$

где  $\bar{U}$  – вектор, соединяющий центр эллипсоида с точками его поверхности.

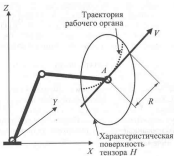


Рис. 5.11. Характеристический эллипсоид обобщенного тензора инерции механизма



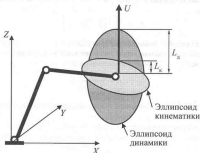


Рис. 5.12. Геометрическая интерпретация метрического коэффициента

Как следует из формул (5.8), квадраты длин полуосей эллипсоида обратно пропорциональны собственным числам соответствующей матрицы. Тогда, учитывая выражение (5.59), метрический коэффициент  $R$  можно найти как расстояние от текущей точки траектории до точки характеристической поверхности тензора  $H$ , в которой ее пересекает луч, имеющий направление вектора скорости (см. рис. 5.11). Метрический коэффициент обладает свойством "зеркальности", т.е. его значения для прямого и диаметрально противоположного направлений движения равны:

$$R(\vec{v}) = R(-\vec{v}). \quad (5.61)$$

Это свойство является следствием симметрии эллипсоида инерции.

Другой вариант геометрической интерпретации можно дать на основании выражения (5.54). Это выражение представляет собой отношение Рэлея для двух квадратичных форм. Следовательно, метрический коэффициент в фиксированной точке  $A$  траектории есть отношение длин осей эллипсоидов кинематики и динамики в выбранном направлении  $\vec{U}$  (рис. 5.12):

$$R_A(\vec{U}) = \frac{L_k}{L_d}. \quad (5.62)$$

Выделим основные свойства метрического коэффициента.

1. Коэффициент является инвариантом, так как его величина не зависит от выбранной для расчета системы координат.
2. Значения  $R$  не зависят от модуля вектора  $\vec{U}$ , поэтому удобно использовать векторы с единичной нормой.
3. Диапазон изменения коэффициента ограничен предельными собственными числами рассматриваемых квадратичных форм:

$$\mu_{\min} \leq R_j \leq \mu_{\max}. \quad (5.63)$$

4. Задача ортогональности главных осей характеристических эллипсоидов (см. рис. 5.3, 5.6) сводится к определению экстремумов метрического коэффициента, собственных чисел и собственных векторов соответствующих матриц.

### 5.3. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ МНОГОЗВЕННЫХ СИСТЕМ

Для синтеза оптимальных законов движения построим динамическую модель многозвенового механизма в параметрической форме на основе введенных кинетического параметра и метрического коэффициента.

Вспользуемся энергетической формой уравнения динамики механических систем, согласно которой скорость изменения кинетической энергии равна мощности приложенных сил [45]:

$$\frac{dT}{dt} = \sum_{j=1}^n F_j \frac{dx_j}{dt}. \quad (5.64)$$

Правую часть уравнения (5.64) представим как скалярное произведение главного вектора силы  $\vec{F}$  и вектора скорости концевой точки механической системы:

$$\sum_{j=1}^n F_j \frac{dx_j}{dt} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{X}}{dt} = F_c \dot{\lambda},$$

где  $F_c$  – проекция главного вектора силы на касательную к траектории рабочего органа;  $\dot{\lambda}$  – контурная скорость концевой точки.

Левую часть уравнения (5.64), используя определение кинетического параметра (5.40), можно представить в следующей форме:

$$\frac{dT}{dt} = \dot{s} \bar{x}. \quad (5.65)$$

Тогда, основываясь на определении метрического коэффициента (5.52), уравнение динамики многозвенного механизма (5.64) приводится к виду

$$R^{-1} \bar{x} = F_c. \quad (5.66)$$

Дифференциальное уравнение (5.66) является аналогом второго закона Ньютона, которое описывает контурное движение изображающей точки. При этом эквивалентная масса этой точки, как следует из (5.66), обратно пропорциональна метрическому коэффициенту. Значение коэффициента  $R$  зависит от конфигурации механической системы и направления ее движения в пространстве.

### 5.3.1. Оптимизация контурных движений многозвенных механических систем по критерию быстродействия

Для построения оптимальных по критерию быстродействия законов контурного движения воспользуемся полученным уравнением динамики многозвенной механической системы в форме (5.66).

Результирующей вектор силы, действующий на рабочий орган, является векторной суммой

$$\bar{F} = \bar{F}_M + \bar{F}_E,$$

где  $\bar{F}_M$  – приведенная к концевой точке сила, развиваемая исполнительными приводами;  $\bar{F}_E$  – вектор внешних сил.

Тогда проекция вектора силы на касательную к траектории рабочего органа является скалярной суммой двух соответствующих компонент (рис. 5.13):

$$F_c = (\bar{F}_M \bar{e}) + (\bar{F}_E \bar{e}) = F_{Mk} + F_{Ek}.$$

Определим контурное ускорение как производную контурной скорости рабочего органа по времени:

$$\ddot{\lambda} = \frac{dR}{dt} \dot{s} + R\ddot{s} = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\lambda} (\dot{\lambda})^2 + R\ddot{s}. \quad (5.67)$$

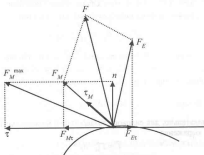


Рис. 5.13. Схема сил, действующих на рабочий орган

Предположим, что производная метрического коэффициента существует во всех точках траектории. Тогда максимальное значение контурного ускорения в заданной точке траектории можно найти по следующей формуле:

$$\dot{\lambda}_{\max} = \left[ \frac{1}{R} \frac{dR}{d\lambda} \right] (\dot{\lambda})^2 + R \ddot{\lambda}_{\max}. \quad (5.68)$$

Метрический коэффициент может быть рассчитан заранее для всех программных траекторий и конфигураций механической системы. Для расчетов по формуле (5.68) необходимо знать максимальное параметрическое ускорение  $\ddot{\lambda}_{\max}$ .

Для определения этой величины обратимся к уравнению динамики (5.66). Воспользуемся известным соотношением

$$\vec{f} = J^T \vec{F} = J^T (\vec{F}_M + \vec{F}_E), \quad (5.69)$$

где  $\vec{f}$  – вектор обобщенных сил, приложенных в степенях подвижности механизма;  $J^T$  – транспонированная матрица Якоби.

Начнем рассмотрение со случая, когда внешние силовые воздействия отсутствуют ( $\vec{F}_E = 0$ ). В этом случае вектор обобщенных сил для заданного силового воздействия блока приводов находится по формуле

$$\vec{f} = J^T \vec{F}_M = F_M (J^T \vec{e}_M), \quad (5.70)$$

где  $\vec{e}_M$  – единичный вектор, направленный по линии действия силы  $\vec{F}_M$ .

Введем специальное обозначение для вектора обобщенных сил, соответствующего единичному вектору силы  $\vec{F}_M$ :

$$\vec{e}_F = J^T \vec{e}_M.$$

Следовательно, для силового воздействия с максимальным модулем получаем выражение

$$\vec{f} = F_M^{\max} \vec{e}_F.$$

Величины обобщенных сил, развиваемых исполнительными приводами, ограничены предельными значениями:

$$f_j^{\min} \leq f_j \leq f_j^{\max} \quad (j = 1, \dots, n). \quad (5.71)$$

Если предположить, что проекции вектора  $\vec{e}_F$  положительны, то получим следующую систему ограничений для максимальной силы:

$$LB_j \leq F_M^{\max} \leq UB_j \quad (j = 1, \dots, n). \quad (5.72)$$

Из системы ограничений (6.72) выбираем граничные значения;

$$F_M^{\max} = \min(UB_j) = \min(f_j^{\max} e_{Fj}^{-1});$$

$$F_M^{\min} = \max(LB_j) = \max(f_j^{\min} e_{Fj}^{-1}).$$

Полученные выражения позволяют найти граничные величины для касательных проекций вектора сил  $\vec{F}_M$ :

$$F_{M\tau}^{\max} = F_M^{\max} (\vec{\tau} \cdot \vec{e}_M); \quad F_{M\tau}^{\min} = F_M^{\min} (\vec{\tau} \cdot \vec{e}_M). \quad (5.73)$$

Таким образом, для расчета необходимо знать направление действия силы относительно заданной траектории, т.е. взаимную ориентацию векторов  $\vec{e}$  и  $\vec{v}_M$ .

Искомые предельные значения параметрического ускорения для участков разгона и торможения будут иметь вид

$$\ddot{s}_{acc} = F_{\dot{t}k}^{\max} R; \quad \ddot{s}_{dec} = F_{\dot{t}k}^{\min} R. \quad (5.74)$$

Если в процессе выполнения технологической операции мехатронная машина имеет силовой контакт с объектом работ, то при синтезе движений необходимо учитывать внешние силовые воздействия. Эти воздействия на исполнительные приводы можно определить по формуле

$$\vec{f}_E = J^T \vec{F}_E, \quad (5.75)$$

где  $\vec{f}_E = (f_{1E}, f_{2E}, \dots, f_{nE})$  – вектор-столбец ( $n \times 1$ ) обобщенных сил, обусловленных возмущающим силовым воздействием.

Представим неравенства (5.71) в следующем виде:

$$f_j^{\min} - f_{jE} \leq f_j \leq f_j^{\max} - f_{jE} \quad (j = 1, \dots, n). \quad (5.76)$$

Дальнейший расчет проводится по выражениям (5.72) – (5.74), но для ограничений вида (5.76).

