

В. В. ГУСЕВ
А. Д. МОЛЧАНОВ
С. А. ПОЕЗД

ОСНОВЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

2-е издание

«Инфра-Инженерия»

УДК 621.865.8(075.8)
ББК 32.816
Г96

Рекомендовано ученым советом Донецкого национального технического университета в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» и 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» (протокол № 10 от 24.11.2017 г.)

Рецензенты:
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения ДонНТУ *А. Н. Михайлов*;
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования пищевых производств ДонНУЭТ *И. Н. Заплетников*

Гусев, В. В.

Г96 Основы мехатронных систем : учебное пособие / В. В. Гусев, А. Д. Молчанов, С. А. Поезд ; под общ. ред. д. т. н., проф. В. В. Гусева. – 2-е изд. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2026. – 124 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-2982-5

Представлены основные научные подходы, принципы построения, особенности основных компонентов мехатронных систем. Рассмотрено применение мехатронных систем в робототехнике, микроэлектромеханических системах и нанотехнологиях.

Для студентов, изучающих общий курс по мехатронике и робототехнике, а также студентов и аспирантов электротехнических направлений подготовки.

УДК 621.865.8(075.8)
ББК 32.816

ISBN 978-5-9729-2982-5

© Гусев В. В., Молчанов А. Д., Поезд С. А., 2026
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2026
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2026

Содержание

Введение 4
Тема 1. Основные понятия и определения 5
Тема 2. Принципы построения мехатронных систем 10
Тема 3. Системы управления мехатронными устройствами 14
Тема 4. Электрический, гидравлический и пневматический приводы мехатронных систем 25
Тема 5. Датчики мехатронных систем. Классификация и характеристики 35
Тема 6. Структурное моделирование мехатронных систем 56
Тема 7. Программное обеспечение, используемое при проектировании и моделировании мехатронных систем 69
Тема 8. Области применения роботов и робототехнических систем. Классификация промышленных роботов и их технические характеристики 85
Тема 9. Робототехнические системы 91
Тема 10. Микроэлектромеханические системы 98
Тема 11. Нанотехнологии и мехатроника 109
Список рекомендуемой литературы по курсу 120

Тема 1. Основные понятия и определения

Мехатроника находится только в стадии становления, и поскольку до настоящего времени ее определение и базовая терминология еще полностью не сформированы, то представляется целесообразным рассмотреть определения, выражающие суть предмета мехатроники как в широком, так и в узком (специальном) смысле [7].

Общее определение мехатроники в широком понимании дано в Государственном образовательном стандарте РФ междисциплинарной специальности 07.18 «Мехатроника» (1995 год):

«Мехатроника – это 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».

В данном определении особо подчеркнута триединая сущность мехатронных систем (МС), в основу построения которых заложена идея глубокой взаимосвязи механических, электронных и компьютерных элементов. Наверное, поэтому наиболее распространенным графическим символом мехатроники стали три пересекающихся круга, помещенные во внешнюю оболочку «Производство» – «Менеджмент» – «Требования рынка» (рис. 1). Таким образом, системная интеграция трех указанных видов элементов является необходимым условием построения мехатронной системы.

В «Oxford Illustrated Encyclopedia» можно прочитать:

Мехатроника – японский термин для описания технологий, возникших на стыке электротехники, машиностроения и программного обеспечения. Включает проектирование, производство и изучает функционирование машин с «разумным» поведением, т. е. действующих по заданной программе, их связи с другими материалами (искусственный интеллект, измерительное оборудование, систем управления).

Известно несколько определений, опубликованных в периодических изданиях, трудах международных конференций и симпозиумов, где понятие о мехатронике конкретизируется и специализируется. На основе рассмотренных выше определений предлагается следующая специальная формулировка предмета мехатроники:

«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».

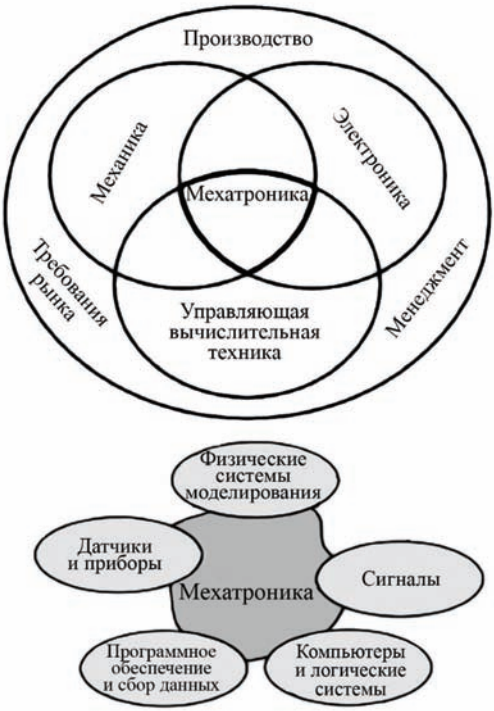


Рис. 1.1. Синергетическая сущность мехатроники (Подураев Ю. В. [7], Robert H. Bishop [1, 2])

