



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

ОСНОВЫ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

Пособие
по одноименной дисциплине
для магистрантов специальности
1–53 81 03 «Автоматизация и управление
в технических системах»
дневной и заочной форм обучения

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2018

УДК 62-83-521:621.865.8(075.8)
ББК 32.996+31.291я73
О-75

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 9 от 30.05.2016 г.)*

Составитель: В. А. Савельев

Рецензент: доц. каф. «Промышленная электроника» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *Е. А. Храбров*

О-75 **Основы** мехатроники и робототехники : пособие по одноим. дисциплине для магистрантов специальности 1-53 81 03 «Автоматизация и управление в технических системах» днев. и заоч. форм обучения / сост. В. А. Савельев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого», 2018. – 51 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-388-2.

Рассмотрены общие принципы построения мехатронных систем, их область применения, особенности построения мехатронных модулей движения, проблематика и методика управления мехатронными системами.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

УДК 62-83-521:621.865.8(075.8)
ББК 32.996+31.291я73

ISBN 978-985-535-388-2

© Савельев В. А., 2018
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2018

1. Общие принципы построения и области применения мехатронных и робототехнических систем

1.1. Концепция построения мехатронных систем. Определения и терминология мехатроники

Современный термин «мехатроника» («mechatronics») был введен в 1969 г. Это название получено комбинацией слов «МЕХАника» и «элекТРОНИКА». Мехатроника – это 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.

В мехатронных системах укрупненно принято выделять три составные части – механическую, электронную и компьютерную, объединение которых и образует систему в целом (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Компоненты мехатронных систем

Мехатроника изучает синергетическое объединение узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых модулей, систем, машин и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

К основным преимуществам мехатронных устройств по сравнению с традиционными средствами автоматизации следует отнести:

– относительно низкую стоимость благодаря высокой степени интеграции, унификации и стандартизации всех элементов и интерфейсов;

– высокое качество реализации сложных и точных движений вследствие применения методов интеллектуального управления;

– высокую надежность, долговечность и помехозащищенность;

– конструктивную компактность модулей (вплоть до миниатюризации в микромашинах);

– улучшенные массогабаритные и динамические характеристики машин вследствие упрощения кинематических цепей;

– возможность комплексирования функциональных модулей в сложные мехатронные системы и комплексы под конкретные задачи заказчика.

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

– станкостроение и оборудование для автоматизации технологических процессов;

– робототехника (промышленная и специальная);

– авиационная, космическая и военная техника;

– автомобилестроение (например, антиблокировочные системы тормозов, системы стабилизации движения автомобиля и автоматической парковки);

– нетрадиционные транспортные средства (электровелосипеды, грузовые тележки, электророллеры, инвалидные коляски);

– офисная техника (например, копировальные и факсимильные аппараты);

– элементы вычислительной техники (например, принтеры, плоттеры, дисководы);

– медицинское оборудование (реабилитационное, клиническое, сервисное);

– бытовая техника (стиральные, швейные, посудомоечные и другие машины);

– микромашины (для медицины, биотехнологии, средств связи и телекоммуникации);

– контрольно-измерительные устройства и машины;

– фото- и видеотехника;

– тренажеры для подготовки пилотов и операторов;

– шоу-индустрия (системы звукового и светового оформления).

В качестве основного классификационного признака в мехатронике представляется целесообразным принять уровень интеграции

составляющих элементов. В соответствии с этим признаком можно разделять мехатронные системы по уровням или по поколениям, если рассматривать их появление на рынке наукоемкой продукции исторически.

Мехатронные модули первого уровня представляют собой объединение только двух исходных элементов. Типичным примером модуля первого поколения может служить «мотор-редуктор», где механический редуктор и управляемый двигатель выпускаются как единый функциональный элемент. Мехатронные системы на основе этих модулей нашли широкое применение при создании различных средств комплексной автоматизации производства (конвейеров, транспортеров, поворотных столов, вспомогательных манипуляторов).

Мехатронные модули второго уровня появились в 80-х гг. в связи с развитием новых электронных технологий, которые позволили создать миниатюрные датчики и электронные блоки для обработки их сигналов. Объединение приводных модулей с указанными элементами привело к появлению мехатронных модулей движения, состав которых полностью соответствует введенному выше определению, когда достигнута интеграция трех устройств различной физической природы: механических, электротехнических и электронных. На базе мехатронных модулей данного класса созданы управляемые энергетические машины (турбины и генераторы), станки и промышленные роботы с числовым программным управлением.

Развитие третьего поколения мехатронных систем обусловлено появлением на рынке сравнительно недорогих микропроцессоров и контроллеров на их базе и направлено на интеллектуализацию всех процессов, протекающих в мехатронной системе, в первую очередь – процесса управления функциональными движениями машин и агрегатов. Одновременно идет разработка новых принципов и технологий изготовления высокоточных и компактных механических узлов, а также новых типов электродвигателей (в первую очередь высокомоментных, бесколлекторных и линейных), датчиков обратной связи и информации. Синтез новых прецизионных, информационных и измерительных наукоемких технологий дает основу для проектирования и производства интеллектуальных мехатронных модулей и систем.

В дальнейшем мехатронные машины и системы будут объединяться в мехатронные комплексы на базе единых интеграционных платформ. Цель создания таких комплексов – добиться сочетания высокой производительности и одновременно гибкости технико-

технологической среды за счет возможности ее реконфигурации, что позволит обеспечить конкурентоспособность и высокое качество выпускаемой продукции на рынках XXI века.

1.2. Структура и принципы интеграции мехатронных систем

В состав традиционной машины входят следующие основные компоненты:

- механическое устройство, конечным звеном которого является рабочий орган;
- блок приводов, включающий силовые преобразователи и исполнительные двигатели;
- устройство компьютерного управления, верхним уровнем для которого является человек-оператор, либо другая ЭВМ, входящая в компьютерную сеть;
- сенсоры, предназначенные для передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии блоков машины и движении мехатронных систем.

Таким образом, наличие трех обязательных частей – механической (точнее – электромеханической), электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками, является первичным признаком, отличающим мехатронные системы.

Электромеханическая часть включает механические звенья и передачи, рабочий орган, электродвигатели, сенсоры и дополнительные электротехнические элементы (например, тормоза, муфты). Механическое устройство предназначено для преобразования движений звеньев в требуемое движение рабочего органа. Электронная часть состоит из микроэлектронных устройств, силовых преобразователей и электроники измерительных цепей. Сенсоры предназначены для сбора данных о фактическом состоянии внешней среды и объектов работ, механического устройства и блока приводов с последующей первичной обработкой и передачей этой информации в устройство компьютерного управления (УКУ). В состав УКУ мехатронной системы обычно входят компьютер верхнего уровня и контроллеры управления движением.

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

- управление процессом механического движения мехатронного модуля или многомерной системы в реальном времени с обработкой сенсорной информации;

– организация управления функциональными движениями МС, которая предполагает координацию управления механическим движением мехатронных систем и сопутствующими внешними процессами. Как правило, для реализации функции управления внешними процессами используются дискретные входы/выходы устройства (на схемах они обычно обозначаются I/O);

– взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс в режимах программирования и непосредственно в процессе движения мехатронных систем;

– организация обмена данными с периферийными устройствами, сенсорами и другими устройствами системы.

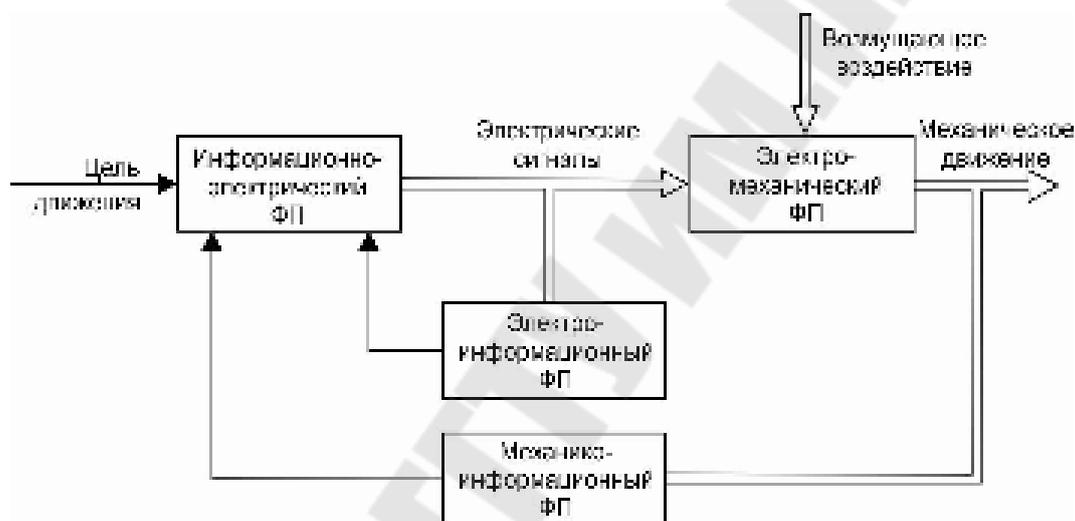


Рис. 1.2. Информационные и энергетические потоки в мехатронной системе (⇔ энергетический поток, —▶ информационные потоки, ФП – функциональный преобразователь)

Задачей мехатронной системы является преобразование информации о цели управления, поступающей с верхнего уровня, в целенаправленное функциональное движение системы с управлением на основе принципа обратной связи. Блок-схема, иллюстрирующая ход энергетических и информационных потоков в мехатронных системах, приведена на рис. 1.2.

Проанализируем физический характер преобразований и структуру традиционной машины с компьютерным управлением с данной точки зрения (рис. 1.3).

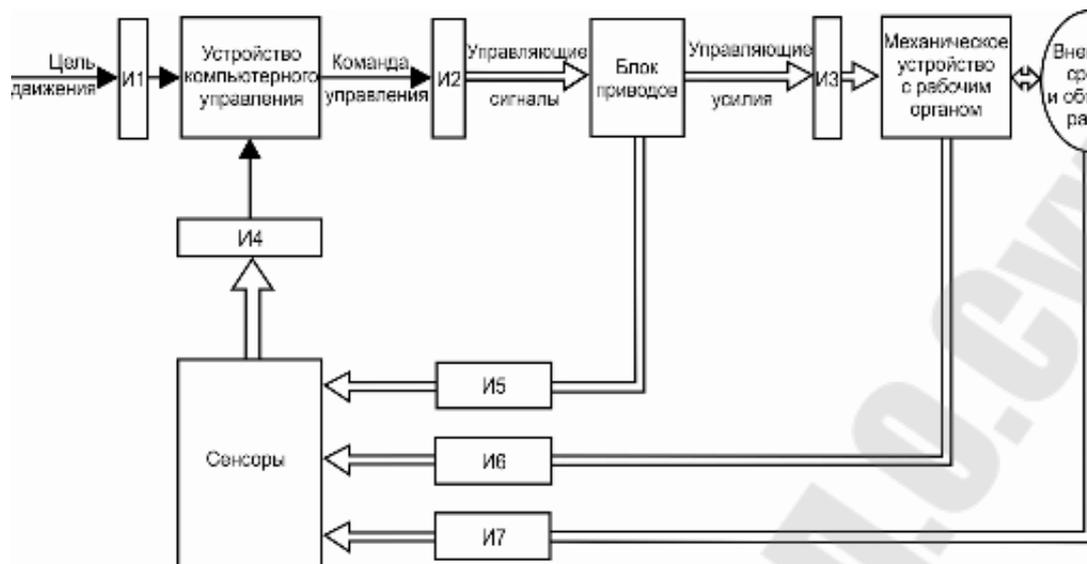


Рис. 1.3. Блок-схема традиционной машины с компьютерным управлением (И1, И7: интерфейсный блок)

Устройство компьютерного управления на основании входной информации, поступающей с верхнего уровня управления и по цепям обратной связи от сенсоров, выдает во времени на исполнительные приводы управляющие электрические сигналы. В силовых преобразователях происходит усиление по мощности данных сигналов, их модуляция (наиболее широко применяются широтно-импульсные модуляторы). Затем исполнительные приводы прикладывают соответствующие усилия (силы и момент) к звеньям механического устройства, что в результате вызывает целенаправленное движение конечного звена машины – ее рабочего органа.