Подставив найденное по (5.74) значение максимального ускорения в формулу (5.68), можно определить максимальное значение контурного ускорения механической системы в заданной точке траектории. Интегрируя полученную функцию параметрического ускорения, получаем профиль оптимальной скорости вдоль программной траектории.

### 5.3.2. Оптимизация контурных движений многосвязных механических систем по энергетическому критерию

Одной из наиболее распространенных задач оптимизации движения многосвязных механических систем является синтез по критерию минимума энергетических затрат. Динамические модели на основе кинетического параметра позволяют находить оптимальные движения этого класса наиболее простым и эффективным путем.

Обратимся к определению метрического коэффициента (5.53). Из него следует, что энергетически выгодными являются траектории с наи-

большим значением  $R$  и положительной производной  $dR/d\lambda$ . На таких траекториях при фиксированной величине кинетической энергии рабочей орган достигает большей контурной скорости.

Рассмотрим оптимизацию движений многозвенной механической системы, выполняющей контурную силовую операцию. В качестве критерия оптимизации выберем величину интерактивной механической энергии, передаваемой от мехатронной машины к объекту работ. Для расчета представим уравнение динамики в энергетической форме:

$$\frac{dT}{dt} = N_M(t) - N_E(t), \quad (5.77)$$

где  $N_M(t)$  – мгновенное значение мощности, развиваемой системой исполнительных приводов;  $N_E(t)$  – мгновенная интерактивная мощность, обусловленная взаимодействием рабочего органа с объектом работ.

Если не учитывать рассеяние энергии вследствие сил трения, то при фиксированном уровне мощности приводов величина интерактивная мощность будет максимальной ( $N_M = N_E$ ), если движение будет происходить при постоянстве кинетической энергии механической системы ( $T = T_0 = \text{const}$ ). С точки зрения динамики изображающей точки это означает постоянство кинетического параметра в процессе движения:

$$\dot{\lambda} = \dot{\lambda}_0 = \text{const}. \quad (5.78)$$

Используя определение метрического коэффициента, получаем для принятого критерия оптимизации следующий закон контурного управления:

$$\dot{\lambda} = \dot{\lambda}_0 R(\lambda). \quad (5.79)$$

Таким образом, оптимальный профиль контурной скорости рабочего органа определяется параметрической функцией изменения метрического коэффициента вдоль заданной траектории.

#### 5.4. ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОСТЕПЕННЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НОРМАЛИЗОВАННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Традиционный, глубоко разработанный в теории робототехники подход предусматривает компоновку математической модели мехатронной системы как совокупности моделей ее отдельных частей (механиче-

ской, электронной, управляющей, сенсорной и т.д.), объединенных в систему соответствующими связями. При этом связи между элементами модели в основном соответствуют аппаратным связям, технически реализованным в данной системе. При таком подходе полная размерность модели (следовательно, и вычислительная сложность компьютерного расчета) пропорциональна числу блоков и связей между ними.

С целью упрощения формы моделей исполнительных систем роботов, конструирования на их основе алгоритмов для управления в реальном времени, представляется логичным распространить синергетический принцип интеграции и на формирование математических моделей мехатронных модулей и систем. Один из возможных подходов к решению этой задачи рассматривается в данной главе применительно к построению динамических моделей многостепенных манипуляционных роботов [53].

Манипуляционные роботы являются сложными мехатронными системами, включающими манипуляционный механизм, комплекс исполнительных приводов и компьютерное устройство управления. Оптимизация движений манипуляторов предполагает количественное определение предельно достижимых показателей (например, максимальной силы и/или скорости рабочего органа, которые могут быть реализованы роботом в заданном направлении) при известных технических и технологических ограничениях.

С точки зрения подхода к решению задач этого класса можно выделить две основные группы методов анализа кинематических и динамических свойств манипуляторов.

1. Группа методов, в которых манипулятор рассматривается как сложный механизм без учета приводных ограничений на скорости или моменты. Основным инструментом исследования является тензорно-геометрический метод. Фактически главным для всех методов исследования данной группы является то, что манипулятор рассматривается как передаточный механизм (трансмиссия), передающий скорости (ускорения, моменты) из сочленений на рабочий орган робота, воздействующий на окружающую среду.

2. Группа методов, в которых законы управления движением робота определяются с учетом ограничений (скоростных, моментных, энергетических) в исполнительных приводах. Основным инструментом анализа являются так называемые политопы – многогранники, ограничивающие области допустимых скоростей или сил в выбранной системе координат.



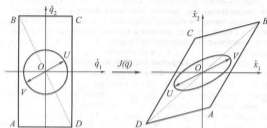


Рис. 5.14. Ограничения на скорости двухстепенного манипулятора в различных системах координат

Например, если рассматривать ограничения на скорости, развиваемые приводами двухстепенного манипулятора, то в фазовых координатах  $\{dq_1/dt, dq_2/dt\}$  они будут изображаться некоторым прямоугольником  $ABCD$ . Отобразив этот прямоугольник при помощи матрицы Якоби на декартовую координатную плоскость, получим соответствующий параллелограмм-политоп, представляющий собой область предельно допустимых скоростей концевой точки (рис. 5.14).

Учитывая методологические отличия указанных групп методов, их применение к решению прикладных задач дает различные результаты. Действительно, рассмотрим задачу нахождения направления, в котором концевая точка плоского двухзвенного манипулятора может развить максимальную линейную скорость при наличии ограничений скорости приводов.

На рис. 5.14 показаны виды политопов и эллипсоида кинематики на плоскостях обобщенных и декартовых скоростей соответственно. Направление  $OU$  является оптимальным согласно тензорно-геометрическому методу, в то время как  $OB$  – решение, даваемое политопным методом. Таким образом, политопный метод дает экстремальную, предельно возможную скорость. Действительно, точки  $B$  и  $D$  – самые удаленные от центра декартовой системы координат. Причем направление  $OB$  соответствует режиму движения, в котором приводы имеют равную относительную загрузку, т.е. отношение текущих скоростей к соответствующим максимальным одинаково для всех приводов.

Предлагаемый ниже подход заключается в математическом описании манипулятора как единой мехатронной системы, где учитываются кинематика манипуляционного механизма, технические ограничения комплекса приводов, а также скоростные и силовые ограничения на режимы движения рабочего органа робота.

#### 5.4.1. Нормализованные переменные и их физический смысл

Запишем выражения для скоростей и моментов (сил) в пространстве обобщенных координат в следующем виде:

$$\dot{q}_i = \frac{Q_i}{Q_{\max i}} \dot{q}_{\max i}, \quad Q_i = \frac{Q_i}{Q_{\max i}} Q_{\max i},$$

где  $\dot{q}_i, \dot{q}_{\max i}$  – соответственно обобщенная скорость и ее максимальное значение, развиваемые приводом  $i$ -го сочленения;  $Q_i, Q_{\max i}$  – соответственно момент (сила) и его максимальное значение, развиваемые приводом  $i$ -го сочленения.

В матричных обозначениях

$$\dot{\hat{q}} = Z_q \dot{\hat{q}}_n, \quad \hat{Q} = Z_Q \hat{Q}'_n, \quad (5.80)$$

где  $Z_q, Z_Q$  – диагональные матрицы максимальных значений соответственно скоростей и моментов (сил);  $\dot{\hat{q}}_n, \hat{Q}'_n$  – соответственно векторы нормализованных скоростей и моментов (сил).

Из смысла нормализованных переменных следует, что

$$|\dot{\hat{q}}_n| \leq 1, \quad |\hat{Q}'_n| \leq 1.$$

Аналогично рассматривается и декартовое (операционное) пространство:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= Z_x \dot{\hat{x}}_n, & \hat{F} &= Z_F \hat{F}'_n, \\ |\dot{\hat{x}}_n| &\leq 1, & |\hat{F}'_n| &\leq 1. \end{aligned} \quad (5.81)$$

Матрицы  $Z_x$  и  $Z_F$  описывают ограничения в операционном пространстве и поэтому могут быть использованы для задания технологических требований. Весовые матрицы  $Z_x, Z_q, Z_F, Z_Q$  в общем случае не

являются постоянными, и значения их элементов меняются при движении системы.

Матрицы  $Z_q$  и  $Z_Q$  отражают предельные возможности исполнительных приводов. Элементы этих матриц могут быть найдены аналитически или экспериментально (например, по методике, предложенной в статье [110]).

Рассмотрим плоскость нормализованных скоростей в операционном пространстве и в пространстве обобщенных координат. Так как операционные и обобщенные скорости связаны через матрицу Якоби

$$\dot{\hat{x}} = J\dot{q}$$

и учитывая (1), (2), получаем

$$Z_s \dot{\hat{x}}_s = JZ_q \dot{\hat{q}}_q.$$

Откуда

$$\dot{\hat{x}}_s = J_s \dot{\hat{q}}_q, \quad (5.82)$$

где

$$J_s = Z_s^{-1} JZ_q. \quad (5.83)$$

Аналогичное выражение для нормализованных моментов (сил) имеет вид

$$\dot{\hat{Q}}_s = J'_s \dot{\hat{F}}'_q, \quad (5.84)$$

где

$$J'_s = Z'_s JZ'_q. \quad (5.85)$$

Назовем  $J_s$  и  $J'_s$  матрицами Якоби, нормализованными соответственно по скорости и по моменту (силе).