Комментарии к определению:

1. Мехатроника изучает особый методологический (концептуальный) подход в построении машин с качественно новыми характеристиками. Важно подчеркнуть, что этот подход является весьма универсальным и может быть применен в машинах и системах различного назначения. Однако следует отметить, что обеспечение высокое качество управления мехатронной системой можно только с учетом специфики конкретного управляемого объекта. Поэтому изучение мехатроники целесообразно осуществлять по специальностям, предметом которых являются конкретные классы производственных машин и процессов.

2. В определении подчеркивается синергетический характер интеграции составляющих элементов в мехатронных объектах. Синергия (греч.) – это совместное действие, направленное на достижение единой цели. При этом принципиально важно, что составляющие части не просто дополняют друг друга, но объединяются таким образом, что образованная система обладает качественно новыми свойствами. В мехатронике все энергетические и информационные потоки направлены на достижение единой цели – реализации заданного управляемого движения.

3. Интегрированные мехатронные элементы выбираются разработчиком уже на стадии проектирования машины, а затем обеспечивается необходимая инженерная и технологическая поддержка при производстве и эксплуатации машины. В этом радикальное отличие мехатронных машин от традиционных, когда зачастую пользователь был вынужден самостоятельно объединять в систему разнородные механические, электронные и информационно-управляющие устройства различных изготовителей. Именно поэтому многие сложные комплексы (например, некоторые гибкие производственные системы в отечественном машиностроении) показали на практике низкую надежность и невысокую технико-экономическую эффективность.

4. Методологической основой разработки мехатронных систем служат методы параллельного проектирования (concurrent engineering methods). При традиционном проектировании машин с компьютерным управлением последовательно проводится разработка механической, электронной, сенсорной и компьютерной частей системы, а затем выбор интерфейсных блоков. Парадигма параллельного проектирования заключается в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех компонент системы.

5. Базовыми объектами изучения мехатроники являются мехатронные модули, которые выполняют движения, как правило, по одной управляемой координате. Из таких модулей, как из функциональных кубиков, компонуются сложные системы модульной архитектуры.

6. Мехатронные системы предназначены, как следует из определения, для реализации заданного движения. Критерии качества выполнения движения МС являются проблемно-ориентированными, т. е. определяются постановкой конкретной прикладной задачи. Специфика задач автоматизированного машиностроения состоит в реализации перемещения выходного звена – рабочего органа технологической машины (например, инструмента для механообработки). При этом необходимо координировать управление пространственным перемещением МС с управлением различными внешними процессами. Примерами таких процессов могут служить: регулирование силового взаимодействия рабочего органа с объектом работ при механообработке, контроль и диагностика текущего состояния критических элементов МС (инструмента, силового преобразователя), управление дополнительными технологическими воздействиями (тепловыми, электрическими, электрохимическими) на объект работ при комбинированных методах обработки, управление вспомогательным оборудованием комплекса (конвейерами, загрузочными устройствами и т. п.), выдача и прием сигналов от устройств электроавтоматики (клапанов, реле, переключателей). Такие сложные координированные движения мехатронных систем будем в дальнейшем называть функциональными движениями.

7. В современных МС для обеспечения высокого качества реализации сложных и точных движений применяются методы интеллектуального управления (advanced intelligent control). Данная группа методов опирается на новые идеи в теории управления, современные аппаратные и программные средства

вычислительной техники, перспективные подходы к синтезу управляемых движений МС.

Следует отметить, что мехатроника как новая область науки и техники, находится в стадии своего становления, ее терминология, границы и классификационные признаки еще строго не определены. Думается, что на нынешнем этапе первостепенное значение имеет выявление сущности новых принципов построения и тенденций развития машин с компьютерным управлением движением, а соответствующие семантические понятия и определения, безусловно, со временем устоятся.