Для сопряжения элементов в систему традиционно вводят специальные интерфейсные устройства, которые на рис. 1.3 обозначены И1–И7.

Рассмотрим примеры межблоковых интерфейсов, которые наиболее часто встречаются в машинах с компьютерным управлением (станках с ЧПУ, промышленных роботах и т. п.), широко применяемых в автоматизированном машиностроении.

Интерфейс И1 представляет собой комплекс сетевых аппаратно-программных средств для сопряжения устройства компьютерного управления с компьютерной сетью, либо это интерфейс человек–машина, если цель управления в мехатронной системе задается непосредственно человеком-оператором. Современные человеко-машинные интерфейсы выполняются в виде пультов и рукояток дистанционного управления (например, для программирования промышленных робо-

тов методом обучения), периферийных устройств компьютеров (клавиатура, монитор, джойстик), сенсорных дисплеев в устройствах отображения информации в системах виртуальной реальности (перчатки, шлемы со встроенными очками и др.).

Интерфейс И2 обычно состоит из цифро-аналогового преобразователя и усилительно-преобразующего устройства и служит для формирования управляющих электрических напряжений для исполнительных приводов.

Интерфейс И4 на входе устройства компьютерного управления в случае применения в МС сенсоров с аналоговым выходным сигналом строится на основе аналого-цифровых преобразователей.

Интерфейс И3 – представляет собой, как правило, механические передачи, связывающие исполнительные двигатели со звеньями механического устройства. Конструктивно такие трансмиссии обычно включают редукторы, муфты, гибкие связи, тормоза и т. п.

Интерфейсы сенсоров И5, И6 и И7 в зависимости от физического характера входных переменных состояния системы можно разделить на электрические и механические. К механическим относятся присоединительные устройства для датчиков обратной связи приводов (фотоимпульсных, кодовых, тахогенераторов, потенциометров, резольверов), силомоментных и тактильных датчиков, а также других средств осязания и информации о движении двигателей, звеньев механического устройства и внешних объектов. Преобразование и передача сигналов о переменных состоянии системы, которые имеют электрическую природу (например, напряжения и токи в силовых преобразователях), осуществляется электрическими интерфейсами. В их состав помимо усилительно-преобразующих плат входят также соединительные кабели и коммутационная аппаратура.

Сущность мехатронного подхода состоит в том, что он направлен на интеграцию конкретного класса элементов (механических, электронных, компьютерных, электротехнических, интерфейсных и др.), которые имеют принципиально различную физическую природу и предназначены для реализации сложного функционального движения. Аппаратное объединение элементов в единые конструктивные модули должно обязательно сопровождаться разработкой интегрированного программного обеспечения. Программные средства мехатронных систем должны обеспечивать непосредственный переход от замысла системы через ее математическое моделирование к управлению функциональным движением в реальном времени.

Для реализации сформулированного мехатронного подхода следует определить локальные точки интеграции элементов в единый функциональный модуль. Для этого вернемся к рассмотрению блок-схемы на рис. 1.3. Потенциально возможные точки аппаратной интеграции и структуры соответствующих мехатронных модулей представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Потенциально возможные точки аппаратной интеграции и структуры соответствующих мехатронных модулей

Мехатронный	Исходные элементы		
	Базовый элемент	Дополнительный элемент	Исключаемый интерфейс
Интеллектуальный силовой	Силовой преобразователь	Микропроцессор	И2
Приводной модуль	Исполнительный двигатель	Механическое устройство	И3
Интеллектуальный сенсор	Сенсор	Микропроцессор	И4
Мехатронный модуль движения	Приводной модуль	Сенсор	И3, И5
Очувствленный рабочий орган	Рабочий орган	Сенсор	И6

В табл. 1.1 мехатронные модули классифицированы по набору вошедших в их состав базового и дополняющих элементов (столбцы 1 и 2). В третьем столбце указаны интерфейсы, которые при проектировании исключаются как сепаратные блоки из традиционной структуры (рис. 1.3). В таблице не рассматриваются интерфейсы И1 и И7, которые являются по сути входными для мехатронного модуля, так как связывают его источниками внешних сигналов и воздействий.

Контрольные вопросы

1. Что означает термин «мехатроника»?
2. Каковы преимущества мехатронных модулей?
3. Какова область применения мехатронных систем?
4. Какие поколения мехатронных систем можно выделить и что к ним относится?
5. Каковы основные принципы интеграции мехатронных систем?

2. Мехатронные модули движения

2.1. Моторы-редукторы

Моторы-редукторы являются исторически первыми по принципу своего построения мехатронными модулями, которые стали серийно выпускаться и нашли очень широкое применение в приводах различных машин и механизмов. Мотор-редуктор представляет собой компактный конструктивный модуль, объединяющий электродвигатель и редуктор. По сравнению с традиционным соединением двигателя и редуктора через муфту моторы-редукторы обладают целым рядом существенных преимуществ:

- сокращение габаритных размеров;
- снижение стоимости за счет сокращения количества присоединительных деталей, уменьшения затрат на установку, наладку и запуск изделия;
- улучшенные эксплуатационные свойства (пыле- и влагозащищенность, минимальный уровень вибраций, безопасность и надежность работы в неблагоприятных производственных условиях).

Конструктивное исполнение модуля определяется типами используемых редуктора и электродвигателя. В зависимости от технических требований задачи применяются цилиндрические, насадные, конические, червячные и другие виды редукторов. В качестве электродвигателей наиболее часто используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и регулируемые преобразователи частоты вращения, однофазные двигатели и двигатели постоянного тока.

Общий вид одноступенчатого червячного мотор-редуктора показан на рис. 2.1. Редуктор выпускается для общемашиностроительного применения.



Рис. 2.1. Общий вид червячного мотор-редуктора

2.2. Мехатронные модули вращательного движения на базе высокомоментных двигателей

Следующим шагом в развитии приводной техники стало появление высокомоментных двигателей вращательного движения, применение которых позволило вообще исключить механический редуктор из состава электроприводов постоянного тока, работающих на низких скоростях.

Высокомоментными называются двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и электронной коммутацией обмоток, которые допускают многократную перегрузку по моменту. Для определения положения полюсов на роторе вентильного высокомоментного двигателя (ВМД) устанавливают дополнительные технические средства (например, датчики Холла, индуктивные и фотоэлектрические датчики). Обычно ВМД устойчиво работают на частотах вращения $0,1-1 \text{ мин}^{-1}$, которые типичны для металлорежущих станков и промышленных роботов.

Основные преимущества ВМД, связанные отсутствием в приводе редуктора:

- снижение материалоемкости, компактность и модульность конструкции;
- повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров;
- исключение трения в механической трансмиссии позволяет существенно уменьшить погрешности позиционирования и нелинейные динамические эффекты на ползучих скоростях;
- повышение резонансной частоты.

ВМД выпускаются в настоящее время коллекторного и вентильного (иногда используется термин «бесщеточного», либо «бесконтактного») типов.

Основные преимущества вентильных двигателей по сравнению с коллекторными:

- высокая надежность, большой срок службы, минимальные затраты на обслуживание (вследствие исключения искрения и износа щеток);
- улучшенные тепловые характеристики (так как тепло рассеивается на обмотках статора, а на роторе тепловыделяющие элементы отсутствуют), отсюда возможность использования проводов малого сечения;

- высокое быстродействие за счет высокого соотношения «развиваемый момент/момент инерции ротора»;
- большая перегрузочная способность по моменту в широком диапазоне регулирования скорости;
- близкие к линейным механические и регулировочные характеристики.

По сравнению с синхронными двигателями вентильные ВМД позволяют регулировать скорость вращения с помощью обратной связи, частота вращения не зависит от напряжения питания, нет проблемы выпадения из синхронизма.

Основной недостаток вентильных двигателей – наличие дорогостоящих магнитов и блока управления коммутацией обмоток, отсюда пониженный показатель мощность/цена и повышенные габариты. В современных модификациях эта проблема решается путем построения этих блоков на базе относительно дешевых интегральных микросхем.

В табл. 2.1 приведены технические характеристики отечественных бесконтактных двигателей серии ДБМ.

В состав современных мехатронных модулей движения (ММД) на основе ВМД обязательно входят также датчики обратной связи и иногда управляемые тормоза, что позволяет отнести такие ММД ко второму поколению (см. рис. 2.2).

В качестве датчиков наиболее часто применяются фотоимпульсные датчики (энкодеры), тахогенераторы, резольверы и кодовые датчики положения. Принципиально важно, что модуль «двигатель-датчик» имеет единый вал, что позволяет сочетать высокие технические параметры и низкую стоимость.

Конструктивная схема модуля «двигатель постоянного тока – встроенный тахогенератор», иллюстрирующая эту идею, приведена на рис. 2.3.

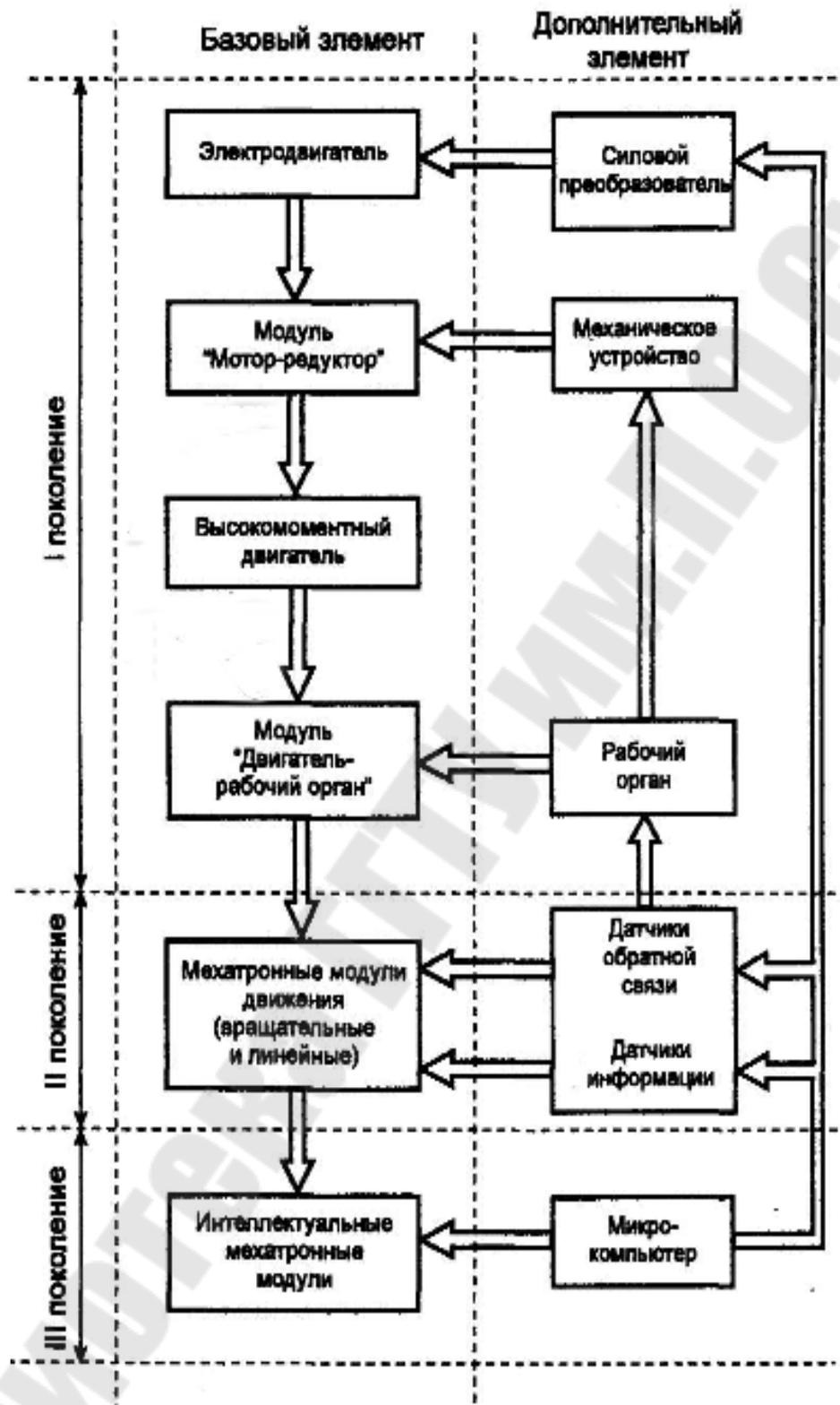


Рис. 2.2. Схема развития мехатронных модулей движения

Технические характеристики отечественных бесконтактных двигателей серии ДБМ

Условное обозначение	Наружный диаметр статора, мм	Диаметр ротора, мм	Осевая длина, мм	Число пар полюсов	Частота вращения, xx, мин^{-1}	Пусковой момент, $\text{H} \cdot \text{м}$
ДБМ40-0,01-2,5-3	40	12	26	4	3900–5400	0,02
ДБМ63-0,06-3-2	63	28	28	8	2700–3400	0,11
ДБМ105-0,4-0,75-3	105	60	37	8	720–1000	0,25



Рис. 2.3. Мехатронный модуль «двигатель–тахогенератор»

На рис. 2.4 показана конструкция мехатронного модуля на базе высокомоментного двигателя. В состав модуля входят: ротор двигателя, статор двигателя, подшипник, фотоимпульсный датчик. Вращающейся является внешняя часть модуля, которая базируется на опорных подшипниках. Модули комплектуются также электрическим кабелем.