В соответствии с (1) и (2) нормализованные скорости могут быть представлены в следующем виде:

$$\dot{\hat{x}}_s = Z_s^{-1} \dot{\hat{x}}, \quad (5.86)$$

$$\dot{\hat{q}}_q = Z_q^{-1} \dot{q}. \quad (5.87)$$

Введем новые переменные

$$\hat{F}_s = Z_s \hat{F}, \quad (5.88)$$

$$\hat{Q}_s = Z_q \hat{Q}. \quad (5.89)$$

Назовем величины  $\dot{\bar{x}}_n, \dot{\bar{q}}_n, \bar{F}_n, \bar{Q}_n$  переменными, нормализованными по скорости.

Заметим, что переменные  $(\dot{\bar{x}}_n, \dot{\bar{q}}_n)$  и  $(\bar{F}_n, \bar{Q}_n)$  в операционном пространстве и в пространстве обобщенных координат связаны между собой через скоростной якобиан. Действительно, как легко проверить,

$$\bar{Q}_n = J_n^T \bar{F}_n, \quad (5.90)$$

в то время как для скоростей  $\dot{\bar{x}}_n, \dot{\bar{q}}_n$  выполняется соотношение (5.82).

Аналогично назовем величины

$$\bar{F}'_n = Z_F^{-1} \bar{F}_n, \quad (5.91)$$

$$\bar{Q}'_n = Z_Q^{-1} \bar{Q}_n, \quad (5.92)$$

$$\ddot{\bar{q}}'_n = Z_Q \ddot{\bar{q}}_n, \quad (5.93)$$

$$\dot{\bar{x}}'_n = Z_F \dot{\bar{x}}_n \quad (5.94)$$

переменными, нормализованными по силе.

В данном случае связь между соответствующими переменными в операционном пространстве и в пространстве обобщенных координат определяется выражениями

$$\dot{\bar{x}}'_n = J'_n \dot{\bar{q}}'_n, \quad \bar{Q}'_n = J'_n \bar{F}'_n. \quad (5.95)$$

Выясним физический смысл нормализованных переменных.

1. Так как  $\bar{Q}_n = Z_Q \bar{Q}'_n$ , то  $Q_{ni} = \dot{q}_{i \max} Q'_i$ , т.е.  $Q_{ni}$  – максимальная мгновенная мощность, развиваемая приводом  $i$ -го сочленения при заданном значении момента (силы)  $Q'_i$ .

2.  $\ddot{\bar{q}}'_n = Z_Q \ddot{\bar{q}}_n$  или  $\dot{q}'_{ni} = Q_{i \max} \dot{q}_i$ . Откуда  $\dot{q}'_{ni}$  – максимальная мгновенная мощность, развиваемая приводом  $i$ -го сочленения при заданном значении обобщенной скорости  $\dot{q}_i$ .

3.  $\bar{F}'_n = Z_F \bar{F}_n$  или  $F'_{ni} = \dot{x}_{i \max} F_i$ , т.е.  $F'_{ni}$  – максимальная мгновенная мощность, которую разрешается приложить в операционном пространстве в направлении  $i$ -й координаты при заданном значении силы  $F_i$ .

4.  $\hat{x}_i = Z_F \dot{\hat{x}}$  или  $\hat{x}'_{i0} = F_{\max, i} \hat{x}_i$ , т.е.  $\hat{x}'_{i0}$  – максимальная мгновенная мощность, которую разрешается приложить в операционном пространстве в направлении  $i$ -й координаты при заданном значении скорости  $\dot{\hat{x}}_i$ .

#### 5.4.2. Уравнения динамики манипулятора в нормализованных переменных

Запишем уравнение динамики манипулятора в пространстве обобщенных координат:

$$A(\hat{q})\ddot{\hat{q}} + \bar{b}(\hat{q}, \dot{\hat{q}}) + \bar{g}(\hat{q}) = \bar{Q}, \quad (5.96)$$

где  $A(\hat{q})$  – матрица инерции манипулятора;  $\bar{b}(\hat{q}, \dot{\hat{q}})$  – вектор центробежных и кориолисовых сил;  $\bar{g}(\hat{q})$  – вектор сил тяжести.

В дальнейших выкладках для упрощения записи будем опускать скобки, выражающие зависимость приведенных выше величин от обобщенных координат и скоростей.

Умножим уравнение (5.96) на весовую матрицу  $Z_q$ :

$$(Z_q A Z_q) Z_q^{-1} \ddot{\hat{q}} + Z_q \bar{b} + Z_q \bar{g} = Z_q \bar{Q}. \quad (5.97)$$

Продифференцируем соотношение (5.87):

$$\dot{\hat{q}}_n = \dot{Z}_q^{-1} \dot{\hat{q}} + Z_q^{-1} \dot{\hat{q}}_n.$$

Отсюда

$$(Z_q A Z_q) \dot{\hat{q}}_n = (Z_q A Z_q) \dot{Z}_q^{-1} \dot{\hat{q}} + (Z_q A Z_q) Z_q^{-1} \dot{\hat{q}}_n.$$

С учетом последнего равенства перепишем (5.97) в виде

$$(Z_q A Z_q) \dot{\hat{q}}_n + (Z_q \bar{b} - Z_q A Z_q \dot{Z}_q^{-1} Z_q \dot{\hat{q}}_n) + Z_q \bar{g} = Z_q \bar{Q}.$$

Введем обозначения:

$$A_n = Z_q A Z_q, \quad (5.98)$$

$$\bar{b}_n = Z_q \bar{b} - A_n \dot{Z}_q^{-1} Z_q \dot{\hat{q}}_n, \quad (5.99)$$

$$\bar{g}_n = Z_q \bar{g}. \quad (5.100)$$

Тогда окончательно имеем

$$A_n \ddot{q}_n + \bar{b}_n + \bar{g}_n = \bar{Q}_n, \quad (5.101)$$

Уравнение динамики манипулятора в операционном пространстве можно представить в виде [71]:

$$\Lambda(\bar{x})\ddot{\bar{x}} + \bar{\mu}(\bar{x}, \dot{\bar{x}}) + \bar{p}(\bar{x}) = \bar{F}, \quad (5.102)$$

где  $\Lambda = J^{-T}AJ^{-1}$  – операционная матрица инерции манипулятора;  $\bar{\mu} = J^{-T}\bar{b} - \Lambda\dot{k}\dot{q}$  – операционный вектор центробежных и кориолисовых сил;  $\bar{p} = J^{-T}\bar{g}$  – операционный вектор сил тяжести.

Проведем все преобразования аналогично предыдущему пункту, но только уже с использованием матрицы  $Z_x$ .

Получим уравнение в переменных, нормализованных по скорости в операционном пространстве

$$\Lambda_x \ddot{x}_n + \bar{\mu}_n + \bar{p}_n = \bar{F}_n, \quad (5.103)$$

где

$$\Lambda_n = Z_x \Lambda Z_x, \quad (5.104)$$

$$\bar{\mu}_n = Z_x \bar{\mu} - \Lambda_x Z_x^{-1} Z_x \dot{x}_n, \quad (5.105)$$

$$\bar{p}_n = Z_x \bar{p}. \quad (5.105)$$

Для переменных, нормализованных по силе в пространстве обобщенных координат, проводим аналогичные выкладки, но с использованием матрицы  $Z_Q^{-1}$ :

$$A'_n \ddot{q}'_n + \bar{b}'_n + \bar{g}'_n = \bar{Q}'_n, \quad (5.106)$$

где

$$A'_n = Z_Q^{-1} A Z_Q^{-1}, \quad (5.107)$$

$$\bar{b}'_n = Z_Q^{-1} \bar{b} - A'_n Z_Q Z_Q^{-1} \dot{q}'_n, \quad (5.108)$$

$$\bar{g}'_n = Z_Q^{-1} \bar{g}. \quad (5.109)$$

Для переменных, нормализованных по силе в операционном пространстве, используем весовую матрицу  $Z_F^{-1}$ :

$$\Lambda'_n \ddot{x}'_n + \bar{\mu}'_n + \bar{p}'_n = \bar{F}'_n, \quad (5.110)$$

где

$$\Lambda'_n = Z_F^{-1} \Lambda Z_F^{-1}, \quad (5.111)$$

$$\bar{\mu}'_n = Z_F^{-1} \bar{\mu} - \Lambda'_n \dot{Z}_F Z_F^{-1} \dot{x}'_n, \quad (5.112)$$

$$\bar{p}'_n = Z_F^{-1} \bar{p}. \quad (5.113)$$

Матрицы  $A_n$ ,  $A'_n$ ,  $\Lambda_n$ ,  $\Lambda'_n$  являются матрицами инерции,  $\bar{b}_n$ ,  $\bar{b}'_n$ ,  $\bar{\mu}_n$ ,  $\bar{\mu}'_n$  – векторами центробежных и кориолисовых сил, а  $\bar{g}_n$ ,  $\bar{g}'_n$ ,  $\bar{p}_n$ ,  $\bar{p}'_n$  – векторами сил тяжести в соответствующих пространствах.

Анализируя полученные выражения, можно сделать вывод о том, что кинематические и динамические модели манипуляторов в нормализованной форме имеют привычный вид, идентичный традиционным моделям. При этом силовые и скоростные приводные ограничения учитываются при формировании модели через введение нормализованных переменных и матриц коэффициентов. Следовательно, разработанные критерии оптимизации алгоритмов планирования движений роботов могут применяться путем формальной замены переменных и весовых матриц.