История становления мехатроники

Историю мехатроники принято отсчитывать с 1969 года, когда японская фирма Yaskawa Electric ввела новый термин «Мехатроника» как комбинацию слов «**Меха**ника» и «Элек**троника**». В 1972 году фирма зарегистрировала этот термин как товарный знак.

Любопытно заметить, что в отечественной литературе еще в начале 50-х годов использовался подобным же образом образованный термин – «механо-троны». Так назывались электронные лампы с подвижными электродами, которые применялись в качестве датчиков малых перемещений, ускорений, вибраций и т. п. Начиная с 80-х годов термин «Мехатроника» все чаще применяется в мировой технической литературе как название целого класса машин с компьютерным управлением движением.

Первоначально мехатронными системами считались только регулирумые электроприводы. Затем сюда стали относить автоматические двери, торговые автоматы, мобильные средства и фотокамеры с автофокусировкой. В 80-х годах класс мехатронных систем пополнился станками с числовым программным управлением, промышленными роботами и новыми видами бытовых машин (посудомоечных, стиральных и т. п.). В последнее десятилетие очень большое внимание уделяется созданию мехатронных модулей для современных автомобилей, нового поколения технологического оборудования (станков с параллельной кинематикой, роботов с интеллектуальным управлением), микромашин, новейшей компьютерной и офисной техники.

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 со-

здании различных средств комплексной автоматизации производства (конвейеров, транспортёров, поворотных столов, вспомогательных манипуляторов).

Мехатронные модули второго уровня появились в 80-х годах 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 привела 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.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое мехатроника?
2. Какие области знаний необходимо объединить для изучения мехатроники?
3. Когда и как возникла мехатроника?
4. Какие уровни развития мехатроники можно выделить?

Тема 2. Принципы построения мехатронных систем

Рассмотрим обобщенную структуру машин с компьютерным управлением, ориентированных на задачи автоматизированного машиностроения, которая представлена на рис. 2.1 [7, 9]. В основу построения данной схемы положена широко известная структура автоматических роботов, введенная академиком Е. П. Поповым.

Внешней средой для машин рассматриваемого класса является технологическая среда, которая содержит различное основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку и объекты работ.

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 и моменты сил при сборке, сила реакции струи жидкости при операции гидравлической резки.

Внешние среды укрупненно можно разделить на два основных класса: детерминированные и недетерминированные. К детерминированным относятся среды, для которых параметры возмущающих воздействий и характеристики объектов работ могут быть заранее определены с необходимой для проектирования МС степенью точности. Некоторые среды являются недерминированными по своей природе (например, экстремальные среды: подводные, подземные и т. п.). Характеристики технологических сред как правило могут быть определены с помощью аналитико-экспериментальных исследований и методов компьютерного моделирования. Например, для оценки сил резания при механообработке проводят серии экспериментов на специальных исследовательских установках, параметры вибрационных воздействий измеряют на вибростендах с последующим формированием математических и компьютерных моделей возмущающих воздействий на основе экспериментальных данных.

Однако для организации и проведения подобных исследований зачастую требуются слишком сложные и дорогостоящие аппаратура и измерительные технологии. Так для предварительной оценки силовых воздействий на рабочий орган при операции роботизированного удаления облоя с литых изделий необходимо измерять фактические форму и размеры каждой заготовки. В таких случаях целесообразно применять методы адаптивного управления, которые позволяют автоматически корректировать закон движения МС непосредственно в ходе выполнения операции.

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 МС.

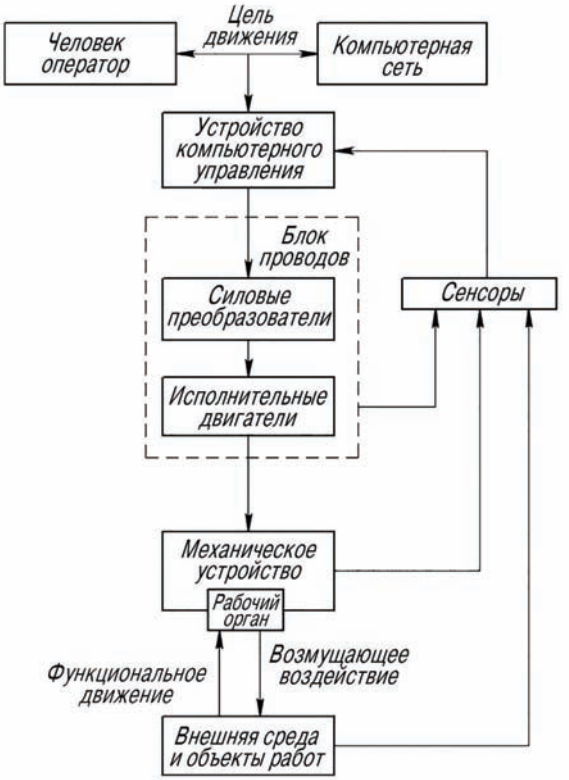


Рис. 2.1. Обобщенная схема машины с компьютерным управлением движением [7, 9]

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 (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. Универсальная мехатронная система может иметь следующую структуру (рис. 2.2, 2.3) [1, 2].

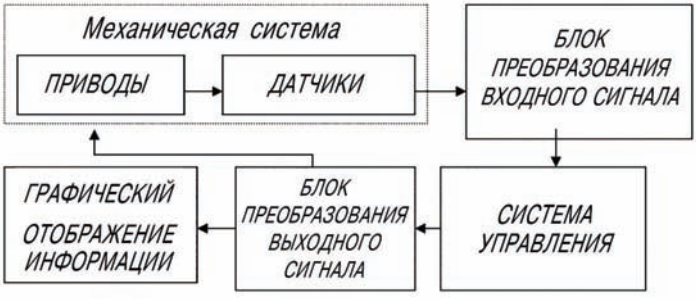


Рис. 2.2. Иерархическая структура мехатронной системы [1, 2]

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

I. Управление процессом механического движения мехатронного модуля или многомерной системы в реальном времени с обработкой сенсорной информации.

II. Организация управления функциональными движениями МС, которая предполагает координацию управления механическим движением МС и сопутствующими внешними процессами. Как правило, для реализации функции управления внешними процессами используются дискретные входы/выходы устройства.

III. Взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс в режимах автономного программирования (off-line) и непосредственно в процессе движения МС (режим on-line).

IV. Организация обмена данными с периферийными устройствами, сенсорами и другими устройствами системы.

Задачей мехатронной системы является преобразование входной информации, поступающей с верхнего уровня управления, в целенаправленное механическое движение с управлением на основе принципа обратной связи.

Характерно, что электрическая энергия (реже гидравлическая или пневматическая) используется в современных системах как промежуточная энергетическая форма.

Суть мехатронного подхода к проектированию состоит в интеграции в единый функциональный модуль двух или более элементов возможно даже различной физической природы. Другими словами, на стадии проектирования из традиционной структуры машины исключается как сепаратное устройство по крайней мере один интерфейс при сохранении физической сущности преобразования, выполняемого данным модулем.

В идеальном для пользователя варианте мехатронный модуль, получив на вход информацию о цели управления, будет выполнять с желаемыми показателями качества заданное функциональное движение (рис. 2.3). Аппаратное

объединение элементов в единые конструктивные модули должно обязательно сопровождаться разработкой интегрированного программного обеспечения.

Программные средства МС должны обеспечивать непосредственный переход от замысла системы через ее математическое моделирование к управлению функциональным движением в реальном времени.

Применение мехатронного подхода при создании машин с компьютерным управлением определяет их основные преимущества по сравнению с традиционными средствами автоматизации:

• 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 системы и комплексы под конкретные задачи заказчика.

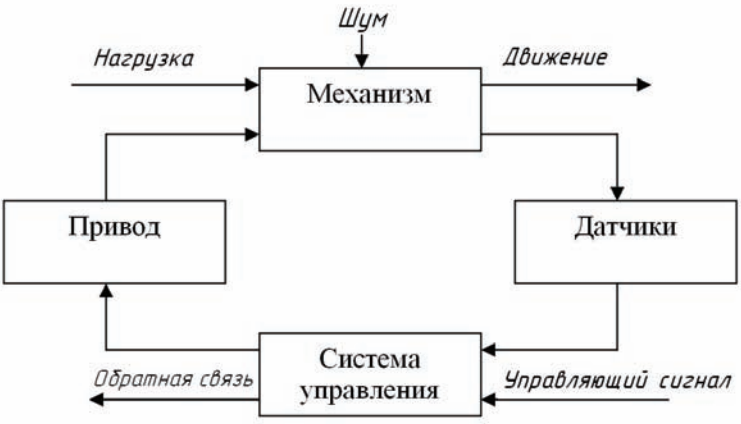


Рис. 2.3. Структура мехатронной системы

Вопросы для самопроверки

1. Какие принципы построения используются для создания мехатронных систем?

2. Представьте обобщенную схему машины с компьютерным управлением движением.

3. Какие функции выполняет устройство компьютерного управления?

4. Приведите структуру мехатронной системы.