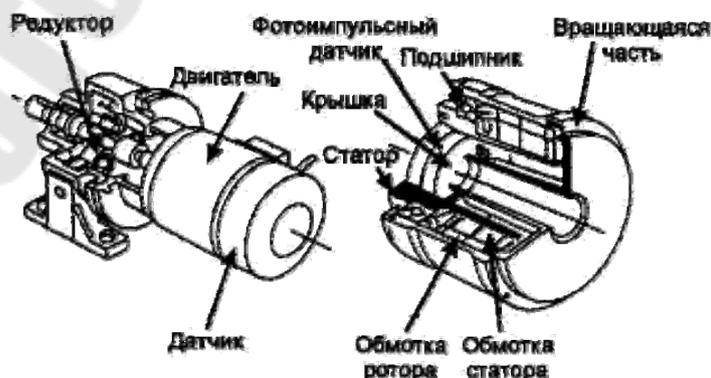


Рис. 2.4. Мехатронный модуль

2.3. Мехатронные модули линейного движения

Рассмотренный мехатронный подход к построению модулей вращательного движения на базе высокомоментных двигателей получил в последние годы свое развитие и в модулях линейного перемещения. Цель проектирования аналогична – исключить механическую передачу из состава ММД.

Мехатронные модули движения на основе линейных высокомоментных двигателей (ЛВМД) находят все большее применение в гексаподах, высокоскоростных станках (многоцелевых, фрезерных, шлифовальных), комплексах для лазерной и водоструйной резки, вспомогательном оборудовании (крестовых столах, транспортерах).

Традиционные электроприводы линейных перемещений включают в себя двигатель вращательного движения и механическую передачу для преобразования вращения в поступательное движение (шарико-винтовую передачу XX в., зубчатую рейку, ленточную передачу и т. п.). С начала 80-х гг. известны разработки собственно линейных двигателей, однако из-за низких удельных силовых показателей они имели ограниченную область применения (графопостроители, координатно-измерительные машины) и в автоматизированном оборудовании не могли быть использованы.

Основные преимущества модулей на базе ЛВМД по сравнению с традиционными линейными приводами:

- повышение в несколько раз максимальной скорости движения (до 150–210 м/мин) и ускорения (в перспективе до 5g);
- высокая точность реализации движения;
- высокая статическая и динамическая жесткость.

Вместе с тем имеется ряд проблем при проектировании и внедрении ЛВМД: более высокая стоимость, необходимость использования систем охлаждения ММД (жидкостной или воздушной), относительно невысокий КПД модуля.

2.4. Мехатронные модули типа «двигатель – рабочий орган»

Важным этапом развития мехатронных модулей движения стали разработки модулей типа «двигатель–рабочий орган». Такие конструктивные модули имеют особое значение для технологических мехатронных систем, целью движения которых является реализация целенаправленного воздействия рабочего органа на объект работ.

В станках с относительно небольшим крутящим моментом (токарных малых размеров, консольно-фрезерных, высокоскоростных фрезерных станках) применяются так называемые «моторы-шпиндели». Отличительной конструктивной особенностью этих электро-механических узлов приводов главного движения является монтаж шпинделя непосредственно на роторе двигателя.

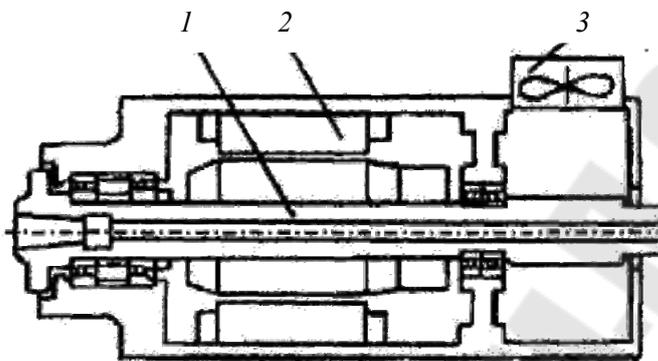


Рис. 2.5. Мехатронный модуль «мотор–шпиндель»:
1 – шпиндель; 2 – статор; 3 – вентилятор

На рис. 2.5 приведена конструкция модуля «мотор–шпиндель», имеющего следующие основные технические характеристики: габариты – 784 x 338 x 430 мм, мощность – 5,5 кВт, номинальная скорость – 750 об/мин, максимальная скорость – 4500 об/мин, номинальный момент – 70 Н · м. Использование в шпиндельных узлах механических подшипников определило их ограниченные функциональные возможности, в первую очередь при высоких скоростях вращения: недостаточный ресурс работы, необходимость смазки пар трения, проблеме герметизации.

Для реализации на станках высокопроизводительных режимов резания разработаны шпиндельные узлы на электромагнитных опорах, которые обеспечивают скорость вращения до 200 000 об/мин. Схема шпиндельного узла на электромагнитных опорах (ЭМО) показана на рис. 2.6.

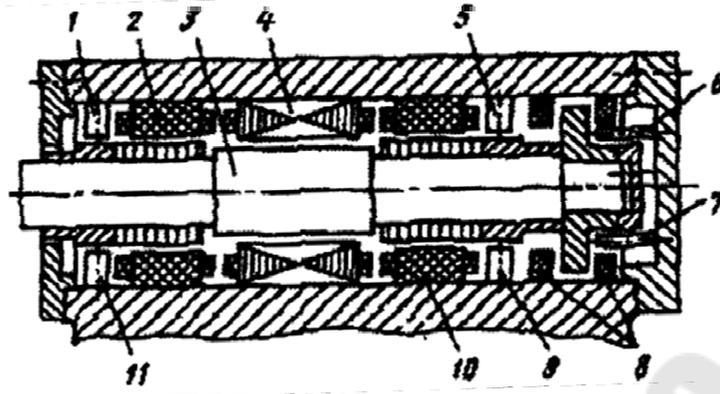


Рис. 2.6. Шпиндельный узел на электромагнитных опорах:
 1, 5, 9, 11 – радиальные датчики информации; 2, 10 – радиальные электромагнитные опоры; 4 – статор асинхронного двигателя;
 8 – осевые электромагнитные опоры;
 6, 7 – осевые датчики информации

Частота вращения ротора асинхронного двигателя регулируется изменением частоты питающего напряжения на статоре. Модуль имеет четыре опоры, две радиальные и две осевые. Дополнительным электронным элементом данного мехатронного модуля является система стабилизации положения оси ротора. Под действием возмущающих усилий возникают отклонения в положении ротора, которые измеряются соответствующими осевыми и радиальными датчиками информации. Устройство компьютерного управления, автоматически регулируя силу тока в обмотках возбуждения электромагнитов, поддерживает заданное положение оси ротора либо изменяет его по желаемому закону (в пределах зазора в опорах) для получения деталей сложного профиля. Следует, однако, учитывать, что моторы-шпиндели на ЭМО требуют интенсивного охлаждения при длительной работе на высокоскоростных режимах.

В нашей стране создаются высокооборотные модули с максимальной скоростью вращения до 250000 об/мин и мощностью до 60 кВт для металлорежущих станков, деревообрабатывающих машин, станков для сверления печатных плат.

Модули типа «двигатель – рабочий орган» нашли широкое распространение также в электроприводах различных самоходных средств (электровелосипедов и электромобилей, мобильных роботов и т. п.).

2.5. Интеллектуальные мехатронные модули движения

Главной особенностью современного этапа развития мехатронных модулей является интеллектуализация процессов управления их функциональными движениями. По сути речь идет о разработке принципиально нового поколения модулей, в которых осуществлена интеграция всех трех компонент – электромеханической, электронной и компьютерной. Техническая реализация интеллектуальных мехатронных модулей движения (ИММД) стала возможной благодаря бурному развитию в последние годы микропроцессорных систем, ориентированных на задачи управления движением. Постоянное совершенствование производственных технологий ведет к стабильному снижению стоимости аппаратных средств, что сделало их к настоящему времени рентабельными для практического внедрения.

Рассмотрим общую структуру однокоординатного мехатронного модуля, представленную на рис. 1.4. Устройство компьютерного управления (УКУ) имеет два входных информационных канала: интерфейс И1 связывает его с верхним уровнем управления и интерфейс И4 – с сенсорами и один выходной канал (интерфейс И2), через который поступают управляющие команды на исполнительный привод. Соответственно можно выделить три направления интеллектуализации мехатронных модулей движения, которые классифицируются в зависимости от интерфейсных точек интеграции:

- развитие интегрированных интерфейсов, связывающих управляющий контроллер с компьютером верхнего уровня в единый аппаратно-программный управляющий комплекс (интерфейс И1);
- создание интеллектуальных силовых модулей управления путем интеграции управляющих контроллеров и силовых преобразователей (интерфейс И2);
- разработка интеллектуальных сенсоров мехатронных модулей, которые дополнительно к обычным измерительным функциям осуществляют компьютерную обработку и преобразование сигналов по гибким программам (интерфейс И3). Рассмотрим тенденции и способы технической реализации УКУ в современных мехатронных модулях.

2.6. Контроллеры движения

Первое из указанных направлений заключается в создании нового поколения компьютерных устройств, позволяющих пользователю

гибко и быстро решать весь комплекс задач управления движением модуля.

Укрупненно можно разделить задачу управления движениями мехатронных систем на две основные части: планирование движения и его исполнение во времени. Задачу планирования движения и автоматизированного формирования программы управления решает компьютер верхнего уровня, который получает целеуказание от человека-оператора. Функцию расчета и выдачи управляющих сигналов непосредственно на исполнительные приводы выполняет контроллер движения. Таким образом, сочетание компьютера и контроллера в архитектуре УКУ является обоснованным с точки зрения разделения решаемых подзадач управления.

Современные контроллеры обычно реализуют управление с обратной связью по положению и/или скорости управляемого механического объекта, т. е. мехатронная система управления является замкнутой на исполнительном уровне. Принцип разомкнутого управления в настоящее время используется только в системах управления шаговыми двигателями. Такие двигатели применяются, например, в графоопстроителях, плоттерах, поворотных столах и других устройствах, которые не испытывают существенных возмущающих воздействий. В оборудовании автоматизированного машиностроения (металлорежущих станках, технологических роботах) обеспечить приемлемую точность движения можно только используя замкнутые системы управления.