### 5.4.3. Пример построения математической модели избыточного манипулятора с учетом ограничения выходного сигнала силового преобразователя

В качестве примера рассмотрим задачу синтеза управления движением манипулятора с учетом ограничений выходных сигналов силовых преобразователей приводов. Насыщение выходного усилителя даже в одном из приводов при выполнении сложного пространственного движения приводит к фактической неуправляемости робота по этой координате. Причиной возникновения такой ситуации может быть, например, неверная настройка ПИД-регулятора (особенно его интегральной состав-

ляющей) в условиях значительных изменений параметров нагрузки. При синтезе управления многостепенными и тем более избыточными манипуляторами эта проблема должна быть решена на этапе планирования движения.

Рассмотрим известный метод скоростного управления движением манипуляторов RMRC (Resolved Motion Rate Control), изложенный в работе [114]. Для избыточного манипулятора, имеющего  $n$  степеней подвижности, в  $m$ -мерном операционном пространстве ( $n > m$ ) вектор скорости концевой точки определяется выражением

$$\dot{\hat{x}} = J(\bar{q})\dot{\bar{q}}, \quad (5.114)$$

где  $J(\bar{q})$  – матрица Якоби размерности  $(m \times n)$ ;  $\dot{\bar{q}}$  – вектор  $(n \times 1)$  обобщенных скоростей,  $\dot{\hat{x}}$  – вектор  $(m \times 1)$  операционных скоростей.

Согласно методу RMRC управление манипулятором производится в соответствии с решением уравнения (5.114) относительно обобщенных скоростей:

$$\dot{\bar{q}} = J^{\#}(\bar{q})\dot{\hat{x}} - [E - J^{\#}(\bar{q})J(\bar{q})]\dot{\bar{q}}, \quad (5.115)$$

где  $J^{\#}(\bar{q})$  – псевдообратная матрица Якоби  $(n \times m)$ , которая определяется формулой  $J^{\#} = J^T(JJ^T)^{-1}$ ;  $E$  – единичная матрица  $(n \times n)$ ,  $\dot{\bar{q}}$  – произвольный вектор  $(n \times 1)$ , который может быть выбран в соответствии с используемым при оптимизации движения критерием качества.

Оптимальным решением, доставляющим минимум квадратичному критерию

$$\min \|\dot{\bar{q}}\| = \min \left( \sqrt{\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dots + \dot{q}_n^2} \right), \quad (5.116)$$

будет вектор обобщенных скоростей манипулятора

$$\dot{\bar{q}} = J^{\#}(\bar{q})\dot{\hat{x}}. \quad (5.117)$$

Такой выбор критерия в рассматриваемой постановке задачи представляется вполне оправданным, так как минимизация нормы вектора обобщенных скоростей (38) может предотвратить насыщение усилителей. Однако, как показывает моделирование, этого не всегда удается добиться в конкретных случаях.



Для решения задачи перейдем к переменным, нормализованным по скорости. Для избыточных манипуляторов нормализованное выражение (5.116) имеет вид

$$\dot{\bar{q}}_n = J_n^2(\bar{q})\dot{\bar{x}}, \quad (5.118)$$

где

$$J_n^2 = J_n^T (J_n J_n^T)^{-1} = Z_q J^T (J Z_q^2 J^T)^{-1}. \quad (5.119)$$

Из уравнений (5.118), (5.119) получаем оптимальную зависимость для вектора обобщенных скоростей

$$\dot{\bar{q}} = Z_q \dot{\bar{q}}_n = Z_q^2 J^T (J Z_q^2 J^T)^{-1} \dot{\bar{x}}. \quad (5.120)$$

Для доказательства оптимальности полученного решения воспользуемся классическим методом Лагранжа. В качестве критерия введем норму нормализованных обобщенных скоростей

$$\min \|\dot{\bar{q}}\|_{Z_q^{-2}} = \min \left( \sqrt{\left(\frac{\dot{q}_1}{\dot{q}_{1\max}}\right)^2 + \left(\frac{\dot{q}_2}{\dot{q}_{2\max}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\dot{q}_n}{\dot{q}_{n\max}}\right)^2} \right). \quad (5.121)$$

Тогда задача локальной оптимизации сводится к нахождению минимума функции  $F = \dot{\bar{q}}^T Z_q^{-2} \dot{\bar{q}}$  при условии  $J\dot{\bar{q}} - \dot{\bar{x}} = 0$ .

Составим функцию Лагранжа:

$$F^* = \dot{\bar{q}}^T Z_q^{-2} \dot{\bar{q}} + \bar{\lambda} (J\dot{\bar{q}} - \dot{\bar{x}}),$$

где  $\bar{\lambda}$  – вектор  $(m \times 1)$  множителей Лагранжа.

Для нахождения условного экстремума функции  $F^*$  найдем производные и приравняем их к нулю:

$$\frac{\partial F^*}{\partial \dot{\bar{q}}} = 2Z_q^{-2} \dot{\bar{q}} + J^T \bar{\lambda} = 0; \quad (5.122)$$

$$\frac{\partial F^*}{\partial \bar{\lambda}} = J\dot{\bar{q}} - \dot{\bar{x}} = 0. \quad (5.123)$$

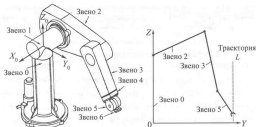


Рис. 5.15. Манипулятор "PUMA-560":

а – схема манипулятора; б – стержневая модель манипулятора

Из выражений (5.122) и (5.123) следует

$$\ddot{\lambda} = -2(JZ_0^{-2}J^T)^{-1} \dot{\lambda}. \quad (5.124)$$

Подставляя (5.124) в (5.122), имеем полученную ранее методом нормализованных переменных зависимость (5.120), что доказывает оптимальность найденного решения.

Проиллюстрируем вышесказанное на примере трехзвеного манипулятора, движущегося в плоскости вдоль заданной траектории. Данный манипулятор является избыточным для поставленной задачи движения, так как для ее выполнения достаточно двух степеней подвижности.

Для того чтобы порядок геометрических и кинематических параметров модели соответствовал характеристикам реальных манипуляторов, выберем в качестве основы модели манипулятор "PUMA-560". Если пятое звено этого робота расположить в плоскости второго и третьего, то данная группа звеньев будет образовывать плоский трехзвеник. Эквивалентное стержневое представление данной системы изображено на рис. 5.15.

Длины звеньев манипулятора принимаются соответственно для 2-, 3- и 5-го звеньев:  $l_2 = 0,434$  м,  $l_3 = 0,431$  м,  $l_5 = 0,297$  м.

Высота колонны (звена 0 на рис. 5.15, а) составляет  $H = 0,66$  м.

Значения максимальных скоростей приводов определены экспериментально [110]:  $\dot{q}_{2\max} = 1,5316$  рад/с;  $\dot{q}_{3\max} = 3,9016$  рад/с;  $\dot{q}_{5\max} = 9,3118$  рад/с.

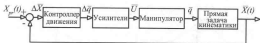


Рис. 5.16. Блок-схема системы управления манипулятора:

$\bar{X}_{pr}(t)$  – вектор положения рабочего органа, заданный программой движения;

$\bar{X}(t)$  – вектор, описывающий фактическое положение рабочего органа в данный момент времени;  $\Delta \bar{X} = \bar{X}_{pr}(t) - \bar{X}(t)$  – вектор операционной ошибки позиционирования;  $\bar{q}(t)$  – вектор обобщенных координат манипулятора;

$\bar{U}$  – вектор управляющих сигналов;  $\Delta \bar{q}$  – вектор ошибок приводов

Типичная система управления манипулятора может быть схематично представлена блок-диаграммой, представленной на рис. 5.16.

Контроллер движения выполняет преобразование вектора операционной ошибки позиционирования  $\Delta \bar{X}$ , определяемой в декартовой системе координат, в вектор ошибок приводов  $\Delta \bar{q}$  по формуле обращения, которая непосредственно следует из уравнения (5.114):

$$\Delta \bar{q} = J^{-1} \Delta \bar{X},$$

где  $J^{-1}$  – обратная матрица Якоби.

Для исследования предложенного подхода используется матрица Якоби в комбинации с весовой матрицей максимальных скоростей приводов:

$$\delta \bar{q} = Z_q J_n^s \delta \bar{x},$$

где  $J_n^s = Z_q J^T (J Z_q Z_q J^T)^{-1}$ .

Сравнение производится с классическим алгоритмом, описываемым следующим уравнением:

$$\delta \bar{q} = J^s \delta \bar{x},$$

где  $J^s = J^T (J J^T)^{-1}$ .

Модель усилителя с зоной насыщения представлена типовой системой уравнений:

$$v_i = \begin{cases} \delta q_i, & |\delta q_i| \leq \dot{q}_i \max, \\ \dot{q}_i \max \operatorname{sign}(\delta q_i), & |\delta q_i| > \dot{q}_i \max, \end{cases}$$

где  $v_i$  – напряжение, выдаваемое на обмотки  $i$ -го приводного двигателя.