Для реализации функциональных движений контроллеры имеют также дополнительные входы/выходы для связи с внешним оборудованием (рис. 2.7). Как правило, это сигналы, дискретные по форме (I/O). Здесь уместно обратить внимание на очень широкое распространение в промышленных системах автоматики программируемых логических контроллеров (ПЛК). Главная задача ПЖ – это эффективные операции исключительно с дискретной информацией. Поэтому построение на базе ПЖ систем управления движением мехатронными модулями, и тем более мехатронными системами, логически нецелесообразно. Но при этом возможен обмен информацией между контроллерами управления движением и ПЖ через блок дискретных входов/выходов.

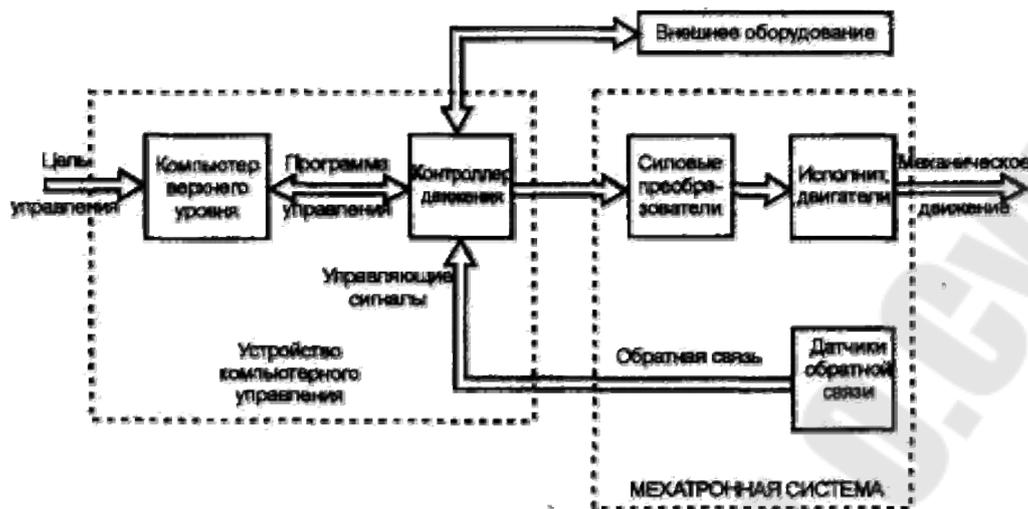


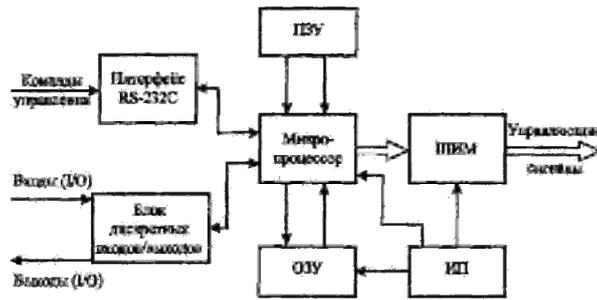
Рис. 2.7. Структура системы управления функциональными движениями

Наиболее распространены в настоящее время два метода формирования контроллером управляющих сигналов для силового преобразователя:

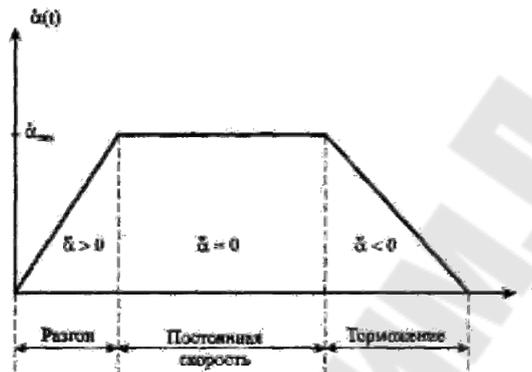
- аналоговые командные сигналы;
- модулированные управляющие сигналы.

Для формирования аналоговых управляющих сигналов необходим цифро-аналоговый преобразователь, который выдает электрические напряжения (обычно от -10 В до $+10$ В постоянного тока). С энергетической точки зрения выгодным считается метод широтно-импульсного управления силовыми ключами преобразователя.

Блок-схема УКУ с внешним контроллером движения приведена на рис. 2.8. Гибкость управления обеспечивается применением микропроцессора, исполняемая программа управления хранится в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ). Планирование функциональных движений осуществляется оператором на компьютере верхнего уровня с использованием пакетов прикладных программ. Компьютер выполняет также автоматическую генерацию команд для контроллера, которые поступают на исполнение через стандартный интерфейс (например, RS-232C). Эти команды задают желаемые законы изменения во времени положения, скорости и ускорения вала исполнительного двигателя. Типичным является трапецеидальный закон изменения скорости движения, включающий участки разгона, перемещения с постоянной скоростью и торможения с заданным ускорением (рис. 2.8, б).



а)



б)

Рис. 2.8. Устройство компьютерного управления с внешним контроллером движения: а – блок-схема контроллера движения (ПЗУ – постоянное запоминающее устройство, ОЗУ – оперативное запоминающее устройство, ШИМ – широтно-импульсный модулятор, ИП – источник питания); б – типовой закон движения

2.7. Интеллектуальные силовые модули

Вернемся к анализу возможных способов интеллектуализации мехатронных модулей и рассмотрим подход, направленный на интеграцию контроллеров движения и силовых преобразователей привода (интерфейс И2 на рис. 1.3). Такое решение целесообразно для многомерных мехатронных систем, компоненты которых расположены на значительном удалении друг от друга. В этих случаях комплексировать систему управления на базе одного персонального компьютера очень сложно, а иногда и технически невозможно из-за проблем передачи сигналов и данных на большие расстояния. Так, стандартный протокол RS-232 позволяет передавать данные на расстояния не более чем 9,15 м.

Блок управления каждым модулем в таких системах встраивается в корпус преобразователя или даже в клеммную коробку электродвигателя. Такие модули получили название интеллектуальных силовых модулей (ИСМ).

Интеллектуальные силовые модули строятся 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 (MCT).

Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (для транзисторов IGBT частота коммутации составляет до 50 000 Гц, для транзисторов MOSFET – 100 000 Гц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для IGBT: предельная сила коммутируемого тока – до 1200 А, предельное коммутируемое напряжение – до 3500 В), малая мощность управления.

В состав ИСМ входят, кроме традиционных приборов силовой электроники (ключей на базе силовых транзисторов или тиристоров, диодов и др.), элементы микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций – управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. Использование ИСМ в составе приводов мехатронных модулей позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели.

2.8. Интеллектуальные сенсоры мехатронных модулей и систем

Целью создания интеллектуальных сенсоров является объединение функций измерения текущих параметров механического движения, их преобразования и компьютерной обработки по заданным алгоритмам в едином информационно-измерительном модуле. Со структурной точки зрения речь идет об интеграции сенсорного и компьютерного блоков мехатронного модуля (интерфейс ИЗ на рис. 2.4). Интеллектуализация сенсоров позволяет добиться более высокой точности измерения, программным путем обеспечив в самом сенсорном модуле фильтрацию шумов, калибровку, линеаризацию характеристик вход/выход, компенсацию перекрестных связей, гистерезиса и дрейфа нуля.

В мехатронных модулях сенсоры предназначены для сбора данных о фактическом состоянии элементов движущейся системы (исполнительного привода, механического устройства и рабочего органа), обработки в реальном времени и передачи сигналов обратной связи в устройство компьютерного управления.

К типичными измеряемым величинам, информация о которых используется при управлении мехатронными модулями и системами, относятся: перемещение (линейное или угловое), скорость, ускорение и моменты, развиваемые исполнительными двигателями; внешние усилия, действующие на рабочий орган (например, на шпиндель модулей, показанных на рис. 2.5 и 2.6); положение и ориентация рабочего органа в пространстве (например, схвата промышленного робота или шупа контрольно-измерительной машины).

Различают два основных вида энкодеров – абсолютные и инкрементальные. Абсолютные энкодеры дают информацию о величине перемещения (линейного или углового) движущегося вала относительно фиксированного нулевого положения.

Преимуществами абсолютного энкодера являются надежность измерения (даже при временном отключении питания информация датчиком не будет потеряна), высокая точность при больших скоростях движения, запоминание нулевого положения (это важно при необходимости управления реверсивными и аварийными движениями машин). Инкрементальный датчик дает информацию о направлении и величине перемещения в приращениях относительно исходного положения, что вполне достаточно во многих практических приложениях.

Интеллектуализация энкодеров обеспечивается встроенными микропроцессорами, которые выполняют следующие основные функции: кодирование информации датчика, обнаружение ошибок измерения, масштабирование сигнала и передача текущего кода в контроллер движения по стандартному протоколу. Современная тенденция в создании энкодеров заключается в объединении в едином сенсорном модуле конструктивных элементов (валов, подшипников), кодировочных дисков, фотоэлементов и микропроцессора.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой мотор-редукторы?
2. Охарактеризуйте мехатронные модули на основе высокомоментных двигателей.
3. Что представляет собой мехатронный модуль «двигатель–тахогенератор»?
4. Охарактеризуйте мехатронные модули линейного движения.
5. Дайте характеристику мехатронных модулей типа «двигатель – рабочий орган».

6. Что представляют собой интеллектуальные мехатронные модули движения?
7. Как решается задача управления движением модуля?
8. Приведите примеры интеллектуальных силовых модулей и сенсоров.

3. Современные мехатронные системы

3.1. Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов

Проблема эксплуатации и ремонта трубопроводов актуальна для нефтяных и газопроводов, для водопроводных и канализационных сетей (особенно для крупных городов и мегаполисов как Москва), для каналов водосброса и водозабора из рек. 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 внедрить бестраншейные методы ремонта. Роботизация позволяет также осуществлять реновацию и санацию ветхих магистралей, проводить приемку новых и контроль за состоянием действующих трубопроводов, проводить экологический мониторинг сетей, составлять карты подземных коммуникаций.

Осмотровый робот Р-200 предназначен для телеинспекции трубопроводов диаметром от 150 до 1200 мм. Этот мобильный робот имеет набор сменных колес и цветную поворотную телекамеру. Управляется робот дистанционно оператором с поста управления, размещенного в автомобиле (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 стеклоочистителем, а также имеет дистанционный привод 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. Схема телеинспекции показана на рис. 3.1, *а*. Помимо системы технического зрения робот оснащен датчиком пути, датчиком углов крена и дифферента корпуса, 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.

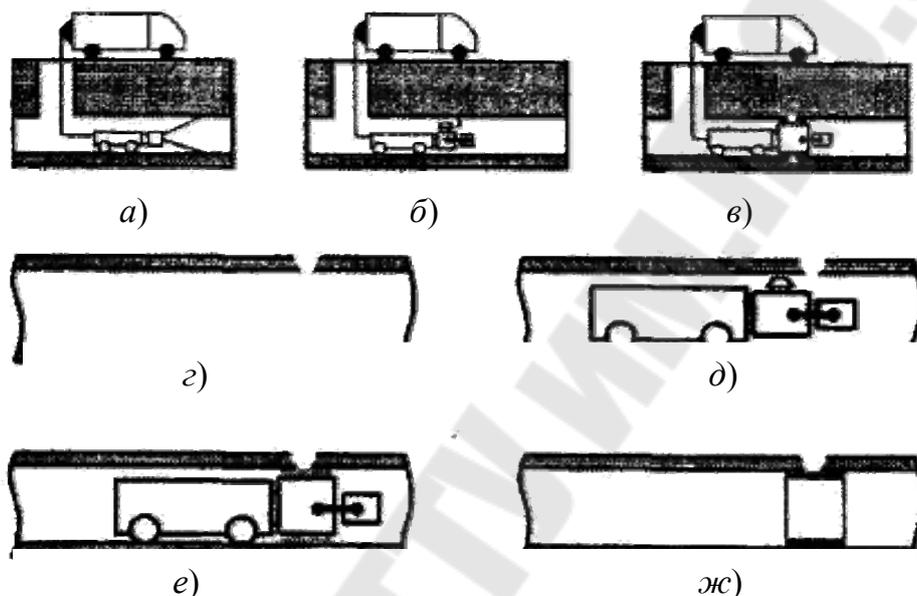


Рис. 3.1. Схемы роботизированных операций:

- а* – телеинспекция трубопровода; *б* – подрезка выступающих элементов;
в – локальная заделка дефекта; *г* – дефект в трубопроводе; *д* – зачистка
 с помощью фрезерной головки; *е* – установка внутреннего бандажа;
ж – трубопровод после ремонта

Телероботы позволяют не только обнаружить, но и устранить целый ряд дефектов. Робот комплектуется сменными рабочими органами – фрезерными и бандажными головками для выполнения ремонтных операций внутри трубы. Фрезерная головка предназначена для локальной зачистки поверхностей, сверления, подрезки выступающих элементов (наплывы, грат на сварных швах, штыри), прорезки боковых отводов после санации трубы пластиком. Заделка дефектов выполняется с помощью бандажной головки, которая накладывает кольцевой бандаж шириной 100 мм из ткани со специальной пропиткой. Схемы ремонта дефекта в трубопроводе для ликвидации утечек без раскопки показаны на рис. 3.1, *б–ж*.

Мобильный робот является характерной мехатронной системой, когда проектно-конструкторские решения по разработке электро-механической, сенсорной и электрической частей необходимо принимать только во взаимосвязи, учитывая уже с начальных этапов главный лимитирующий фактор – диаметр трубопровода.

Перспективы развития мобильной робототехники связаны с интеллектуализацией устройств управления и сенсоров, что позволит повысить качество проводимых операций и автономность их выполнения.

Автоматическое принятие решений роботом, без непосредственного участия человека-оператора, целесообразно на следующих операциях:

- обнаружение и распознавание постороннего объекта в трубопроводе с использованием информации системы технического зрения (СТЗ) и локационных датчиков;
- планирование траектории и скорости движения при прохождении поворотов на базе сенсорных сигналов от двухкомпонентного датчика крена-дифферента и датчиков приводных модулей «мотор–колесо»;
- управление режимами работы фрезерной головки на основании информации о действующих силах и моментах;
- диагностика и измерение толщины стенки трубы.

3.2. Робототехнологический комплекс механообработки

Робототехнологический комплекс (РТК) предназначен для выполнения операций механообработки деталей из пластмасс и легких сплавов. К числу типичных операций относятся зачистка заусенцев, снятие сбоя, шлифование контуров и поверхностей, сверление отверстий, снятие фасок.

В состав РТК входят: промышленный робот РМ-01, включающий манипулятор РУМА-560 и устройство управления «Сфера-36», компьютер верхнего уровня типа IBM PC, блок пневмоэлектроаппаратуры, сменные рабочие органы (схваты, инструментальные пневмоголовки), комплект режущего инструмента (фрезы, напильники, металлические щетки), устройство силомоментного очувствления с блоком ввода аналоговых сигналов в устройство управления и многофункциональный адаптер ввода-вывода сигналов в компьютер.

3.3. Технологические машины – гексаподы

Мехатронный подход положен в основу машин с концептуально новым принципом построения – так называемых гексаподов. Эти технологические машины (станки, координатно-измерительные машины, роботы) имеют стержневую конструкцию и построены на мехатронных модулях линейного движения, в основе их конструктивной схемы лежит платформа Стюарта.

Станок-гексапод (рис. 3.2) выполнен на базе линейных мехатронных модулей 2, которые осуществляют осевое перемещение винтов через шарико-винтовые передачи (ШВП). Один конец ШВП соединен безлюфтовым шарниром с нижней платформой 1, а другой – с подвижной верхней платформой 4, на которой расположен рабочий орган – инструментальная головка 3. Управляя положением винтов, можно обеспечить пространственное перемещение рабочего органа по шести степеням свободы (отсюда и название станка: «гекса» означает «шесть» по-гречески).

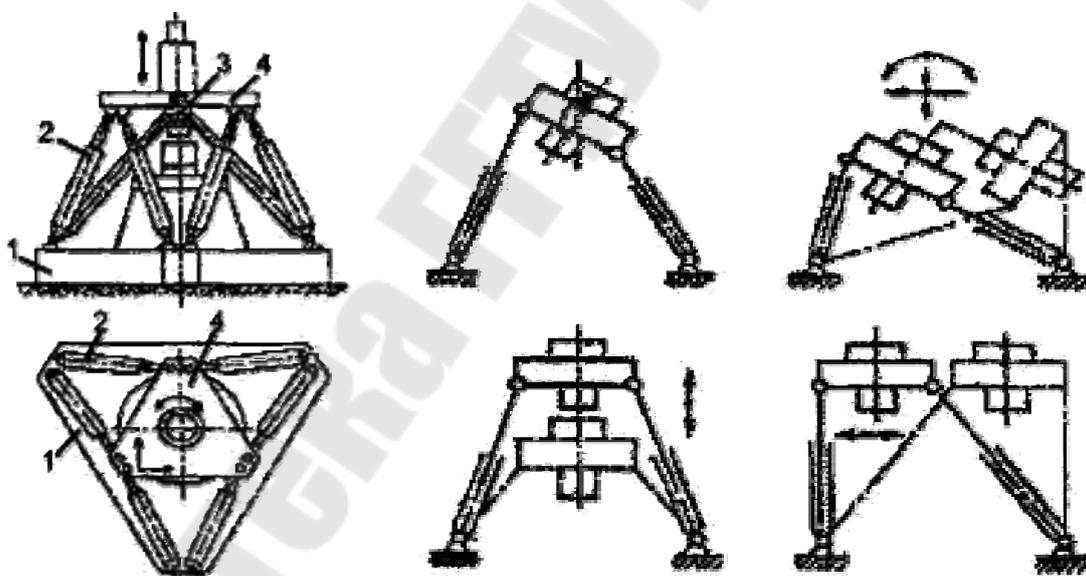


Рис. 3.2. Общий вид станка-гексапода

Основными преимуществами гексаподных машин являются:

- сокращение времени подготовки производства и повышение его рентабельности за счет объединения обрабатывающих, разметочных и измерительных функций в единой мехатронной системе;
- высокая точность измерений и обработки, которая обеспечивается повышенной жесткостью стержневых механизмов (до 5 раз),

применением прецизионных датчиков обратной связи и лазерных измерительных систем, использованием компьютерных методов коррекции (например, тепловых воздействий);

- повышенная скорость движений (скорость быстрых перемещений достигает 10 м/с, рабочих движений – до 2,5 м/с);

- отсутствие направляющих (в качестве несущих элементов конструкции используются приводные механизмы), отсюда улучшенные массогабаритные характеристики и материалоемкость;

- высокая степень унификации мехатронных узлов, обеспечивающая технологичность изготовления и сборки машины и конструктивную гибкость;

- высокое качество управления движением благодаря малой инерционности механизмов, применению линейных мехатронных модулей движения как объектов управления, использованию методов автоматизированной подготовки и исполнения в реальном времени управляющих программ, наличию дружелюбного интерфейса «человек–машина».

3.4. Транспортные мехатронные средства

Мехатронные модули находят все более широкое применение в различных транспортных системах. В данном пособии ограничимся кратким анализом только легких транспортных средств (ЛТС) с электроприводом (иногда их называют нетрадиционными). К этой новой для отечественной промышленности группе транспортных средств относятся электровелосипеды, роллеры, инвалидные коляски, электромобили с автономными источниками питания. Разработку таких мехатронных систем ведет Научно-инженерный центр «Мехатроника» в кооперации с рядом организаций.

ЛТС являются альтернативой транспорту с двигателями внутреннего сгорания и используются в настоящее время в экологически чистых зонах (лечебно-оздоровительных, туристических, выставочных, парковых комплексах), а также в торговых и складских помещениях.

Рассмотрим технические характеристики опытного образца электровелосипеда:

- максимальная скорость 20 км/ч;
- номинальная мощность привода 160 Вт;
- номинальная частота вращения 160 об/мин;
- максимальный крутящий момент 18 Н · м;

- масса двигателя 4,7 кг;
- аккумуляторная батарея 36 В, 6 А · ч;
- максимальная нагрузка 120 кг;
- движение в автономном режиме 20 км.

Основой для создания ЛТС являются мехатронные модули типа «мотор–колесо» на базе, как правило, высокомоментных электродвигателей. В табл. 3.1 приведены технические характеристики мехатронных модулей движения для легких транспортных средств.

Таблица 3.1

Технические характеристики мехатронных модулей движения для легких транспортных средств

ЛТС с электроприводом	Технические показатели					
	Максимальная скорость, км/ч	Рабочее напряжение, В	Мощность, кВт	Номинальный момент, Н · м	Номинальный ток, А	Масса, кг
Кресла-коляски	6	24	0,15	25	8	10
Электровелосипеды	15	24	0,3	20	15	12
Роллеры	30	24	0,5	15	20	12
Миниэлектромобили	80	110	2,5	30	28	25

Контрольные вопросы

1. Опишите применение мобильных роботов для ремонта трубопроводов.
2. Что входит в состав робототехнического комплекса механо-сборки?
3. Что представляет собой станок-гексапод?
4. Перечислите основные преимущества станков-гексаподов.
5. Дайте характеристику современных транспортных мехатронных средств.

4. Проблематика и современные методы управления мехатронными модулями и системами

4.1. Особенности постановки задач управления мехатронными системами

Постановку проблемы будем рассматривать применительно к мехатронным системам, которые используются в производственных машинах и комплексах автоматизированного машиностроения как основное технологическое оборудование. К таким системам управления предъявляются, как правило, весьма жесткие требования, так как режимы управления определяют ход технологического процесса и, следовательно, качество получаемого изделия. Именно задачи компьютерного управления технологическими машинами, которые не могли быть решены на базе традиционных подходов, стимулировали разработку и внедрение в практику принципиально новых методов управления.

Воспроизведение заданных движений мехатронными модулями основывается на выполнении классических требований теории управления: устойчивости, точности и качества процесса управления. Однако дополнительно необходимо учитывать следующие специфические особенности мехатронных систем:

- движение рабочего органа как конечного управляемого звена обеспечивается взаимосвязанными (кинематически и динамически) перемещениями нескольких исполнительных приводов и звеньев механического устройства;

- задача управления мехатронной системой должна быть решена в пространстве (т. е. найдены оптимизированные траектории движения всех звеньев, включая рабочий орган) и во времени (т. е. определены и реализованы желаемые скорости, ускорения и развиваемые усилия для всех приводов системы);

- для многих технологических задач параметры внешних и возмущающих воздействий, приложенных к рабочему органу и отдельным мехатронным модулям, заранее не определены;

- сложность построения адекватных математических моделей мехатронных систем традиционными аналитическими методами (особенно прецизионных многосвязных систем, включающих динамическую модель технологического процесса).

Проблемным является вопрос организации обратных связей при управлении многосвязными мехатронными системами. Технически

наиболее просто устанавливать датчики положения и скорости в приводных модулях. Однако затем необходимо вычислить в реальном времени фактическое перемещение рабочего органа. Причем этот компьютерный расчет требует построения адекватной динамической модели системы с учетом весьма сложных для аналитической оценки факторов:

- всех действующих сил (управляющих моментов приводов, сил трения и диссипации, внешних сил и моментов, центробежных и кориолисовых сил);

- первичных погрешностей системы (упругих деформаций звеньев, люфтов в механических передачах, погрешностей изготовления и сборки узлов), которые определяют ее интегральные точностные характеристики в текущей конфигурации;

- переменных параметров объекта управления (приведенных моментов инерции и масс механизма и нагрузки).

Поэтому наилучшим вариантом с точки зрения достоверности получаемой информации о фактическом движении является установка датчиков непосредственно на рабочий орган. Примерами такого подхода могут служить:

- применение систем технического зрения для определения положения рабочего органа и объектов в рабочей зоне (например, на сборочных операциях);

- установка силомоментных датчиков в запястье манипулятора для измерения действующих сил на операциях механообработки;

- использование блоков акселерометров для определения линейных ускорений непосредственно рабочего органа при быстрых транспортных перемещениях.

Перспективным представляется также сочетание рассмотренных подходов при выборе обратных связей в сложных мехатронных системах.