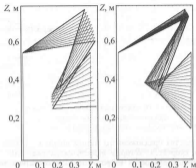


Рис. 5.17. Движение манипулятора вдоль программной траектории при различных методах управления: *a* – классический метод; *b* – метод нормализованных переменных

Модель динамики приводов манипулятора была представлена следующей упрощенной системой  $n$  независимых дифференциальных уравнений:

$$0,01\ddot{q}_i + 0,1\dot{q}_i = v_i, \quad (i = 1, \dots, n).$$

Траектория  $L$  конечной точки представляет собой отрезок прямой вертикальной линии (см. рис. 5.15), описываемой уравнением

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,4 - 1,5t \end{pmatrix}, \quad 0 < t < 0,3 \text{ с},$$

что соответствует равномерному прямолинейному движению схвата с постоянной скоростью 1,5 м/с. Начальная конфигурация манипулятора была выбрана таким образом, чтобы конечное звено составляло угол  $\pi/4$  с траекторией движения.

Приведенные ниже графики демонстрируют результаты моделирования. Как видно из рис. 5.17, при использовании предложенного метода управления манипулятор успешно проходит по заданной траектории с минимальной ошибкой позиционирования, график нормы которой показан на рис. 5.18 в сравнении с нормой ошибки, получающейся в результате применения классического метода.

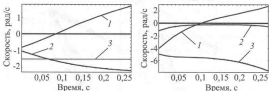


Рис. 5.18. Обобщенные скорости манипулятора при различных методах управления:

1 – скорость третьего звена; 2 – скорость второго звена; 3 – скорость пятого звена

Преимущества предложенного метода видны из анализа графиков обобщенных скоростей, которые приведены на рис. 5.19. Так, абсолютные значения скоростей второго привода оказались значительно меньше скоростей, получающихся при применении классического метода, где кривая скорости все время оказывалась за допустимой зоной и фактически переродилась в прямую линию из-за насыщения усилителя. Дополнительный анализ графиков показывает, что произошло это за счет более продуктивного использования возможностей приводов 3-го и 5-го звеньев: соответствующие скорости стали изменяться в гораздо более широких диапазонах.

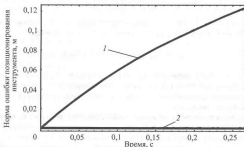


Рис. 5.19. Траекторная ошибка при различных методах управления:  
1 – классический метод; 2 – метод нормализованных переменных

## Глава 6

# УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГИЙ

---

Использование Интернет-технологий в мехатронике и робототехнике открывает новые перспективы в развитии распределенных систем управления и сбора данных. Задачи дистанционного мониторинга экспериментов и контроля удаленных технических систем с помощью Интернета могут быть выполнены с минимальными затратами практически в любой точке мира за счет широкого распространения и доступности глобальной сети [83].

Дистанционное управление мехатронными объектами с использованием Интернета подразумевает не только сбор данных при помощи информационно-измерительной аппаратуры, но и подачу управляющих воздействий на исполнительные элементы различных типов. Эта задача является, пожалуй, наиболее перспективной, но вместе с тем сложной для практической реализации. Анализ современных тенденций, а также ряда реально осуществленных проектов показывает, что Интернет является достаточно эффективным и удобным средством организации дистанционного управления техническими объектами, преимуществами которого являются:

- возможность организовать дистанционное управление реальными объектами и экспериментами практически из любой точки мира;
- снижение затрат на создание специализированных каналов связи;
- возможность организации доступа широкого круга специалистов-экспертов, территориально удаленных друг от друга, к уникальному оборудованию в режиме реального времени.

Перспективные области применения Интернет-робототехники:

- дистанционное управление в условиях агрессивной окружающей среды (мобильные роботы);
- астрономия (создание роботизированных автономных телескопов);
- дистанционное образование (создание виртуальных лабораторий удаленного доступа);
- удаленное управление роботизированными ячейками и системами;
- индустрия развлечений (виртуальные пилоты в музеи, соревнования по управлению Интернет-роботом и т.п.).

Применение роботов для проведения операций в труднодоступных и опасных средах выдвигает требования к созданию систем дистанционного управления мобильными роботами, использующих преимущества сети Интернет в качестве канала связи.

При использовании Интернета для целей дистанционного управления возникает целый ряд научно-технических проблем. Они связаны с оптимизацией взаимодействия web-сервера и системы управления роботом, необходимостью передачи больших объемов данных, нестабильностью удаленного соединения с оператором.

Таким образом, для эффективного использования перспектив, которые открывает применение глобальной сети в области управления техникой, необходимо разработать такой подход к ее использованию, который учитывал бы проблемы, обусловленные спецификой Интернета, как канала связи в системе дистанционного управления техническим объектом, а также специфику управляемого объекта.

При использовании глобальной сети как канала связи следует учитывать следующие важные факторы:

- ограничения по пропускной способности сети: приложение может потребовать передачи таких объемов данных и с такой скоростью, которые невозможно обеспечить с помощью Интернета;
- временные задержки, верхняя граница которых непредсказуема и зависит от качества удаленного соединения;
- флуктуация времени задержки в широких пределах, связанной с изменением загрузки сети во времени;
- возможность потери отдельных пакетов передаваемых данных при переполнении входных буферов промежуточных серверов, через которые проходят данные.

Проведенный анализ показывает, что для правильного подхода к решению проблем использования Интернета для управления необходимо знать параметры временной задержки и вероятность потери пакетов данных, т.е. необходимо сформировать модель сегмента Интернета. В зависимости от местонахождения оператора может меняться трассировка маршрута к серверу робота, содержащая различное число промежуточных серверов с неопределенными временами переходов и разной степенью загрузки этих серверов.

Представив Интернет как "черный ящик", характеристики модели которого неизвестны, с помощью программных средств был проведен эксперимент по измерению в течение длительного времени передачи тес-

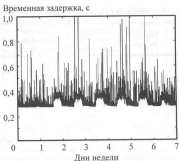


Рис. 6.1. Вариации временной задержки при передаче данных по сети Интернет

товых пакетов данных к удаленному серверу управляемого робота и обратно в отдельно взятом сегменте сети Интернет. С помощью модифицированной ping-процедуры, посылающей ICMP-пакеты (Internet Control Message Protocol) по 32 байта с частотой 100 Гц и записывающей время передачи в log-файл, был построен график, показывающий вариации временной задержки в течение двух недель (рис. 6.1).

Используя полученные в результате эксперимента данные, по методике предложенной в [81], определена пропускная способность сети и верхний предел полосы передаваемого сигнала. Повышение частоты сигнала увеличивает производительность системы, однако при этом из-за высокой загрузки сети возрастают временные задержки и повышается вероятность потери пакетов данных.

Некоторые данные, позволяющие составить представление о проблемах, возникающих при передаче данных по Интернету на различные расстояния, представлены в табл. 6.1.

Робототехническая система с управлением по глобальной сети должна удовлетворять ряду основных практических требований:

- робот не должен быть поврежден или приведен в неисправное состояние в результате вариаций временной задержки, возникающей при передаче данных по Интернету;



## 6.1. Средний задержка при передаче данных по Интернету

Хост	Расстояние, км	Среднее значение задержки, мс	Среднее квадратическое отклонение	Потери пакетов данных, %
Локальная сеть	0,05	0,998	0,715	0
Тот же домен	30	8,10	5,35	0,08
Другой город	150	17,20	9,74	0,80
Другой континент	10 000	326,3	27,20	41,4

- влияние изменения загруженности сети на работу оператора и качество его взаимодействия с роботом должно быть сведено к минимуму;

- для эффективного использования робота при инспекции объектов частота обновления передаваемого изображения с телевизионной камеры, установленной на роботе, должна быть максимально возможной;

- для улучшения взаимодействия оператора с роботом web-сервер должен обеспечивать "дружелюбный" человеко-машинный интерфейс.

Для того чтобы отвечать первому требованию, система управления должна обладать высокой степенью интеллектуальности, позволяющей осуществлять:

- самонастройку системы на параметры Интернет-соединения (средняя скорость передачи данных, вероятность потери данных и т.д.);

- прогноз возникновения критических ситуаций, на которые оператор не сможет адекватно отреагировать из-за временных ограничений на передачу управляющих воздействий;

- автоматическое отключение или переход в режим ожидания при потере управляющих воздействий от оператора.

Для уменьшения влияния загруженности сети на работу оператора необходимо уделить достаточное внимание оптимизации объема передаваемой по сети информации. Дополнительно улучшить взаимодействие оператора с роботом можно за счет разработки человеко-машинного интерфейса, однако при этом необходимо учитывать, что его создание осложнено спецификой и форматами, используемыми в сети Интернет.

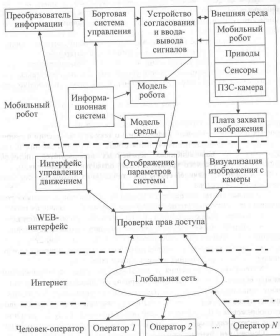


Рис. 6.2. Обобщенная схема системы дистанционного управления мобильным роботом по сети Интернет

Обобщенная схема системы управления мобильным роботом по глобальной сети представлена на рис. 6.2.

По этой схеме можно организовать эффективное управление мобильными роботами в различных условиях внешней среды с использованием коммуникационного ресурса Интернета и удобным пользовательским web-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 человеко-машинного интерфейса системы, в команды для тактического уровня управления.

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

Интерфейс управления движением предоставляет оператору возможность подавать такие унифицированные команды верхнего уровня с помощью 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, и 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 отстывает 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 (GPIB) 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 операций 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, C++, Pascal, Visual Basic), скомпилированных 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.



Рис. 6.3. Панель управления мобильным роботом "ИРИС-1"

Решающими аргументами в пользу LabVIEW при выборе средства разработки являлись 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 Toolkit" встроенного G web-сервера – базисного компонента, позволяющего на его основе разрабатывать интернет-приложения.

Программы в языке G принято называть виртуальными приборами – VI (virtual instrument – англ.). Программа состоит из диаграммы и лицевой панели виртуального прибора. Оператор имеет возможность изменять значения переменных, определяющих скорость робота, направление движения и т.д., нажимая на кнопки и переключатели, поворачивая регуляторы на лицевой панели виртуального прибора (рис. 6.3).

Программа написана на графическом языке программирования, а потому представляет собой блок-диаграмму. На рис. 6.4 представлен фрагмент диаграммы программы, управляющей движением робота. Данная программа имеет высокую степень вложенности – большое число

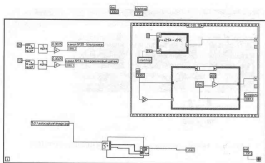


Рис. 6.4. Фрагмент программы управления мобильным роботом в среде графического программирования LabVIEW

подпрограмм – виртуальных подприборов. Каждый из них выполняет определенный набор функций и для каждого строго определены входные и выходные параметры. Соединения между функциональными блоками отражают потоки данных при работе программы, а объединение нескольких функциональных блоков в "рамки" – отражает использование таких структур, как циклы, последовательности, case-структуры.

Использование среды LabVIEW при разработке управляющей программы позволило за счет подключения внешних библиотек обеспечить работу с многофункциональной платой ввода-вывода Lcard-650. Таким образом, переменные определяют изменение сигнала на выходе ЦАП платы и управляют переключением цифровых линий. Оператору также предоставляется возможность изменять параметры АЦП (частоту дискретизации, номера опрашиваемых каналов и т.п.) и наблюдать показания датчиков в виде графиков, стрелочных и световых индикаторов на лицевой панели.

Серверная часть состоит из исполняемого модуля, решающего основные задачи обработки данных, поступающих от оператора, обращения к управляющей роботом программе и формирования ответа в формате HTML. Как было отмечено выше, такой модуль называется CGI-модулем и реализуется на базе технологии общего интерфейса маршрутизации.

Для реализации взаимодействия клиент–сервер важно, какой метод HTTP-запроса использует клиентская часть при обращении к web-серверу. В общем случае запрос – это сообщение, посылаемое клиентом серверу. Первая строка HTTP-запроса включает в себя: метод, который должен быть применен к запрашиваемому ресурсу, идентификатор ресурса (URI-Uniform Resource Identifier) и используемую версию HTTP-протокола. В рассматриваемом случае клиентская часть применяет методы запроса POST и GET.

Метод POST используется для запроса серверу, чтобы тот принял информацию, включенную в запрос, как относящуюся к ресурсу, указанному идентификатором ресурса. Метод GET используется для получения любой информации, идентифицированной идентификатором ресурса в HTTP-запросе. CGI определяет 4 информационных потока: переменные окружения, стандартный входной поток, стандартный выходной поток.

На рис. 6.5–6.8 показаны модули, предназначенные для обработки и преобразования сенсорной информации, поступающей от системы технического зрения, ультразвуковых и микроволновых датчиков, а также угловых датчиков колес мобильного робота.

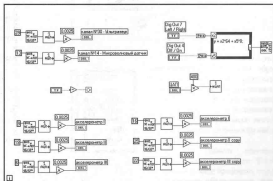


Рис. 6.5. Диаграмма блока обработки сигналов с ультразвуковых и микроволновых датчиков



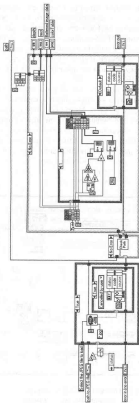


Рис. 6.6. Диаграмма блока чтения изображения с камеры мобильного робота

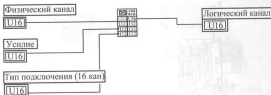


Рис. 6.7. Диаграмма блока преобразования данных с датчиков

Для создания человеко-машинного интерфейса – клиентской части системы управления – необходимо создать HTML-документ, в котором реализован интерфейс с оператором. В языке HTML это возможно посредством форм. При их разработке использована встроенная возможность LabVIEW по опубликованию в виде HTML лицевой панели виртуального инструмента.

В ходе экспериментальных исследований было осуществлено подключение аппаратной части, а также разработано программное обеспечение системы дистанционного управления мобильным роботом с использованием сети Интернет. Общий вид системы представлен на рис. 6.9.

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 обновляемой веб-странице на мониторе оператора. Реализована также передача видеозображения с камеры.

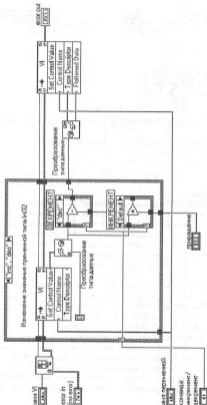


Рис. 6.8. Диаграмма блока обработки сигналов с угловых датчиков колес мобильного робота



Рис. 6.9. Управление мобильным роботом "ИРИС-1" по сети Интернет

При этом обработка навигационных переменных, а также параметров текущего состояния робота осуществляется на управляющем компьютере в рамках работы управляющей программы независимо от оператора и временной задержки сети Интернет. Таким образом, в случае возникновения критического режима работы аварийный останов робота произойдет автоматически по сигналу управляющей программы.

## Приложение

### РЕШЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ДВУХЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА ТИПА "SCARA"

---

При анализе свойств и разработке алгоритмов управления многостепенными мехатронными системами требуется решение четырех основных кинематических задач:

- прямой задачи о положении;
- обратной задачи о положении;
- прямой задачи о скорости;
- обратной задачи о скорости.

Рассмотрим методику их решения на примере двухзвеного манипулятора типа "SCARA", представленного на рис. 1.14.

#### 1. ПРЯМАЯ ЗАДАЧА О ПОЛОЖЕНИИ ДВУХЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

Прямая задача о положении состоит в определении декартовых координат  $(x, y)$  характеристической точки  $P$  манипулятора по заданным обобщенным координатам  $(q_1, q_2)$  многозвеного механизма.

Решение этой задачи используется при построении рабочей зоны манипулятора (п. 1.2). Также полученная система уравнений является исходной для решения последующих кинематических задач. Полученное решение представляет собой совокупность двух нелинейных функций, которые устанавливают связь между обобщенными и декартовыми координатами манипулятора:

$$\begin{cases} x = L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2); \\ y = L_1 \sin q_1 + L_2 \sin(q_1 + q_2). \end{cases} \quad (1)$$

## 2. ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА О ПОЛОЖЕНИИ ДВУХЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

Решим систему алгебраических уравнений (1) относительно обобщенных координат  $(q_1, q_2)$ . Введенные дополнительные переменные  $r, \alpha, \beta$  представлены на рисунке.

По теореме косинусов имеем для треугольника  $OPA$ :

$$r^2 = x^2 + y^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 \cos \beta. \quad (1)$$

Отсюда определяем значение угла  $\beta$ . Учитывая, что угол  $q_2 = \pi - \beta$ , получаем выражение для второй обобщенной координаты:

$$q_2 = \pm \arccos \left( \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right). \quad (2)$$

По теореме синусов определим синус угла  $\alpha$ :

$$\sin \alpha = \frac{L_2}{r} \sin q_2 = \pm \frac{L_2}{r} \sqrt{1 - \cos^2 q_2}. \quad (3)$$

Подставим найденное выражение (2) в формулу (3):

$$\sin \alpha = \pm \frac{L_2}{r} \sqrt{1 - \left[ \frac{r^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right]^2}.$$

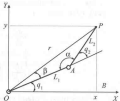
Из прямоугольного треугольника  $OPB$  имеем

$$\operatorname{tg}(\alpha + q_1) = \frac{y}{x}.$$

Тогда получаем следующее выражение для первой обобщенной координаты:

$$q_1 = \pm \operatorname{arctg} \left( \frac{y}{x} \right) - \alpha = \pm \operatorname{arctg} \left( \frac{y}{x} \right) \pm \arcsin \left( \frac{L_2}{r} \sqrt{1 - \left[ \frac{r^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right]^2} \right), \quad (4)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$ .



Найденное решение (2), (4) обратной задачи о положении для двухзвенного манипулятора требует вычисления обратных тригонометрических, степенных и дробных функций. Решение является неоднозначным, в особых конфигурациях возникает неопределенность.

### 3. Прямая задача о скорости двухзвенного манипулятора

Прямая задача о скорости состоит в определении вектора скорости рабочего органа в декартовой системе координат по заданным обобщенным координатам звеньев.

Для решения поставленной задачи продифференцируем по времени систему уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial x}{\partial q_1} \frac{dq_1}{dt} + \frac{\partial x}{\partial q_2} \frac{dq_2}{dt}; \\ \frac{dy}{dt} = \frac{\partial y}{\partial q_1} \frac{dq_1}{dt} + \frac{\partial y}{\partial q_2} \frac{dq_2}{dt}. \end{cases} \quad (5)$$

Полученную систему представим в матричной форме:

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = J \frac{d\vec{q}}{dt}, \quad (6)$$

где  $\frac{d\vec{X}}{dt} = \text{col} \left( \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right)$  – вектор-столбец декартовых скоростей рабочего органа;  $\frac{d\vec{q}}{dt} = \text{col} \left( \frac{dq_1}{dt}, \frac{dq_2}{dt} \right)$  – вектор-столбец обобщенных скоростей манипулятора;  $J$  – матрица Якоби размерности  $(2 \times 2)$ .

Элементами матрицы Якоби являются соответствующие частные производные, входящие в выражения (5):

$$J = \begin{bmatrix} -L_1 \sin q_1 - L_2 \sin(q_1 + q_2) & -L_2 \sin(q_1 + q_2) \\ L_1 \sin q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2) & L_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Элементы матрицы Якоби зависят от длин звеньев и значений обобщенных координат, определяющих текущую информацию манипулятора.

Из выражения (6) следует связь между приращениями декартовых и обобщенных координат, которая приведена в формуле (2):

$$d\vec{X} = J \cdot d\vec{q}. \quad (8)$$

#### 4. Обратная задача о скорости двухзвенного манипулятора

Для аналитического определения обратной матрицы Якоби следует выполнить следующие действия:

1. Найти транспортированную матрицу Якоби, которая получается из прямой матрицы путем замены ее строк на столбцы:

$$J^T = \begin{bmatrix} -L_1 \sin q_1 - L_2 \sin(q_1 + q_2) & L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2) \\ -L_2 \sin(q_1 + q_2) & L_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}.$$

Примечание. Обратная матрица также использовалась для статического анализа и составления динамических моделей в гл. 5.

2. Составить матрицу алгебраических дополнений для транспортированной матрицы Якоби:

$$A = \begin{bmatrix} L_2 \cos(q_1 + q_2) & L_2 \sin(q_1 + q_2) \\ -L_1 \cos q_1 - L_2 \cos(q_1 + q_2) & -L_1 \sin q_1 - L_2 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}.$$

3. Найти определитель матрицы Якоби:

$$D = \det J = L_1 L_2 \sin q_2.$$

4. Определить обратную матрицу Якоби как отношение матрицы алгебраических дополнений  $A$  и определителя  $D$ :

$$J^{-1} = \frac{A}{D} = \frac{1}{L_1 L_2} \times \begin{bmatrix} L_2 \cos(q_1 + q_2) & L_2 \sin(q_1 + q_2) \\ -L_1 \cos q_1 - L_2 \cos(q_1 + q_2) & -L_1 \sin q_1 - L_2 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}.$$

5. Проверить, что в результате умножения прямой матрицы на обратную матрицу получается единичная матрица:

$$J \cdot J^{-1} = E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1987.
2. Аквинс М.А., Гольдберг В.В. Тензорное исчисление. М.: Наука, 1972.
3. Аршавский М.М. Мехатронные технологии обработки материалов резанием // Мехатроника. 2000. № 1.
4. Афонин В.Л. Обрабатывающее оборудование с элементами искусственного интеллекта // Проводная техника. 2003. № 4.
5. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1969.
6. Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. М.: Радио и связь, 1985.
7. Балашов Е.П., Пузанков Д.В. Проектирование информационно-управляющих систем. М.: Радио и связь, 1987.
8. Беллман Р. Введение в теорию матриц. М.: Наука, 1969.
9. Бочаров Л.Ю., Сигов А.С. Перспективы развития инерциальных навигационных систем на основе MEMS-технологий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 4.
10. Бродовский В.Н., Баранов М.В., Илюхин Ю.В. Мехатронный приводной модуль поступательного перемещения для технологических машин // Мехатроника. 2000. № 4.
11. Введение в мехатронику. Учебное пособие / Под ред. А.К. Тугенгольда. 2-е изд. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2002.
12. Востриков А.С., Боченков Б.М. Опыт разработки мехатронных систем в НГТУ // Мехатроника. 2000. № 5.
13. Гончарский Л.А. Механически управляемые электронные лампы. М. Л.: Госэнергоиздат, 1957.
14. Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования. Направление подготовки дипломированного специалиста 652000 – Мехатроника и робототехника / Министерство образования РФ. М., 2000.
15. Демидов С.В., Зомба Г.А., Коноша В.П. Мехатронные обрабатывающие центры на базе мехатронных модулей вращения // Проводная техника. 2003. № 4.
16. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / Под ред. В.С. Кулешова. М.: Машиностроение, 1986.
17. Егоров О.Д., Подурьев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: Учебник. М.: МГТУ "СТАНКИН", 2004. 360 с.
18. Ермолов И.Л., Лысенко О.И., Подурьев Ю.В. Математические модели "робот-рабочий орган-инструмент-рабочий процесс" в системе автоматизированного программирования промышленных технологических роботов // Мехатроника. 2002. № 2.
19. Ермолов И.Л., Мор Ф.Р., Подурьев Ю.В., Шведов В.В. Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов: современное состояние и перспективы развития // Мехатроника. 2000. № 1.

20. Илюхин Ю.В. Совершенствование систем управления механособирательными технологическими роботами на основе концепций мехатроники // Мехатроника. 2001. № 2.
21. Илюхин Ю.В. Создание высокоэффективных систем управления исполнительными движениями роботов и мехатронных устройств на основе технологически обусловленного метода синтеза: Дис... д-ра техн. наук. М.: МГТУ "СТАНКИН", 2001.
22. Илюхин Ю.В., Подураев Ю.В. Проектирование исполнительных систем роботов. Линеаризованные системы. М.: Изд-во МПИ, 1989.
23. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.
24. Каган В.Г. 50, 40, 30, 20, 10 лет спустя. 2-е изд. М.: РАСХН, 2003.
25. Казмиренко В.Ф. Электрогидравлические мехатронные модули движения. М.: Радио и связь, 2001.
26. Карлов К.Р., Подураев Ю.В., Рытов О.В. Открытая система управления робототехническим комплексом лазерной резки // Тех. докл. конф. "Информационные средства и технологии". Т. 2. М., 1996. С. 126–130.
27. Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения. М.: Экономика, 2002.
28. Корнев Г.В. Целенаправленная механика управляемых манипуляторов. М.: Наука, 1979.
29. Крайнев А.Ф. Механика машин: Фундаментальный словарь. М.: Машиностроение, 2000.
30. Кузелин М. ПЛИС фирмы Xilinx с архитектурой FPGA // CHIP News. 2002. № 1.
31. Кулешов В.С., Лакота Н.А. Динамика систем управления манипуляторами. М.: Энергия, 1971.
32. Кулешов В.С., Подураев Ю.В., Ермолов И.А. Первый выпуск дипломированных инженеров по специальности "Мехатроника" // Мехатроника. 2001. № 5.
33. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматлит, 1961.
34. Манипуляционные системы роботов / Под ред. А.И. Корендюкова. М.: Машиностроение, 1989.
35. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. М.: Наука, 1978.
36. Мехатроника / Под ред. Т. Исин. М.: Мир, 1988.
37. Мехатронные технологические системы: концепция проектирования и применения в современном машиностроении // Приводная техника. 2003. № 4.
38. Митрофанов В.Г., Саломеничев Ю.М. Вопросы создания компьютеризированных интегрированных производств // Мехатроника. 2000. № 1.
39. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем. М.: Советское радио, 1977.
40. Николле Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. М.: Мир, 1989.

41. Новые методы управления сложными системами. М.: Наука, 2004.
42. Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1980.
43. Оелтндер Д.М., Риджели Дж.Р., Рингтенберг Дж.Д. Управляющие программы для механических систем. М.: БИНОМ, 2004.
44. Основы проектирования следящих систем / Под ред. Н.А. Лакоты. М.: Машиностроение, 1978.
45. Парс Л.А. Аналитическая динамика. М.: Наука, 1971.
46. Подураев В.Н., Кивальченко А.В. Технология оборонной промышленности для производства изделий народного потребления. М.: Изд-во Росконверсия, 1993.
47. Подураев Ю.В. Анализ и проектирование мехатронных систем на основе критерия функционально-структурной интеграции // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2002. № 4.
48. Подураев Ю.В. Контурное управление и моделирование движения манипуляционных роботов на основе динамических моделей в римановом пространстве // Известия РАН. Техническая кибернетика. 1993. № 3. С. 191–200.
49. Подураев Ю.В. Основы мехатроники: Учеб. пособие. М.: МГТУ "СТАНКИН", 2000.
50. Подураев Ю.В. Результаты моделирования и экспериментальных исследований динамических характеристик манипулятора РИМА-560 // Известия РАН. Техническая кибернетика. 1993. № 4. С. 166–182.
51. Подураев Ю.В., Кулешов В.С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1.
52. Подураев Ю.В., Логинюв А.В. Проектирование систем компьютерного управления для манипуляционного робота РИМА-560 на основе критерия функционально-структурной интеграции // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2003. № 1.
53. Подураев Ю.В., Логинюв А.В. Синергетические математические модели многомерных мехатронных систем и их использование в задачах планирования и оптимизации движений манипуляционных роботов // Мехатроника. 2001. № 1. С. 2–9.
54. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978.
55. Разработка и освоение производства мехатронных модулей движения и других узлов для производственных машин. М.: НИЦ "Мехатроника" – НПО "ЭНИМС", 2000.
56. Руденко В.Н. Планетарные и волновые передачи. М.: Машиностроение, 1980.
57. Самоподнастраивающиеся станки / Под ред. Б.С. Балакшина. М.: Машиностроение, 1967.
58. Сидоркин Н.А., Ястребов С.И. Робототехнические комплексы и дистанционно-управляемые системы // Технология машиностроения. 2000. № 5.
59. Синдж Дж.Л. Тензорные методы в динамике. М.: Иностран. лит., 1947.

60. Сироткин О.С., Подураев Ю.В., Богачев Ю.П. Мехатронные технологические машины в машиностроении. Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2003. № 4.
61. Смирнов А.Б. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами. СПб., 2003.
62. Сокольников И.С. Тензорный анализ. М.: Наука, 1971.
63. Соломенцев Ю.М., Кулешов В.С., Подураев Ю.В. Развитие мехатроники и робототехники в Московском государственном технологическом университете "Станкин" // Мехатроника. 2001. № 2.
64. Сосонкин В.Л., Мартинев Г.М. Концепция числового программного управления мехатронными системами: архитектура типа PCNC // Мехатроника. 2000. № 1.
65. Теория и проектирование следящих приводов / Под ред. Б.К. Чемоданова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
66. Ульянов С.А. Лектор в высшей школе. М. МЭИ, 1969.
67. Флоренцев С.И. Силовые IGBT-модули – основа современного преобразовательного оборудования // Электронные компоненты. № 6. 2002.
68. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989.
69. Хори Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989.
70. Цыганки Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968.
71. Чельшев В.А. "Вездеход" и "Варан" уже в серии // Военный парад. 2004. № 4.
72. Шалобаев Е.В. К вопросу об определении мехатроники и иерархии мехатронных объектов // Датчики и системы. 2001. № 7.
73. Шомло Я., Подураев Ю.В., Луканин В.С., Соколов А.Г. Автоматическое планирование и управление контурными движениями манипуляционных роботов // Мехатроника. 2001. № 3.
74. Шомло Я., Подураев Ю.В., Луканин В.С., Соколов А.Г. Автоматическое планирование и управление контурными движениями манипуляционных роботов // Мехатроника. 2001. № 3. С. 28–33.
75. Юренич Е.И. Мехатроника как одна из концептуальных основ интеллектуальной техники нового поколения // Тр. конф. "Мехатроника. Автоматизация. Управление". Владимир, 2004.
76. Юренич Е.И. Робототехника: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001.
77. Ющенко А.С., Подураев Ю.В. Адаптивные робототехнологические комплексы для механической обработки и сборки: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
78. An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology // Sensor technology and Design. 2003. February.
79. Asada H. Dynamic Analysis and Computer-Aided Design of Robot Manipulators // Proc. IFAC 9-th World Congress. Budapest, 1984. P. 557–562.

80. Astanin V., Bogachev J., Duyunov A., Smotritsky G. Hexamech-1 Machining Centre for Aerospace Industry // Proc. of the 4-th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, April 20–21, 2004.
81. Bolot J. End-to-end packet delay and loss behavior in the Internet // SIGCOMM93. Ithaca – N.Y., 1993. P. 289–298.
82. Bolton W. *Mechatronics*. 3-rd ed. N.Y.: Addition-Wesley Longman Ltd, 2003.
83. Ermolov L.L., Levenkov A.V., Poduraev J.V. Internet Control of Mobile Robots for Pipe Inspection // Repair Preprints of the 4-th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT), University of Patras, Greece, September, 2002.
84. Eviduomwan N. F. O., Sivaloganathan S., Jebb A. A survey of design philosophies, models, methods and systems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. B4, N 210, P. 301–320.
85. *Factory Automation Journal*. Special issue. Hannover, 2000.
86. Harashina F., Tomizuka M., Fukuda T. *Mechatronics – “What Is It, Why and How?”* // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 1996. Vol. 1. N 1.
87. Heimann B., Gerth W., Popp K. *Mechatronik*. 2-nd. ed. Leipzig: Fachbuchverlag, 2003.
88. Holtz J. *Sensorless Speed and Position Control of Induction Motor Drives*. IECON Roanoke VA, 2003.
89. <http://www.mrcas.ri.cmu.edu/>
90. Kerkman R.J., Skibinski G.L. and Schlegel D.W. AC Drives: Year 2000 (Y2K) and Beyond // Proceedings of IEEE – APEC '99 Conference, March 14–18, 1999.
91. Khatib O. Inertial Properties in Robotic Manipulations: An Object-Level Framework // The International Journal of Robotics Research. 1995. Vol. 13, No 1. P. 19–36.
92. Kyura N., Oho H. *Mechatronics – An Industrial Perspective* // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 1996. Vol. 1. № 1.
93. Loginov A., Poduraev J. A New Approach to the Analysis and Control of Constrained Robot Manipulator Systems // Proceedings of the ASI'99 ICIMS-NoE Conference "Life Cycle Approaches to Production System: Management, Control, Supervision", Leuven, Belgium, 1999.
94. Mahalik N.P. *Mechatronics*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2003.
95. *Mechatronics* / Ed. by J.R. Hewit. Berlin: Springer – Verlag, 1993.
96. [media@rsuh.ru](mailto:media@rsuh.ru)
97. *Packaging Digest*. August, 2002.
98. *Parallel Kinematics: Проектирование кинематических станков и прессов*. Кеманн (Германия), 2004.
99. Poduraev J., Somlo J. A New Approach to the Contour Following Problem in Robot Control (Dynamic Model in Riemann Space) // *Mechatronics*. 1993. Vol. 3, No 2. P. 241–263.
100. Poduraev J.V., Somlo J. A new approach to the contour following problem in robot control // Proc. of Intern. Symposium on Industrial Robots. Barcelona: Pergamon Press, 1992. P. 285–291.

101. **Product Overview: GH-800 Motion Controller.** Google Technology (HK) Ltd, 2003.
102. **Saridis G.N.** What is the Future of Automatic Control Systems // *Proc. of the 2000 IEEE Intern. Symposium on Intelligent Control*, Patras, Greece, July 2000.
103. **Schwaar M., Jachnert T., Ihlenfeldt S.** 5-Sided Manufacturing with Re-configurable PKMs // *Proc. of the 4-th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar*, April 20–21, 2004.
104. **Shetty D., Kolk R.A.** *Mechatronics Systems Design: International Thompson Publications.* Boston: Brooks Cole, 1998.
105. **Sierota A., Shetty D.** New Interpretation of Mechatronics – A Solution for Education and Labour Market // *Intern. Conf. on Mechatronics*. Turkey, May 2004.
106. **Sokolov A., Somlo J., Poduraev J.** Theoretical and Experimental Investigations of Time-optimal Contour Motions of Redundant Robots // *Proc. of the ASI99 ICIMS-NoE Conference "Life Cycle Approaches to Production System: Management, Control, Supervision"*. Bordeaux, 2000.
107. **Somlo J., Erdos G., Loginov A., Sokolov A., Toth S.** Experimental, Lab-VIEW Based, Fifth Generation Robot Control // *Proceedings of MicroCAD'99*, Miskolc, Hungary, 1999.
108. **Somlo J., Lantos B., Cat P.T.** *Advanced Robot Control.* Budapest: Akademiai Kiado, 1997.
109. **Somlo J., Poduraev J.** Optimal cruising trajectory planning for robots // *Mechatronics*. 1994. Vol. 4. N 5. P.517–538.
110. **Somlo J., Poduraev J., Kojokaron A., Loginov A.** Velocity and torque constrained time-optimal robot motion planning // *Proc. Int. Computer Science Conf. MicroCAD'97*. Miskolc, 1997.
111. **Somlo J., Poduraev J.V.** Trajectory planning for the robot motion optimization (How to schedule robotised processes) // *Proc. of the 1994 Japan–U.S.A. Symposium on Flexible Automation*. 1994. P. 1359–1367.
112. **Using the ADSP-2100 Family** // *Analog Devices*. 2004. Vol. 1–2.
113. **Van den Doel K.** Performance Measures for Robot Manipulators: A Unified Approach // *The Intern. Journal of Robotics Research*. 1996. Vol. 15. N 1. P. 92–111.
114. **Whitney D.E.** Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses // *IEEE Trans. Man–Machine Sys.* 1969. MMS-10, N 2. P. 47–53.
115. **Wong C.B., Chen X., Pu J. et al.** CRC: A Process for Control System Architecture Design // *Proc. of Intern. Conf. on Mechatronics*, Twente, 2002.
116. **Yoshikawa T.** Manipulability and redundancy control of robot mechanisms // *Proc. 24-th IEEE Conf. Decision and Control*. 1985. P. 1004–1005.
117. **Zisler A., Pagenstert K.** From 0 to 2000 Axles in Six Months: A Report on the BMW Implementation Experience with the Parallel Kinematic Machining of Axles // *Proc. of the 4-th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar*, April 20–21, 2004.

Учебное издание

**Подураев Юрий Викторович**

## **МЕХАТРОНИКА: ОСНОВЫ, МЕТОДЫ, ПРИМЕНЕНИЕ**

Редактор *Е.Д. Макаренко*  
Художественный редактор *Т.Н. Галицына*  
Технический редактор *Г.Ю. Коробельникова*  
Корректор *С.В. Сидоренко*

Подписано в печать 22.03.2007 г.

Формат 60 × 88 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,68. Уч.-изд. л. 16,0.

Тираж 1000 экз. Заказ 610

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство "Машиностроение",  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4.  
[www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

Оригинал-макет изготовлен в ООО "Издательство Машиностроение-1"

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленного оригинал-макета в ГУП ШПП "Типография "Наука" РАН,  
121099, Москва, Шубинский пер., 6