Характерной особенностью мехатронных систем для автоматизированного машиностроения является возможность разделения задач программного управления движением на пространственную и временную. Это означает, что траектория перемещения рабочего органа в пространстве и его контурная скорость могут планироваться отдельно с использованием различных критериев оптимизации. Например, для робототехнологического комплекса механообработки программа перемещения и ориентации инструмента в пространстве определяется по графической модели обрабатываемой детали в системе AutoCAD,

либо заданием опорных точек в режиме обучения. Скорость движения рабочего 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. Оптимизацию закона движения технологической машины во времени обычно проводят по критериям производительности, точности обработки, а также по экономическим и комбинированным показателям.

4.2. Принципы построения систем интеллектуального управления в мехатронике

Главная отличительная черта современной теории управления – это развитие интеллектуальных методов управления техническими системами, которая очень отчетливо проявляется в мехатронике как одной из передовых научно-технических областей. Именно интеллектуальные методы позволяют эффективно решать задачи управления мехатронными системами.

К основным признакам систем интеллектуального управления рассматриваемого класса применительно к задачам мехатроники следует отнести:

- способность автономно (без участия человека-оператора) принимать решения о поведении системы в некоторых заранее не определенных ситуациях;
- возможность адаптировать (приспосабливать) структуру и законы движения мехатронной системы к изменяющимся условиям внешней среды и возмущающим воздействиям;
- способность системы управления к самообучению и накоплению знаний в процессе действий управляемой машины и их использование в последующих задачах управления;
- применение процедур оптимизации на этапах планирования, программирования и исполнения всех функциональных движений машины;
- оценка качества выполняемых движений и диагностика фактического состояния управляемой машины и протекающих процессов в реальном времени;
- эффективное взаимодействие с человеком-оператором, использование его интеллекта как эксперта и навыков при планировании действий машины;

- иерархичность структуры системы с четким выделением функций, информационного обеспечения и обратных связей для каждого уровня управления;
- гибкое взаимодействие распределенных подсистем через компьютерные сети для достижения общих для всей системы целей управления;
- повышенные показатели гибкости, робастности и точности управления.

4.3. Системы управления исполнительного уровня

Контроллеры движения являются устройствами управления исполнительного уровня согласно принятой иерархии управления, движением мехатронных систем. Назначение устройства управления состоит в обеспечении заданных требований по устойчивости, точности и качеству переходных процессов в системе при достижении цели управления движением, которая поступает с тактического уровня управления.

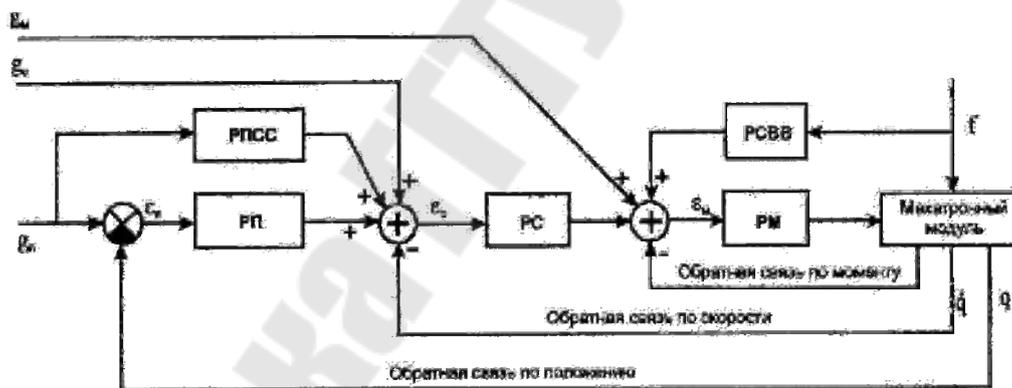


Рис. 4.1. Структурная схема системы управления движением на исполнительном уровне: q , \dot{q} – обобщенные координата и скорость управляемого движения

Структурная схема системы управления движением, реализуемая типовым контроллером, представлена на рис. 4.1. В состав системы входят пять основных регуляторов: регулятор положения (РП), регулятор скорости (РС), регулятор момента или силы (РМ), регулятор прямой связи по скорости изменения управляющего воздействия (РПСС) и регулятор корректирующей связи по возмущающему воздействию (РСВВ). Входными воздействиями для системы могут быть

в зависимости от поставленной цели управления управляющие сигналы по положению, скорости либо по развиваемому усилию. В системе реализуется принцип замкнутого управления, что предусматривает наличие соответствующих обратных связей по фазовым координатам системы.

Наиболее общим является алгоритм ПИД-регулирования, когда выходной сигнал описывается выражением

$$u(t) = K_{\text{П}}e(t) + K_{\text{Д}} \frac{de}{dt} + K_{\text{И}} \int_0^1 e(t)dt, \quad (4.1)$$

где $K_{\text{П}}$, $K_{\text{Д}}$, $K_{\text{И}}$ – коэффициенты, соответственно, пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих сигнала; $e(t)$ – сигнал ошибки в данном контуре управления (положения, скорости или момента). В конкретных случаях некоторые из этих коэффициентов можно положить равными нулю, фактически применяя упрощенные алгоритмы управления (П-алгоритм, ПИ-алгоритм и т. д.).

Традиционный подход предусматривает, что структура и коэффициенты всех корректирующих устройств 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 условий, в которых оно фактически осуществляется. Это позволяет адаптировать (приспособить) движение мехатронной системы к начальной неопределенности и изменяющимся условиям работы. Следуя подходу проф. Я. З. Цыпкина, адаптация по существу есть оптимизация в условиях недостаточной априорной информации.

Адаптивная настройка регуляторов необходима, если введенные отрицательные обратные связи в исполнительных приводах не способны парировать влияние возмущающих воздействий и изменения параметров (и, возможно, структуры) объекта управления, которые вызывают недопустимое снижение показателей качества управляемого движения. Разработчик должен отдавать себе отчет в том, что адаптивные регуляторы по сравнению с традиционными имеют существенно более сложную структуру и техническую реализацию, их проектирование требует решения целого ряда теоретических проблем управления. Поэтому решение о применении адаптивного регулятора в мехатронных системах автоматизированного машиностроения

должно быть обязательно технологически и технически обосновано. Законы настройки регуляторов определяются либо набором алгоритмов и правил, сформулированным разработчиком на базе имеющегося опыта, либо на основании знаний, накопленных самой машиной в процессе анализа ее предшествующих действий. Рассмотрим некоторые современные методы построения адаптивных регуляторов исполнительного уровня, ограничившись только параметрической адаптацией.

4.4. Адаптивное регулирование по эталонной модели

На рис. 4.2 показан один из часто используемых в исполнительных приводах вариантов адаптивного управления, где параметры регулятора настраиваются управляющим компьютером по эталонной модели.

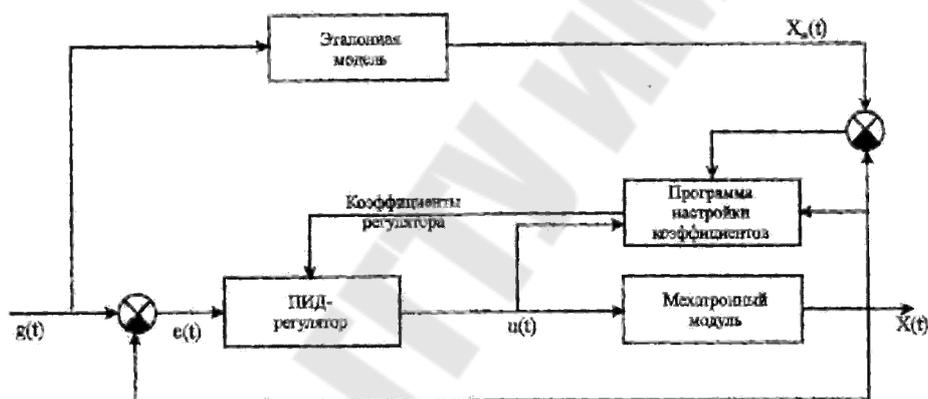


Рис. 4.2. Блок-схема адаптивной системы с эталонной моделью

Эталонная модель показывает идеальную желаемую реакцию системы на задающий сигнал $g(t)$. В качестве эталонной модели применяют типовые звенья систем автоматического управления (например, апериодическое звено). Параметры ПИД-регулятора настраиваются так, чтобы минимизировать рассогласование между выходом модели и реальной системы.

Задача контура настройки состоит в том, чтобы свести это рассогласование к нулю за определенное время с гарантией устойчивости переходного процесса. Данная проблема далеко не тривиальна – можно показать, что она не решается при линейных соотношениях «ошибка – коэффициенты регулятора». Предложен следующий алгоритм настройки параметров:

$$\frac{dk}{dt} = -Ac \operatorname{grad}_k c,$$

где k – настраиваемые коэффициенты ПИД-регулятора (см. (4.1)); A – постоянный коэффициент, задающий скорость адаптации.

Функция градиента определяет чувствительность ошибки $e(t)$ к вариации коэффициентов регулятора. Абсолютная устойчивость замкнутой системы, которая является существенно нелинейной, обеспечивается подбором параметра A в программе настройки.

Таким образом, управляющий компьютер для реализации адаптивного управления по данной схеме должен в реальном времени решать следующие задачи:

- формировать задающий сигнал для управляемой системы;
- рассчитывать идеальную реакцию по эталонной модели;
- вычислять коэффициенты регулятора в соответствии с программой настройки.

Помимо рассмотренной блок-схемы с эталонной моделью известны и другие методы автоматической настройки параметров и структуры регуляторов, с которыми можно ознакомиться по специальной учебной литературе.

4.5. Нечеткие регуляторы исполнительного уровня

Методологической основой для проектирования нечетких регуляторов является концепция нечеткой логики. С базовым математическим аппаратом и прикладными аспектами нечетких систем можно познакомиться по работам, а с последними результатами – только по материалам текущей периодики, так как данная область теории управления начала быстро развиваться только в последнее время.

В основе стандартных современных компьютеров лежит логика «четкого мира». Они работают только с двумя базовыми логическими переменными «Да» и «Нет» и детерминированными числовыми данными, поэтому свойства этого мира описываются совокупностями нулей и единиц.

Однако на практике очень часто приходится иметь дело с неопределенными, нестрогими свойствами объектов и процессов, которые не могут быть формализованы в понятиях «четкого мира».

Целесообразность применения методов нечеткой логики при управлении мехатронными системами обусловлена особенностями постановки задач управления, которые заключаются в априорной не-

определенности возмущающих воздействий, переменности параметров мехатронных объектов управления и в сложности построения аналитических моделей систем.

Структурная схема нечеткого регулятора с параметрической адаптацией приведена на рис. 4.3. Нечеткий контроллер функционирует на основе экспертной базы знаний и выполняет следующие основные операции:

- преобразование данных о переменных состояния системы в нечеткую форму (операция фазификации), хранение и обработка нечеткой информации;
- выполнение нечетких выводов по лингвистическим правилам управления, заложенным в базу знаний;
- перевод нечетких переменных в четкое представление для управления системой (операция дефазификации).

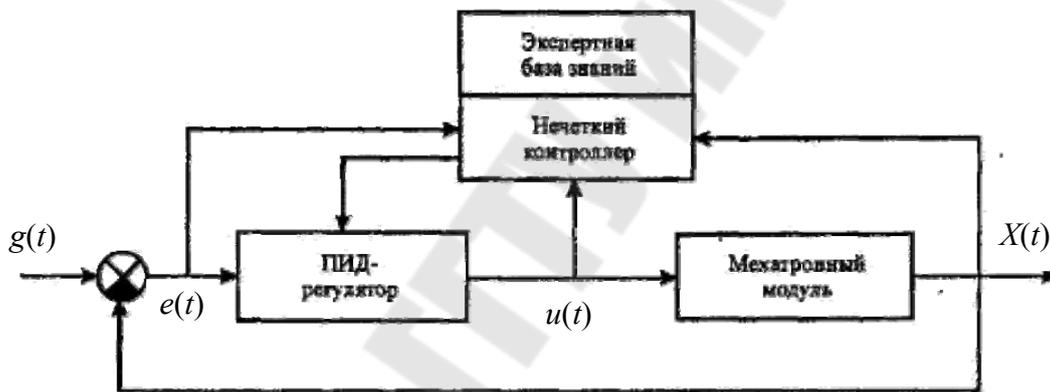


Рис. 4.3. Блок-схема нечеткого регулятора

Лингвистические правила управления (ЛПУ) рассмотрим на примере построения нечеткого ПИД-регулятора для управления скоростью движения мехатронного модуля (рис. 4.3).

Уравнение ПИД-регулятора в непрерывной форме имеет вид (4.1). Для малых периодов квантования T это уравнение можно преобразовать в разностное, если заменить производную разностью первого порядка, а интеграл – суммой. При использовании численного интегрирования по методу прямоугольников получаем для k -го шага управления:

$$u(k) = K_{\text{П}} e(t) + K_{\text{Д}} T \sum_{i=0}^k e(i-1) + K_{\text{Д}} T^{-1} [e(k) - e(k-1)]. \quad (4.2)$$

Для вычисления суммы на текущем i -м шаге, входящей в данное уравнение, необходимо помнить все предыдущие значения сигнала ошибки $e(k)$, $k = 0, \dots, i$. Поэтому этот алгоритм мало эффективен для управления в реальном времени. Для получения рекуррентного алгоритма достаточно вычесть из уравнения (4.2) следующее уравнение:

$$u(k-1) = K_{\text{П}}e(k-1) + K_{\text{И}}T \sum_{i=0}^{k-1} e(i-1) + K_{\text{Д}}T^{-1}[e(k-1) - e(k-2)].$$

В результате получим формулу для определения приращения управляющего сигнала:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) &= k_{\text{П}}[e(k) - e(k-1)] + k_{\text{И}}Te(k) + \\ &+ k_{\text{Д}}T^{-1}[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] = k_{\text{П}}Te(k) + \\ &+ k_{\text{У}}\Delta e(k) + k_{\text{Д}}T^{-1}\Delta^2 e(k), \end{aligned} \quad (4.3)$$

где $\Delta e(k)$, $\Delta^2 e(k)$ – конечные разности соответственно 1-го и 2-го порядков дискретного сигнала ошибки.

В уравнении (4.3) первое слагаемое соответствует интегральной компоненте ПИД-регулятора, второе слагаемое – пропорциональной компоненте и третье – дифференциальной составляющей регулятора.

На основании выражения (4.3) составлены следующие ЛПУ для нечеткого контроллера:

$$\begin{aligned} \text{ЛПУ1: если } e_k \text{ есть } P_1, \text{ то } \Delta u_k \text{ есть } P_{u1}; \\ \text{ЛПУ2: если } e_k \text{ есть } N_1, \text{ то } \Delta u_k \text{ есть } N_{u1}; \\ \text{ЛПУ3: если } \Delta e_k \text{ есть } P_2, \text{ то } \Delta u_k \text{ есть } P_{u2}; \\ \text{ЛПУ4: если } \Delta e_k \text{ есть } N_2, \text{ то } \Delta u_k \text{ есть } N_{u2}; \\ \text{ЛПУ5: если } \Delta^2 e_k \text{ есть } P_3, \text{ то } \Delta u_k \text{ есть } P_{u3}; \\ \text{ЛПУ6: если } \Delta^2 e_k \text{ есть } N_3, \text{ то } \Delta u_k \text{ есть } N_{u3}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Здесь величины P_i, P_{ui} и N_i, N_{ui} ($i = 1, 2, 3$) соответственно положительные и отрицательные переменные для сигналов рассогласования и управления, функции принадлежности которых представлены на рис. 4.4. Функции принадлежности для сигнала ошибки имеют вид кривой с насыщением (типа арктангенса), для управляющего сигнала – обычную линейную форму.

Правило ЛПУ1 означает, что «если текущая скорость $x(k)$ меньше заданной (другими словами, ошибка $e(k)$ положительна), то увеличить управляющий сигнал».

Правило ЛПУ4: «если скорость возрастает (т. е. приращение ошибки отрицательно), то понизить управляющий сигнал». Можно заметить, что в ряде ситуаций нечеткий вывод должен заключаться в компромиссе между противоположными по знаку действиями (например, по правилам ЛПУ1 и ЛПУ4).

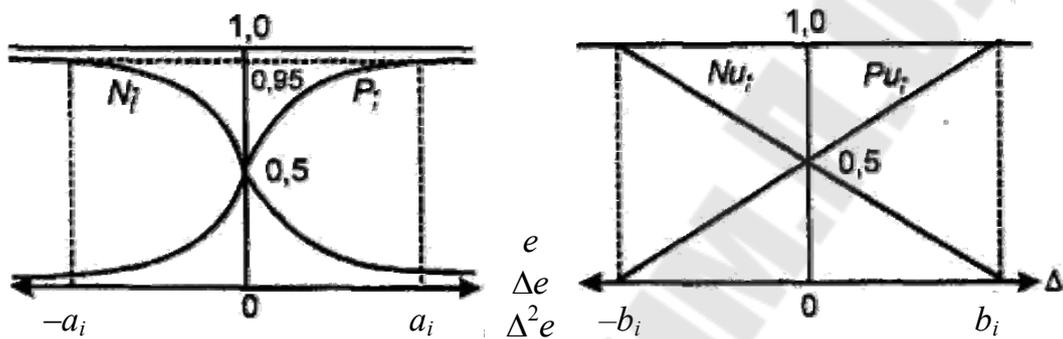


Рис. 4.4. Функции принадлежности сигналов системы

Результатом нечеткого вывода является лингвистическое значение искомой переменной. Далее по функции принадлежности необходимо найти ее численное значение (для ПИД-регулятора – конкретные значения его параметров).

Разработаны многочисленные компьютерные методы автоматического выполнения нечетких выводов, фазификации и дефазификации переменных, с которыми можно ознакомиться в специальной литературе.

Анализ современных тенденций развития теории и техники управления показывает, что нечеткие контроллеры являются одним из наиболее перспективных устройств управления для сложных технических (в частности, мехатронных) систем. Мы рассмотрели применение нечеткого контроллера на низшем – исполнительном уровне управления. Но тем более данный подход эффективен для высших уровней управления, где требуется принимать решения и планировать движение системы в условиях неопределенной информации о внешней среде и объектах работ.

4.6. Системы управления тактического уровня

4.6.1. Система контурного силового управления технологическим роботом

Рассмотрим построение системы управления тактического уровня для технологического робота, выполняющего операции механообработки на основе параметрического подхода.

Технологическая постановка задачи предполагает одновременное управление перемещением рабочего органа по заданной траектории (кривая L) и развиваемой в процессе движения силой (вектор F), которая воздействует на объект работ (рис. 4.5). Таким образом, в системе должны сочетаться методы контурного и силового управления движением робота.

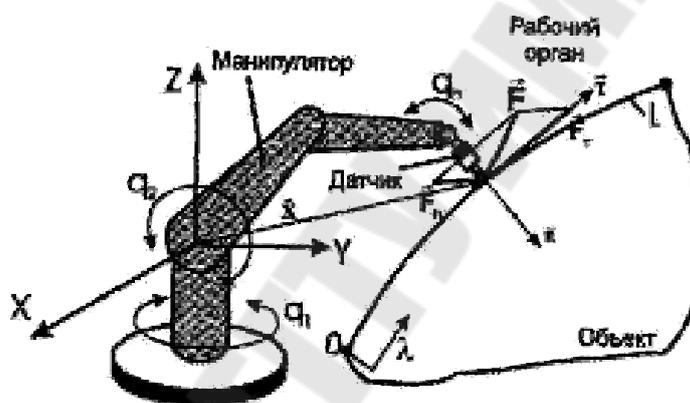


Рис. 4.5. Схема роботизированной механообработки

Робот при этом действует аналогично человеческой руке. Действительно, развивая определенные усилия в суставах руки, человек может перемещать в пространстве предметы, выполнять механическую работу. В то же время он с помощью нервно-мышечной системы воспринимает и обратные силовые воздействия со стороны объекта, что позволяет выполнять человеку многие сложные операции (например, сборочные) даже вслепую.

Приложение принципа двустороннего действия для технологических роботов требует учета их специфики как объекта автоматического управления, а также особенностей роботизированных технологических операций.

Контурная скорость робота для операции механообработки целесообразно регулировать в зависимости от величины внешнего си-

лового воздействия. Это позволяет обеспечивать высокую производительность при изменении силы в широком диапазоне из-за переменных размеров и формы заусенцев, а также предупреждать силовые перегрузки исполнительной системы робота. Например, эксперименты показали, что при зачистке облоя на шасси видеоманитофона с помощью промышленного робота РМ-01 вследствие колебаний размеров заусенцев амплитуда силы резания колебалась в диапазоне (10–300 %) от номинального значения.

На рис. 4.6 приведена блок-схема системы контурного силового управления, которая обеспечивает адаптацию движения робота к возмущающему силовому воздействию. Силовой датчик, установленный в запястье, дает информацию о силах, действующих непосредственно на рабочий орган. Силовая обратная связь замыкает систему управления на тактическом уровне, что в сочетании с обратными связями в исполнительных приводах обеспечивает необходимую точность движения. Вычислитель контурной скорости служит для задания технологически рационального скоростного режима движения робота по заданной траектории.

Задачи интерполяции траектории и решения обратной задачи о положении выполняются управляющей ЭВМ в реальном масштабе времени. Результатом работы этих программ является формирование вектора обобщенных координат $q_{pr}(t)$, который определяет желаемые перемещения степеней подвижностей манипулятора.

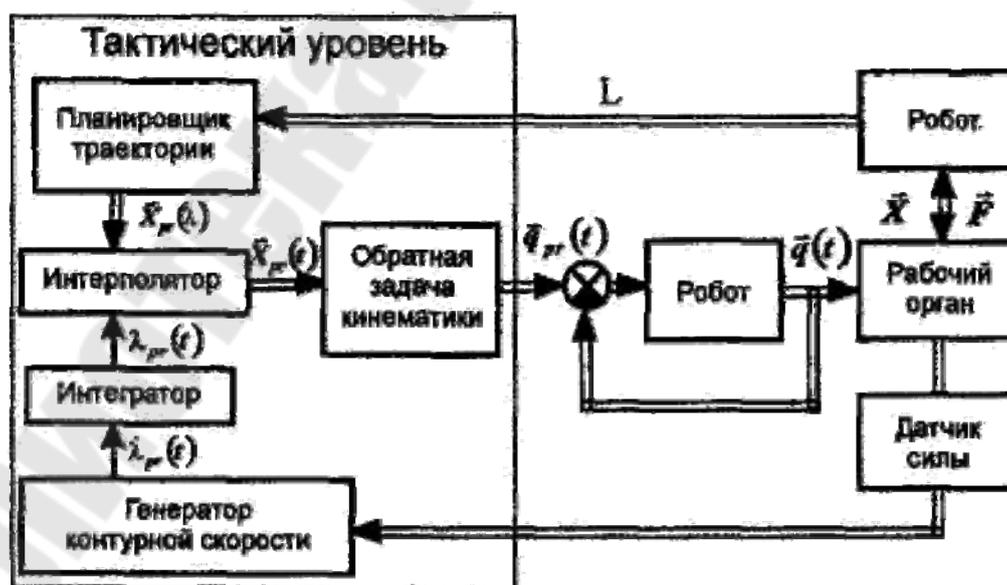


Рис. 4.6. Блок-схема контурного силового управления

Особенность параметрического подхода состоит в независимом задании траектории рабочего органа в пространстве и в адаптивном управлении его контурной скоростью во времени. Раздельное формирование законов управления движением мехатронной системы в пространстве и во времени позволяет использовать различные критерии при их оптимизации.

Интеллектуальные системы управления на основе нейронных сетей. Системы на основе нейронных сетей – один из ярких примеров бионического подхода, когда принципы функционирования и управления живыми организмами эффективно использованы для создания нового поколения систем управления техническими (в частности, мехатронными) системами.

4.6.2. Краткие сведения о нейронах и искусственных сетях

Нервная система биологических объектов состоит из нейронов. Так, нервная система человека включает в себя от 10^{10} до 10^{12} нейронов 57 модификаций, размером от микрометров до нескольких сантиметров. Типовая форма нейрона представлена на рис. 4.7.

Поток электрических сигналов входит в нейрон через его окончания (синапсы), которых может быть до 1000 на одном дендрите (ответвлении). Через дендриты информация поступает в тело клетки, где происходит ее обработка и оценка. Результат этой логической оценки (1 или 0) по аксону (стволу клетки) передается далее вниз, где информация расходится по корням нейронных структур следующего уровня. Каждый нейрон имеет связь приблизительно с 10^4 других нейронов. Нервные импульсы передаются как потоки химически активных заряженных веществ (ионов).

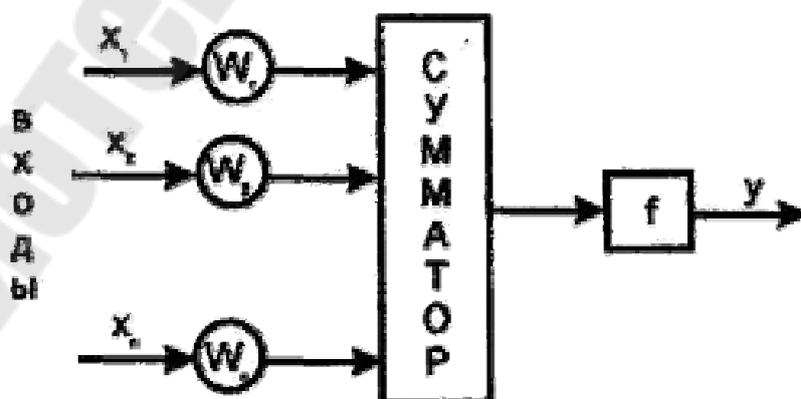


Рис. 4.7. Биологический нейрон

Математическая модель единичного нейрона строится на основе следующей схемы (рис. 4.8). Входные сигналы поступают на сумматор, где определяется их взвешенная сумма (с учетом весовых коэффициентов):

$$u = w_1 + x_1 + w_2 + x_2 + \dots + w_n + x_n.$$

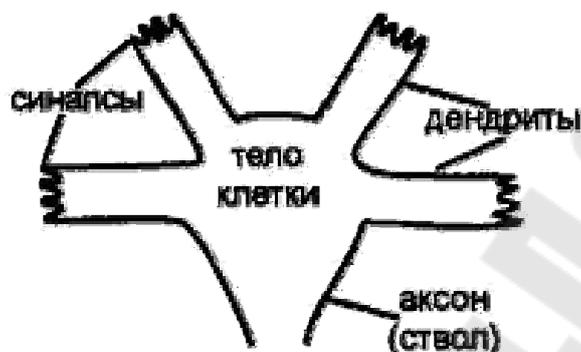


Рис. 4.8. Математическая модель нейрона

Выходной сигнал нейрона формируется на выходе нелинейного блока. При реализации нелинейного блока f обычно используются пороговые и экспоненциальные функции.

Данная математическая модель нейрона легко реализуется на компьютере. В компьютерных моделях, как и в биологических системах, нейроны объединяются в сети, которые могут состоять, из многих слоев и иметь различные структуры, включающие участки с последовательным, параллельным, с обратной связью и другими соединениями нейронов. На рис. 4.9 показан пример трехслойной нейронной сети с последовательным соединением слоев. Нейронные сети обучаются разработчиком системы на конкретных примерах. При обучении разработчик вводит информацию о входных и соответствующих (желаемых) выходных сигналах. Специальная программа настройки сети автоматически подбирает весовые коэффициенты для всех нейронов таким образом, чтобы добиться желаемого соответствия. Обучение разработчик повторяет на всех известных ему примерах, аккумулируя весь имеющийся предварительный опыт. Таким образом настроенная сеть готова к решению новых задач для других комбинаций входных сигналов. Главная особенность метода нейронных сетей состоит в том, что разработчик не должен программировать четкий алгоритм решения задач, а только задавать входные и выходные данные для обучения.

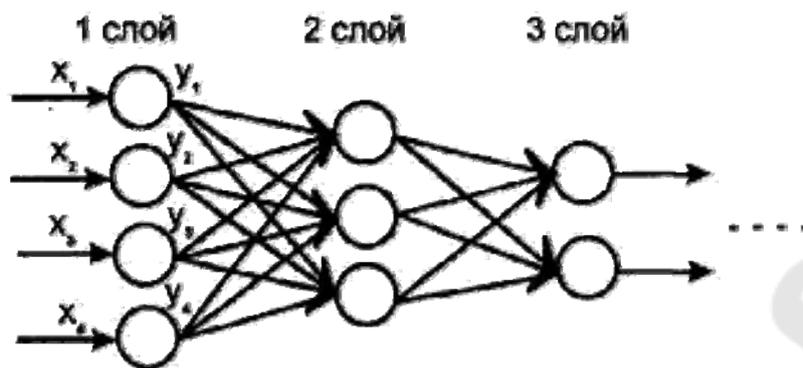


Рис. 4.9. Трехслойная нейронная сеть

Проблемы применения нейронных сетей на практике связаны с выбором типа нейронов (т. е. нелинейной функции f), количества слоев и структуры сети для решения конкретной задачи с требуемой точностью.

Контроллеры на основе НС эффективны в случаях, когда создание адекватной аналитической модели исполнительской системы и синтез на ее основе регуляторов крайне затруднен. Такая ситуация может быть обусловлена целым рядом факторов, среди которых наиболее распространенными являются:

- наличие заранее неопределенных внешних воздействий (например, при работе машины в экстремальных средах);
- переменность параметров и структуры самой мехатронной системы;
- существенные внутренние возмущающие воздействиями (например, действие сил сухого и вязкого трения в механических устройствах);
- сложные физические (в частности, динамические) взаимосвязи между элементами системы (например, в системах гидравлических приводов);
- технические и методические проблемы с постановкой и проведением экспериментальных исследований по идентификации параметров математической модели с необходимой точностью.

4.6.3. Применение нейронных сетей для управления мехатронными системами

Нейронная сеть (НС) как универсальное средство решения задач планирования и управления движением может быть использована на всех иерархических уровнях мехатронной системы. Нейроконтроллеры позволяют управлять движением машины на базе накопленных знаний.

Известен целый ряд разработок регуляторов исполнительного уровня на базе НС для управления движением мехатронных модулей. В таких нейроконтроллерах (рис. 4.10) на вход поступает информация о переменных состояния системы (механического устройства, двигателей, силовых преобразователей), действующих обобщенных силах и моментах, а также векторы задающих и возмущающих воздействий.

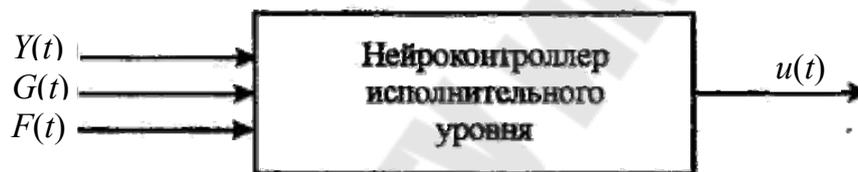


Рис. 4.10. Схема нейроконтроллера:

$Y(t)$ – вектор состояний системы; $G(t)$ – вектор управляющих воздействий;
 $F(t)$ – вектор возмущающих воздействий

Выходом НС является вектор управляющих сигналов, выдаваемых устройством управления на исполнительные приводы. Как вариант, в случае применения в системе стандартных ПИД-регуляторов на выходе НС получаем значения соответствующих коэффициентов.

Выходом НС является вектор управляющих сигналов, выдаваемых устройством управления на исполнительные приводы. Как вариант, в случае применения в системе стандартных ПИД-регуляторов на выходе НС получаем значения соответствующих коэффициентов.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности постановки задачи управления мехатронными системами?
2. Перечислите несколько признаков систем интеллектуального управления мехатронными системами.

3. Опишите структурную схему системы управления исполнительного уровня.
4. В чем суть адаптивного регулирования по эталонной модели?
5. Опишите принцип действия нечетких регуляторов исполнительного уровня.
6. Дайте характеристику системе контурного силового управления технологическим роботом.
7. Что такое нейронные сети?
8. Как используются нейронные сети для управления мехатронными системами?

Литература

1. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink: проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА-Век, 2008. – 367 с.
2. Ивановский, А. В. Начала робототехники / А. В. Ивановский. – Минск : Выш. шк., 1988. – 218 с.
3. Костров, Б. В. Искусственный интеллект и робототехника / Б. В. Костров. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2008. – 224 с.
4. Мехатроника / Т. Исии [и др.]. – М. : Мир, 1988. – 318 с.
5. Накано, Э. Введение в робототехнику / Э. Накано ; пер. с яп. под ред. А. М. Филатова. – М. : Мир, 1988. – 335 с.
6. Попов, Е. П. Основы робототехники: введение в специальность : учебник для вузов по специальности «Робототехнические системы и комплексы» / Е. П. Попов, Г. В. Письменный. – М. : Высш. шк., 1990. – 222 с.
7. Попов, Е. П. Робототехника и гибкие производственные системы / Е. П. Попов. – М. : Наука, 1987. – 190 с.
8. Робототехника / под ред. Е. П. Попова, Е. И. Юревича. – М. : Машиностроение, 1984. – 287 с. – (Автоматические манипуляторы и робототехнические системы).
9. Робототехника и гибкие автоматизированные производства : учеб. пособие для вузов : в 9 кн. / под ред. И. М. Макарова. – М. : Высш. шк., 1986. – Кн. 1–3, 5–9.
10. Справочник по промышленной робототехнике / под ред. Ш. Нофа ; пер. с англ. Д. Ф. Миронова. – М. : Машиностроение, 1990. – 480 с.
11. Чигарев, А. В. Введение в мехатронику : учеб. пособие для вузов / А. В. Чигарев, К. Циммерман, В. А. Чигарев. – Минск : БНТУ, 2013. – 387 с.
12. Шахинпур, М. Курс робототехники / М. Шахинпур ; пер. с англ. С. С. Дмитриева ; под ред. С. Л. Зенкевича. – М. : Мир, 1990. – 526 с.

Содержание

1. Общие принципы построения и области применения мехатронных и робототехнических систем	3
1.1. Концепция построения мехатронных систем. Определения и терминология мехатроники	3
1.2. Структура и принципы интеграции мехатронных систем	6
2. Мехатронные модули движения	11
2.1. Моторы-редукторы	11
2.2. Мехатронные модули вращательного движения на базе высокомоментных двигателей	12
2.3. Мехатронные модули линейного движения	16
2.4. Мехатронные модули типа «двигатель – рабочий орган»	16
2.5. Интеллектуальные мехатронные модули движения	19
2.6. Контроллеры движения	19
2.7. Интеллектуальные силовые модули	22
2.8. Интеллектуальные сенсоры мехатронных модулей и систем	23
3. Современные мехатронные системы	25
3.1. Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов	25
3.2. Робототехнологический комплекс механообработки	27
3.3. Технологические машины – гексаподы	28
3.4. Транспортные мехатронные средства	29
4. Проблематика и современные методы управления мехатронными модулями и системами	31
4.1. Особенности постановки задач управления мехатронными системами	31
4.2. Принципы построения систем интеллектуального управления в мехатронике	33
4.3. Системы управления исполнительного уровня	34
4.4. Адаптивное регулирование по эталонной модели	36
4.5. Нечеткие регуляторы исполнительного уровня	37
4.6. Системы управления тактического уровня	41
Литература	48

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

ОСНОВЫ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

Пособие

**по одноименной дисциплине
для магистрантов специальности
1-53 81 03 «Автоматизация и управление
в технических системах»
дневной и заочной форм обучения
Электронный аналог печатного издания**

Редактор
Компьютерная верстка

Н. В. Гладкова
И. П. Минина

Подписано в печать 17.12.18

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,8.

Изд. № 4.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель