

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МЕХАТРОНИКИ

Е.В. Шалобаев,
кандидат технических наук, доцент

Определение неологизма «мехатроника»

Общеизвестно, что базовая терминология мехатроники (МТ) пока еще не сформирована, ее границы строго не определены и общепринятого определения мехатроники на данный момент не существует [1]. Есть лишь определение, сформулированное в образовательном стандарте направления обучения «Мехатроника и робототехника» в 2000 г.:

Мехатроника - область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

В «Oxford Illustrated Encyclopedia» [2] 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).

Примечательным является тот факт, что в новейшем отечественном политехническом словаре [3] еще нет термина «мехатроника».

В 2000 г. шла длительная дискуссия по поводу отраслевого определения МТ, которое некоторыми квалифицировалось как «необъятно широкое и невнятное» [4]. Ряд участников дискуссии предлагал считать определяющим критерием мехатронности устройства новое качество, получаемое в результате органичного совмещения, интегрирования в одном устройстве механических и электронных компонент, которое придает разработанным устройствам недостижимые ранее свойства - небывалую компактность, функциональную гибкость, высокую надежность [4]. Другими словами, в рассматриваемом отраслевом определении МТ подчеркивается основной критерий соединения указанных составных частей - единство, рождающее *новое качество*, что является ответом на определенную критику [4]. Здесь надо подчеркнуть еще одно ключевое слово - «*синергетическое*» объединение, т.е.

самоорганизующееся, адаптивное по отношению к внешней среде и воздействиям объединение компонентов, взаимопроникающее, органическое [5].

В работе [6] сформулированы недостатки рассматриваемого определения. Во-первых, в определении не отражена такая составляющая МТ, как анализ исполнительных движений мехатронного объекта (МО), что является основой для синтеза и производства этих объектов, а также анализ функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов между собой и с внешней средой. Во-вторых, в определении не отражен жизненный цикл мехатронного объекта в рамках концепции CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support - непрерывная поддержка жизненного цикла изделия или продукта [7]). В-третьих, в определении искажена иерархическая структура МО.

Предлагается следующая трактовка понятия МТ, несколько модернизированная по сравнению с работами [6, 8]:

Мехатроника - область науки, посвященная анализу исполнительных состояний мехатронных объектов и функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов между ними и с внешней средой, а также синтезу мехатронных объектов. С другой стороны, мехатроника - область техники, обеспечивающая полный жизненный цикл мехатронного объекта.

Мехатронный объект синтезируется на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин с интеллектуальным управлением их функциональными состояниями (в т.ч. движениями).

В подкреплении этой позиции можно привести мнение Р. Хоккена [9], что управление точным движением является лишь одной из задач МТ, а также работу [10], посвященную мехатронной системе (МС) строительства асфальтобетонного покрытия дорог, в основу которой положено управление технологическими процессами. В этом плане также интересно определение МТ, приводимое в современной фундаментальной словаре [11]: *мехатроника решает задачи передачи и преобразования движения, манипулирования и/или давления (без относительного перемещения или при малых перемещениях).*

Тенденция расширения предметной области налицо, и, видимо, в перспективе МТ будет связана не только с обеспечением механического движения. Наряду с этим необходимо отметить, что появились еще несколько терминов, которые требуют осмысления и взаимоувязки с МТ, в частности, авионика, которая определена как комплексное название аэрокосмического приборостроения и радиоэлектроники [12].

Уточнение терминологии

Поскольку базовая терминология МТ пока еще не сформирована, в ряде работ [13-15] ставится задача систематизации и уточнения основных понятий МТ по примеру построения научно обоснованной терминологии, например, в области теории управления [16]. И это справедливо, поскольку отсутствие единой, упорядоченной терминологии часто приводит к тому, что один и тот же термин имеет несколько значений и служит для выражения разных понятий (многозначность), или для одного и того же понятия применяется несколько различных терминов (синонимия).

Пример многозначности - термин «агрегат», который присутствовал, наряду с термином «машина», в первом определении МТ, данном в образовательном стандарте 1995 г. В [11] этот термин трактуется и как часть машины, и как машина в целом. В относительно старом энциклопедическом словаре [17] агрегат - унифицированный узел машины и несколько машин работающих в комплексе. С другой стороны, унифицированная часть машины, конструктивно оформленная как самостоятельное изделие, в [11] называется модулем.

Примером синонимии в той или иной степени являются такие термины, как микромехатроника, мехатронные микросистемы, микросистемная техника, микротехника, микротехническая система (МСТ), микроэлектромеханические системы (МЭМС), микрооптоэлектромеханические системы (МОЭМС), определений которых вообще нет в современных словарях и энциклопедиях.

Некоторые термины являются неправильно ориентирующими, противоречат сущности выражаемых ими понятий и создают ложные представления. Примером может служить такой термин, как мехатронные технологии. В работе [18] под ними понимают технологии, благодаря которым создаются МО: технологии новых материалов и композитов, микроэлектронику, фотонику, микробионику, лазерные, молекулярные, пленочные и т.п. технологии. Однако, как верно отмечено в работе [19], здесь речь идет о подмене понятий: мехатронные технологии - технологии, которые реализуются на основе использования мехатронных объектов. Необходимо разъяснить, что термин «мехатроника» может толковаться широко, включая микросистемную технику, или узко - без нее [15, 20].

Указанные выше недостатки нарушают взаимопонимание среди специалистов, осложняют преподавание, мешают обмену опытом и нередко приводят к практическим ошибкам. В этой связи в ряде работ [14, 15] выдвигались предложения об уточнении таких широко применяемых понятий, как устройство, оборудование, механизм, модуль, комплекс, узел, агрегат, машина, прибор, система, особенно когда им присваиваются определения и признаки «мехатронности».

В работах [6, 8, 19, 21] были предприняты попытки сформировать иерархию МТ следующим образом. Термин «мехатронный объект» - это обобщающее понятие (что косвенно следует из работы [22]), которое включает в себя мехатронные систему, агрегат, модуль или узел.

К первому уровню относятся мехатронный узел или мехатронный модуль (ММ). ММ - унифицированный МО, имеющий автономную документацию и предназначенный, как правило, для реализации движений по одной координате. При этом, естественно, имеются в виду ММ движения. Так как МТ по определению предполагает наличие движения, то это слово из названия может быть исключено, и в этой связи имеют право на существование такие термины, как модуль программного обеспечения или модуль коммуникационной среды, поскольку они несут принципиально другую смысловую нагрузку. Примерами ММ служат части станков - шпиндельная бабка, поворотный стол. В качестве модулей могут выступать двигатели, редукторы и т.п. Более сложные модули - автономные приводы - мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-шпиндель, мотор-барабан, поворотный стол [23]. Мехатронный узел принципиально отличается от ММ тем, что он не унифицирован.

Второй уровень - агрегат (машина), включающий в себя несколько модулей, предназначенных для реализации заданных законов движения в условиях взаимодействия с внешней средой. Примерами агрегатов служат промышленные роботы, станки с ЧПУ и т.д.

Третий уровень - мехатронная система, состоящая из нескольких агрегатов или агрегата и ряда отдельных модулей, т.е. из объектов одинаковых или разных низших уровней. Система - совокупность компонентов, каким-либо образом связанных между собой: подчиненных определенному отношению, зависимости или закономерности; действующих как одно целое. МС полностью отвечает этому определению как совокупность механических, электронных и управляющих компонентов, образующих синергетическое единство, действующее как одно целое.

МС - целевое упорядоченное множество агрегатов с упорядоченными связями, динамически функционирующее во времени и пространстве и взаимодействующее со средой как единое целое. Примерами могут служить гибкие производственные системы или современные автомобили (например, Мерседес Бенц SW220 представляет собой МС, включающую до 40 управляющих агрегатов).

Термин «устройство» применяется как общее название для узла (модуля), агрегата (машины). Термин «прибор» относится к измерительным и регулирующим устройствам, предназначенным для получения и преобразования информации. Здесь полезно заметить, что в английском языке термины «прибор» и «устройство» тождественны [11].

Видимо, в дальнейшем к высшему уровню МО можно будет причислить комплекс, объединяющий несколько систем, либо систему и другие МО различных низших уровней. Определение комплекса в фундаментальном словаре [11] отсутствует, в энциклопедическом словаре [17] оно дано как совокупность предметов, составляющих одно целое. Считается, что в перспективе мехатронные машины и системы будут объединяться в комплексы на основе единых интеграционных платформ, однако последний термин также четко не определен.

В работе [6] термин «машина» был выведен из иерархии, поскольку в словаре [11] он отождествлен с агрегатом, а в фундаментальной работе [24] машина с приводом называется агрегатом. В принципе можно термин «машина» оставить как синоним термина «агрегат».

Мехатронные технологии - информационные технологии управления движением, т.е. реализация с помощью информационных технологий сложных законов исполнительных движений, которые по тем или иным причинам не могли быть реализованы ранее. Например, интеллектуализация металлорежущих станков и достижения в области динамики резания позволяют с помощью названных технологий управлять различными видами колебаний, динамической характеристикой технологической системы, корректировать органические недостатки этой системы и т.д.

Предметная область и признаки «мехатронности»

Спектр современных МО чрезвычайно широк и разнообразен. Мехатронными являются большинство современных электромеханических систем. Очень многое электронные объекты фактически являются мехатронными.

К МО разной степени мехатронности или уровней интеграции можно отнести станки с ЧПУ, промышленные и специальные роботы, многие образцы авиакосмической, военной техники и автомобилестроения. Мехатронными являются офисная техника (факсы, копиры), средства вычислительной техники (плоттеры, принтеры, дисководы), видеотехника (видеомагнитофоны), бытовая техника (стиральные, швейные, посудомоечные и др. машины-автоматы), нетрадиционные транспортные средства (электровелосипеды, грузовые тележки, электророллеры, инвалидные коляски), тренажеры для подготовки пилотов и операторов, шоу-индустрия (системы звукового и светового оформления).

Мехатронность объектов – динамическое явление, формируемое в процессе их эволюционного развития и совершенствования. Отсюда и разная степень интеграции компонентов и уровня их интеллектуализации.

К полностью МО можно отнести такие объекты, в которых реализована максимально возможная степень интеграции в сочетании с наивысшим уровнем интеллектуализации. С другой стороны, используются такие термины, как интеллектуальные МС, что предполагает наличие неинтеллектуальных МС [9].

Из изложенного можно сделать вывод, что в настоящее время приходится иметь дело по большей части с мехатронизированными объектами, чем в значительной мере и определяется настоящий период развития мехатроники.

Кстати, понятие мехатронизированного объекта ввели еще «отцы мехатроники» [25]. Игнорирование этого переходного периода, нечеткость базовых определений и вызывает достаточно часто непонимание предметной области МТ, что ведет к ненужной борьбе за пограничные области с представителями смежных научно-технических направлений [4].

Особенности проектирования механических компонентов

Согласно определению мехатроники, ее базой являются узлы точной механики. Перефразируя название работы [26], можно заметить, что МТ - второй ренессанс теории механизмов и машин, первый был связан с робототехникой.

Общая тенденция - уплотнение механики [27], а это противоречит точности. Отсюда появляется проблема увязки требований точности и компактности, а затем и миниатюризации. Для повышения надежности и долговечности также требуется повышение точности изготовления передач [28]. Кстати, надежность механических компонент выше электронных. Ряд конструкций позволяет лучше использовать объем - например, прецессирующие [29] и соосные [30] редукторы.

Эффективным способом миниатюризации зубчатых передач является принятие наименьшего числа зубьев шестерни. Установлено, что в этом случае очень полезно увеличение углов профиля [31].

Общая тенденция МТ - решение своих задач при помощи сравнительно простых механизмов, как правило с большим числом степеней свободы [11]. Отсюда - сокращение числа звеньев и кинематических пар механизмов. В качестве примера можно привести изменение редукторной части оптико-электронных преобразователей перемещений, которые бесспорно являются МО [32, 33]. Вместо 12 пар зубчатых колес - четыре колеса в планетарном механизме, и точность выше. Однако есть и парадоксальные явления - увеличение числа звеньев и кинематических пар ради улучшения точности позиционирования [34].

Большую роль в механических компонентах играет трение в кинематических парах, из-за которого происходит износ контактирующих

поверхностей. Именно с этим процессом напрямую связан термин «самоорганизация». В данном случае речь идет о «самоорганизации» геометрических форм, о чем подробнее речь пойдет в соответствующем параграфе.

В микросистемной технике, которая трактуется автором как микромехатроника [15, 20], наблюдается отказ от обычных подвижных кинематических пар в пользу упругих (в частности, для вибрационных и микромеханических гироскопов). Проблема здесь состоит во влиянии температур, материала, несовершенстве математических моделей [35]. Поступательное движение можно передавать при помощи пьезокерамики. Есть пионерские работы по использованию лазерных технологий для получения микроперемещений [36]. Для преобразования вращательного движения от микродвигателя есть необходимость в зубчатых передачах, в частности, планетарного типа, который позволяет использовать планарные технологии, присущие изготовлению микроэлектронных компонент [37].

Интеграция и мехатронный подход к проектированию

МТ - не простое объединение механики и электроники, как можно понять из названия, а качественное развитие электромеханики, информатики и механики. Первое позволяет использовать достижения микроэлектроники и встраивать в конструкции микропроцессоры, второе - разрабатывать современные программы по управлению механизмами, третье - разрабатывать прецизионную механику, а в дальнейшей перспективе широко внедрять микромеханику.

В отраслевом определении МТ подчеркнут синергетический характер объединения компонентов МО. Следовательно, ключевым принципом мехатроники является синергетическая интеграция компонентов - придание объекту качественно новых технико-экономических свойств до такого уровня, что объект невозможно расчленить на отдельные составляющие без существенного снижения показателей качества. В этом заключается радикальное отличие МО от традиционных, когда пользователь самостоятельно объединял в систему разнородные механические, электронные и информационно-управляющие компоненты разных изготовителей. Именно поэтому многие сложные комплексы (например, некоторые отечественные гибкие производственные системы) показали на практике низкую надежность и невысокую технико-экономическую эффективность [1].

МТ - это и способ системного проектирования разнородных элементов (механических, электрических, электронных). Здесь имеется в виду разнородность не только по назначению и физическим свойствам, но и по

масштабным характеристикам - от микроразмерных электронных до макроконструкций механических устройств [15, 20].

Применение мехатронного подхода по сравнению с традиционными средствами автоматизации позволяет реализовать:

- относительно низкую стоимость (благодаря высокой степени интеграции, унификации и стандартизации всех элементов и интерфейсов);
- высокое качество реализации сложных и точных движений (в результате применения методов интеллектуального управления);
- высокую надежность, долговечность (например, за счет повышения точности [28]) и помехозащищенность;
- конструктивную компактность модулей;
- улучшенные массогабаритные и динамические характеристики МО вследствие укорочения кинематических цепей механизмов;
- возможность комплектования функциональных модулей в более МО более сложных уровней под конкретные задачи заказчики [1].

При этом сложность и противоречивость требований, предъявляемых к МО, как раз и требуют применения мехатронного подхода к его проектированию, в основу которого заложена идея глубокой и неразрывной взаимосвязи составляющих МО компонентов.

В качестве основного классификационного признака в МТ предлагается принять уровень интеграции составляющих элементов [1], в соответствии с которым построена табл.1 [38].

Уровни	Мехатронные объекты
1-й уровень	Мехатронизированные модули
2-й уровень	Мехатронные модули
3-й уровень	Интеллектуальные МО
Перспективный уровень	Мехатронные комплексы

Таблица 1. Уровни развития мехатронных объектов

ММ 1-го уровня - мотор-редукторы, где механический редуктор и управляемый двигатель выпускаются как единый функциональный элемент (например, спироидные и червячные мотор-редукторы [39]). Мехатронные агрегаты на основе этих модулей нашли широкое применение при создании средств комплексной автоматизации производств (конвейеров, транспортеров, поворотных столов, вспомогательных манипуляторов). Необходимо сделать примечание: здесь приведены объекты, имеющие лишь две компоненты - механическую и электрическую, а поэтому, согласно определению, к мехатронным не относящиеся. Указанные ММ следует, по мнению автора, отнести к мехатронизированным объектам.

ММ 2-го уровня появились в 1980-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 компонентами привело к появлению ММ движения, состав которых полностью соответствует определению мехатроники, где присутствует интеграция механических, электротехнических и электронных элементов.

ММ 3-го уровня обусловлены процессом интеллектуализации МО, в первую очередь, процесса управления функциональными движениями. Одновременно идет разработка новых принципов и технологий высокоточных и компактных механических узлов, а также новых типов электродвигателей (в первую очередь высокомоментных, бесколлекторных и линейных), датчиков обратной связи и информации. Этот уровень указывает на наличие неинтеллектуализированных МО, а системы с интеллектуальным управлением завершают действующее определение мехатроники.

В дальнейшем МО будут объединяться в комплексы на базе единых интеграционных платформ.

Единый корпус и автономность

К рассмотренной проблеме примыкает проблема интегрирования в едином скомпонованном блоке трех частей - механической, электронной и управляющей. Движущийся объект, радиоуправляемый или управляемый через кабель, строго говоря, не может быть назван мехатронным [18]. Аналогично, к мехатронным нельзя отнести объекты, имеющие лишь два из трех указанных компонентов. Автономность - отличительный признак мехатронного объекта [40]. Если, например, управляющая интеллектуальная часть робота не может быть помещена на его движущейся части, то эту конструкцию можно относить к мехатронной лишь условно [18]. Из вышесказанного следует, что большинство объектов, называемых мехатронными, по рассматриваемому критерию не являются мехатронными. Однако в работе [41] используется термин «автономные МС», который, естественно, предполагает, что есть и неавтономные объекты. В работе [27] считается, что автоматизированный электропривод может быть отнесен к МО, если он автономен, или к элементу МС, если он используется в качестве исполнительного элемента рассматриваемой системы. Отсюда следует, что вопрос автономности связан с уровнем мехатронности объекта. По мнению автора, не следует исключать из предметной области МТ неавтономные объекты, поскольку автономность их может быть реализована в дальнейшем. Видимо, здесь

также необходимо говорить о том, что такие объекты - мехатронизированные.

Управление и интеллектуализация МО

Одна из целей МТ - реализация заданного управляемого движения, поэтому проблемы управления считаются одними из ключевых проблем мехатроники [27]. Создание качественно нового поколения объектов МТ требует решения широкого спектра сложнейших задач (обеспечение динамической развязки быстродействующих приводов с учетом компенсации взаимного влияния отдельных степеней подвижности, создание быстродействующих алгоритмов управления [41], инвариантных к типу кинематической схемы многозвенного МО, решение некорректных задач, учет факторов неопределенности и т.д.).

Классические принципы теории управления не обеспечивают решения этих задач по следующим причинам [42]: а) большое число источников информации о разнородных физических величинах (при этом датчики распределены в пространстве); б) велик объем вычислений, что не позволяет многоканальной системе работать в режиме реального времени; в) нехватка информации для принятия аналитического решения; г) входная информация содержит помехи, неопределенности, данные «зашумлены» и имеют «пропуски». Сюда необходимо добавить причины, вызванные многостепенностью механизмов данных объектов [43] и использованием в управлении МО биоморфных принципов [44].

На первый план выходят новые технологии управления, основанные на обработке постоянно меняющихся знаний об объекте и называемые интеллектуальными. Последние являются базой самообучения, что важно как для автономных объектов, так и для объектов, функционирующих в условиях безлюдных технологий [41].

В работе [43] к разряду интеллектуальных технологий отнесены такие информационные технологии, как экспертные системы [45], системы нечеткой логики [42, 46, 47], нейросетевые структуры [42, 48], системы с ассоциативной памятью [49]. В работе [27] они дополняются эволюционными (генетическими) алгоритмами самоорганизации.

В настоящее время среди работ по созданию высококачественных электроприводов наибольшее развитие получили технологии экспертных систем и нейросетевых структур. Экспертная оценка выполняет функции интеллектуальной надстройки над известным ПИД-регулятором и периодически подстраивает его коэффициенты в зависимости от изменения параметров следящего привода. Экспертный регулятор, занимая объем памяти порядка 350 Кб, обеспечивает адаптивное управление в широком диапазоне возмущений, но не обладает быстродействием,

необходимым для управления в реальном масштабе времени. Нейросетевой регулятор, построенный на базе 80 статических нейронов и обученный на оптимальный по быстродействию принцип функционирования, включается в контур системы управления последовательно с объектом. Он обеспечивает очень высокое быстродействие при слежении за различными входными воздействиями и, что особенно интересно, инвариантность к определенному рода внешним возмущениям. Перспективным представляется применение технологии ассоциативной памяти, поскольку реализованный на ней интеллектуальный регулятор привода требует менее 20 Кб памяти [50].

В работе [51] отмечена тенденция к интеграции интеллектуальных технологий управления, что позволяет использовать положительные свойства отдельных технологий. Так, совмещение технологий экспертных систем и нечеткой логики позволяет не только повысить быстродействие интеллектуальной системы, но и сократить объем базы знаний (по верхней оценке - от одного до двух порядков).

В работе [43] приведены примеры построения гибридных регуляторов, например, на базе как нечеткой логики, так и ассоциативной памяти, причем применение последней технологии позволяет использовать реальный масштаб времени. Другой гибридный регулятор - нейросетевой, исходная модель которого модернизирована введением механизма, упреждающего переключение для компенсации запаздывания при реализации регулятора на ЦВМ и области линейного управления в окрестности нуля фазовых координат ошибки. Его модель использует технологию ассоциативной памяти и также предназначена для использования в реальном времени.

Все изложенное имеет большую актуальность для решения задач проектирования систем интеллектуального управления с учетом противоречивости предъявляемых к ним требований.

В настоящее время применение методов и технологий обработки знаний в задачах управления на стыке искусственного интеллекта и теории управления формируются в самостоятельное новое научное направление - интеллектуальное управление. Именно на базе интеллектуального управления появляется возможность создания принципиально нового поколения техники - интеллектуальных МС, предназначенных не только для автономного функционирования в условиях неопределенной информации и организации новых технологических процессов и производств, но и для создания образцов техники, возможности которой трудно предсказать.

Использование перечисленных компонентов искусственного интеллекта в МО позволяет расширить применение традиционных методов теории управления. Механические движения МО, как правило,

существенно нелинейны, а достижение необходимой точности осуществляется использованием высокоэффективных микропроцессорных систем управления, в частности, адаптивного [52, 53]. В этих работах показаны методы построения адаптивных структур управления механическими многостепенными объектами, которые, в отличие от традиционных, не требуют точного знания всех подробностей нелинейного описания объекта управления, а сами структуры носят более универсальный характер и отличаются меньшим объемом вычислений и, как следствие, простотой реализации на базе современных вычислительных средств.

Уровень и степень интеллектуальности МО

В работе [50] вводятся понятия «уровень» и «степень» интеллектуальности систем управления (ИСУ). ИСУ имеют следующие слои обработки неопределенной информации: 1) интерактивный человеко-машинный диалог; 2) прогноз событий; 3) самообучение и адаптация; 4) работа с базами событий, знаний и формирование решений; 5) исполнительный.

Степень интеллектуальности ИСУ зависит от того, сколько слоев имеет та или иная система. Опираясь на аналогию с устойчивостью классических САУ (систем автоматического управления), в работе [53] сформулирована следующая иерархия систем управления в соответствии со степенью интеллектуальности - в малом, в большом, в целом. В первом случае функционирование ограничено двумя, во втором - тремя, а в третьем - всеми слоями интеллектуальности. Необходимо отметить, что в рассматриваемой работе под интеллектуальными системами управления понимается класс систем, строящихся с применением новой информационной технологии обработки и использования знаний.

Такой подход к синтезу ИСУ позволяет в ряде случаев повысить динамические характеристики создаваемой системы путем лингвистической аппроксимации поведенческих характеристик управляемого объекта, а также отказаться от традиционной обратной связи в САУ, если удастся адекватным образом представить ее работу с помощью знаний на основе определенных правил. Правда, если аппроксимация не удалась, то интеллектуальный регулятор может иметь худшие динамические характеристики по сравнению с обычными (например, с ПИД-регулятором).

Развивая принцип иерархического построения ИСУ, в работе [50] предложена концептуальная модель, в которой следует остановиться на следующих уровнях иерархии: исполнительном (приводном), тактическом и стратегическом. В табл. 2, модернизированной автором по материалам

[53], наглядно показана взаимосвязь уровней иерархии управления со степенью интеллектуальности ИСУ через слои обработки неопределенной информации. Из табл. 2 видно, какое реальное наполнение получает термин «интеллектуальный привод», под которым понимается привод с системой управления, имеющей степень интеллектуальности в малом.

Чрезвычайно важный и наиболее распространенный в настоящее время подкласс ИСУ - нечеткие системы управления (без самообучения, прогнозирования и интерактивного диалога) [21, 42, 46], которые относятся к числу систем управления, интеллектуальных в малом.

Уровни иерархии управления	Слои обработки информации	Степень интеллектуальности
Стратегический	Интерактивный диалог	В целом
	Прогноз	
	Самообучение	
	Знания	
	Исполнение	
Тактический	Самообучение	В большом
	Знания	
	Исполнение	
Исполнительный (приводной)	Знания	В малом
	Исполнение	

Таблица 2. Основные принципы организации интеллектуальных систем

Детерминированные и недетерминированные МО

Мехатронные объекты могут быть детерминированными, т.е. с постоянной структурой, и недетерминированными, адаптирующимися к внешним условиям [54]. При этом следует иметь в виду, что изменяться могут не только параметры, но и структура объекта. Для этого в структуре могут быть предусмотрены звенья, которые при определенных условиях включаются в работу. Примером служит планетарный механизм (степень подвижности 1), который можно легко превратить в дифференциальный (степень подвижности 2), освобождая одно из звеньев. В данном случае можно говорить о кинематической конверсии - преобразовании одного механизма в другой путем выбора разных звеньев за стойку [11], если дополнить указанное определение возможностью превращения детали стойки в отдельное подвижное звено. Аналогично, меняя характер кинематической пары за счет изменения величины зазора в ней, можно приводить в действие «резервный» механизм. Недетерминированные объекты - это интеллектуально управляемые объекты, т.к. выработка решения на изменение структуры производится лишь после анализа ситуации.

Гомеостаз, самоорганизация и антропоморфность МО

В последнее время термин «гомеостаз» стали толковать расширительно, трактуя его как способность живых организмов и кибернетических систем сохранять свое состояние в условиях меняющейся среды за счет действия обратных связей [55, 56]. При этом механизмы восстановления и поддержания гомеостаза способны обеспечить не только выживаемость организма, но и его активную жизнедеятельность в условиях изменчивой среды обитания. В связи с этим весьма актуальным является распространение принципов организации, функционирования и форм проявления гомеостатических механизмов живого организма на теорию и практику построения высокоэффективных автоматических систем, к которым с полным правом можно отнести и мехатронные объекты.

Понятие гомеостаза, методологически тесно связанное с общесистемными понятиями самосохранения, устойчивости и целостности систем, заняло прочное место среди фундаментальных понятий современной науки и породило новое направление в развитии кибернетики - гомеостатику, изучающую глубинные механизмы поддержания гомеостаза в сложных системах различной природы (биологических, технических, социальных и экономических). Для МТ использования идей гомеостаза при проектировании объектов весьма актуально, тем более что это прямой путь к бионике и к созданию биотехнических систем.

В определении МТ есть термин «синергетика» - понятие, связанное с самоорганизацией объекта, которое опирается на гомеостаз и развивает его. Самоприспосабливаемая (адаптивная) система - система автоматического управления, способная обеспечить функционирование, самостоятельно изменяя свое поведение и/или состояние в соответствии с внешними факторами, например, с характеристикой среды, с которой она соприкасается [11].

Различают следующие виды самоприспосабливаемых систем:

- самонастраиваемые - изменяют собственные характеристики для компенсации изменяемых условий функционирования;
- самообучаемые - совершенствуют характер функционирования по мере накопления опыта;
- самоорганизующиеся - изменяют свою структурную схему в зависимости от условий функционирования и/или от накопленного опыта.

Необходимо сделать замечание, что термин «самоорганизация» в случае использования союза «или» становится тождественным самообучению. Поэтому на основе определения, данного в фундаментальном словаре, предлагается следующая формулировка:

Самоорганизация - высший уровень адаптации объекта, который заключается в изменении его структуры в зависимости от условий функционирования и от накопленного при этом опыта.

В работе [57] термин «самоорганизация» напрямую связывается с трением в кинематических парах, из-за которого происходит износ контактирующих поверхностей. В данном случае, как уже говорилось, речь идет о самоорганизации геометрических форм. Физика макро- и микропроцессов самоорганизации имеет существенные различия при единой энергетической основе, поскольку самоорганизация на уровне структуры реализуется далеко от состояния термодинамического равновесия, а процесс эволюции геометрической формы осуществляется вблизи от этого равновесия. Следовательно, при проектировании кинематических пар механических компонент МО необходимо придавать составляющим их поверхностям формы, близкие к их естественному износу и соответствующие максимуму износостойкости (минимум потерь на трение). В указанной выше работе при определенных условиях к самоорганизации отнесены три процесса:

- микроприработка - формирование под влиянием износа оптимальной шероховатости и структуры поверхности (иногда этот процесс называют структурной приспособляемостью или адаптацией);
- макроприработка - приращение линий или площадей контакта при его начальной неполноте;
- собственно самоорганизация - переход сопряжения в стационарное напряженное и деформированное состояние, происходящее под влиянием изнашивания.

Рассмотренные выше подходы к самоорганизации показывают необходимость согласования используемых терминов.

В настоящее время много говорят о стремлении МО к антропоморфности, широко и длительно дискутируемой в применении к «интеллектуальным» работам.

Антропоморфизм - уподобление человеку, наделение человеческими свойствами предметов и явлений неживой природы [17]. Это положение в первую очередь относится к манипуляционным системам (механическим, состоящих из звеньев и кинематических пар, как всякий механизм), и к природе их управления, к гомеостазу технических (в том числе мехатронных) систем. Так, фирма «Хонда» представила робототехническому обществу прототип гуманоида и поставила вопрос об использовании строго антропометрической концепции для создания новых направлений исследований в робототехнике [9].

Бионика - прерогатива не только робототехники, но и мехатроники, дальнейшее развитие которой пойдет по пути синтеза с бионикой,

поскольку любой мехатронный объект представляет собой имитацию живого организма. В этой сфере интенсивно развиваются такие биотехнологии, которые приводят к созданию биопротезов (в том числе и активных - эндопротезов), диагностирующих и профилактических приборов. Сначала изучается состояние объекта, в результате обработки данных принимается решение об использовании тех или иных каналов воздействия на объект, т.е. выбирается структура и сила влияния на объект, затем производится новая диагностика и завершение работы или новая итерация.

Современный этап развития мехатроники

Современный этап можно охарактеризовать как переход от мехатронизированных объектов к мехатронным. Факторы, сдерживающие процесс расширения области применения мехатронных объектов, можно разделить на субъективные и объективные [27].

Первые обусловлены ограниченным распространением идей мехатроники. Сегодня мехатроника представляет собой пока еще недостаточно доступную для большинства общества отрасль техники. Множество идей, интересных решений и оригинальных разработок мехатроники в наиболее «критических» областях современной науки и технологии, особенно в военно-промышленном комплексе, до сих пор не востребованы к внедрению в других областях, поскольку об этих разработках информирован лишь узкий круг специалистов. Отсюда вытекает задача, требующая первоочередного решения, по подготовке научных и инженерных кадров, способных создавать МО, отвечающие перспективным требованиям, с учетом теоретических положений мехатроники и тенденций развития ее компонентов.

Вторые являются следствием естественного процесса дифференциации мехатронного знания. Мехатронные идеи и образ мышления, связанные с применением микроэлектроники и средств вычислительной техники для управления движением машин и механизмов и машин, начали проникать в самые различные области техники еще задолго до появления самого термина МТ (работы А.Ю. Ишлинского и Д.Е. Охоцимского [58]). При этом постоянный рост потребности в объектах, которые сегодня классифицируются как мехатронные, и непрерывное расширение сферы их применения стимулировали развитие конкретных отраслей техники. В результате мехатронные методы и технологии изначально развивались самостоятельно во многих достаточно разнородных научно-технических направлениях, связанных с той или иной предметной областью. Такими направлениями современной МТ являются управление приводами, роботами, станочными системами, летательными аппаратами и т.п. В

каждом из этих направлений изучаются свои, специфические задачи исследования и проектирования мехатронных объектов, накоплен богатый опыт решения данных задач. Однако следует констатировать, что, к сожалению, разные направления МТ развиваются изолированно, обмен информацией между ними сведен к минимуму.

Современный этап развития МТ характеризуется усилением интегральной тенденции, призванной в определенном смысле воссоединить отдельные ее направления. Дело в том, что многие принципы построения МО, методы их исследования и проектирования и, особенно, их алгоритмическое и программное обеспечение являются инвариантными к предметной области различных направлений мехатроники. Именно в местах соприкосновения данных научно-технических направлений в результате их взаимного «оплодотворения» следует ожидать наибольших результатов дальнейшего развития МТ. Как точно заметил «отец кибернетики» Н. Винер, «важные исследования задерживаются из-за того, что в одной области неизвестны результаты, уже давно ставшие классическими в смежной области».

Сказанное выше вполне объективно, поскольку МТ имеет достаточно разнородные составляющие. Таким образом, объективные и субъективные факторы, сдерживающие развитие МТ, смыкаются.

Современный уровень развития мехатроники - сложность осознания ее необходимости потребителями и разработчиками. Здесь уместно привести высказывание [59]: простота - это наиболее рациональное выражение истины, а сложность - необходимый этап перехода к ней. Может быть, в России этап перехода несколько затянулся.

К истории кафедры мехатроники ИТМО

Кафедра мехатроники - первая кафедра подобного типа в СССР и в России - образовалась в 1950/1951 уч.г. как кафедра конструкторского профиля под названием «Теория механизмов и деталей машин» (зав. кафедрой проф. Л.П. Рифтин), с 1964 г. была преобразована в кафедру теории механизмов и деталей приборов (зав. кафедрой проф. Ф.Л. Литвин), и в 1991г. обрела сегодняшнее название (зав. каф. - проф. Б.П. Тимофеев).

К созданию кафедры МТ причастны бывшие ее аспиранты, проф. К. Минков и доц. П. Парушев, организовавшие в 1988 году лабораторию МТ в Институте механики и биомеханики Болгарской АН (научный руководитель акад. М. Константинов). Встречи с ними в 1988-1990 гг. автора данной публикации и Б.П. Тимофеева, знакомство с их работами [26, 54, 60-64] и послужили толчком для создания кафедры МТ.

В 1992 году состоялся первый набор на специализацию «Прецизионные устройства мехатроники» в рамках специальности «Приборостроение» и,

соответственно, первый выпуск был произведен в 1996 г. К 2001 г. уже 52 выпускников-приборостроителей кафедры специализировались в области МТ. Первый выпуск по специальности 0718 - «Мехатроники» произведен в 2000 г. - 16 чел., а к февралю 2002 года число их превысит 50. Подчеркивание приоритета не случайно, поскольку информация об этом, к сожалению, недостаточно известна среди вузов страны [65].

Научная деятельность кафедры МТ постепенно обретала соответствующие черты. Были проведены Всесоюзная конференция по проблемам точности и качества механических передач [66], Международный семинар по прикладным вопросам точности механизмов. С 2000 г. по инициативе члена-корреспондента РАН Н.И. Комяка на базе кафедры мехатроники ежегодно проводится Межвузовская конференция «Мехатроника и микросистемная техника», в работе которой активное участие принимают учебные вузы, академические институты, промышленные предприятия.

Научные направления кафедры - проблемы механики (динамика с учетом нелинейностей, теория высшей кинематической пары) и управления в МТ, исследования в области точности и трибологии, САПР и оптимизация при проектировании элементов конструкций, техническая диагностика, применение новых конструкционных материалов. На кафедре созданы приборы для измерения точности передач, высокоскоростные кинокамеры, оптоэлектронные преобразователи перемещений в код [33], автоматические регистрирующие приборы [21], эхолоты для исследований подземных пустот [67], манипуляционные системы, сканирующие лазерные установки [68].

Заключение

Появление МТ не просто вызывает необходимость в новых технологиях, а принципиально меняет взгляд на технологические науки, переводя их на системный уровень, учитывающий сложные взаимосвязи между проектированием, изготовлением, сборкой, отладкой, эксплуатацией, ремонтом и утилизацией объектов [22].

Развитие МТ должно привести к совершенствованию интегрированного производства. В машиностроении МТ должна сыграть большую роль в повышении точности обработки деталей и сборки узлов, в реализации разнообразнейших сочетаний механических движений, в создании принципиально новых технологических процессов производства и обработки композиционных материалов.

Дальнейшее развитие МТ, судя по всему, пойдет по пути синтеза с бионикой, поскольку любой МО в значительной мере представляет собой имитацию живого организма. В этой сфере интенсивно развиваются такие

биотехнологии, которые приводят к созданию «искусственного сердца», «искусственной почки», биопротезов, диагностирующих и лечебно-профилактических приборов с обратной связью [68].

Управление МО будет развиваться, используя все положительные свойства как имеющихся, так и будущих интеллектуальных технологий. Представление требуемого движения, возможно, будет осуществляться при помощи голографического образа, заложенного в память объекта [33]. Немыслима без МТ и современная военная техника [20].

Мехатронные технологии оказывают и будут еще больше оказывать влияние на социальные условия жизни населения, что связано как с интеллектуализацией условий труда и быта, повышением качества и комфортности транспортных средств, повышением качества медицинского обслуживания, так и с сокращением рабочих мест. Отсюда последуют и структурные изменения в экономике.

Мехатроника - наука будущего, включающая в себя комплекс идей, методов и средств для создания компьютерно-контролируемых и программируемых механических систем с заданными функциями, имеющим энергетические (в том числе информационные) и силовые взаимодействия с окружающей средой.

Мехатроника - системная мировоззренческая научная дисциплина, позволяющая оценить любой МО с точки зрения управления, основа автоматизации любых объектов жизнедеятельности человека, и в этой связи она должна являться предметом изучения практически всех инженерных, и не только инженерных, специальностей.

Литература

1. Подураев Ю.В., Кулешов В.С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. №1. С.5-10.
2. Оксфордская иллюстрированная энциклопедия в 9-ти т.т. Изобретения и технология. - М.: Изд. Дом «Инфра-М», 2000. Т.6. С.185.
3. Новый политехнический словарь / Под ред. А.Ю. Ишлинского. - М.: Науч. изд-во «Большой Рос. энциклопедии», 2000. С.671.
4. Ильинский Н.Ф. В редакцию журнала «Мехатроника» // Мехатроника. 2000. №5. С.46-47
5. Дульнев Г.Н. Введение в синергетику. - СПб.: Проспект, 1998. - С.256.
6. Аршанский М.М., Шалобаев Е.В. Мехатроника: основы глоссария // Мехатроника. 2001. № 4. С.47-48.
7. Морозов В.В. CALS - технологии вв автоматизированном проектировании и управлении производством машиностроительной продукции // Сб. науч. тр. - Муром: изд-во ВлГУ, 2001. С.103-113.
8. Шалобаев Е.В. К вопросу об определении мехатроники и иерархии мехатронных объектов // Датчики и системы. 2001. №7. С. 64-67.
9. Пупков К.А. Седьмой форум по мехатронике // Мехатроника. 2001. №3. С.46-47.

10. Загороднюк В.Т., Грошев А.Е. Мехатронная система строительства асфальтобетонного покрытия дорог // Мехатроника. 2001. №8. С.28-31.
11. Крайнев А.Ф. Механика машин: Фундаментальный словарь. - М.: Машиностроение, 2000. С.904.
12. Авионика России. Энциклопедический словарь / Под ред. С.Д. Бодрунова. - СПб.: НААПС, 1999. С.950.
13. Коськин Ю.П., Путов В.В. Проблемы и перспективы современного развития электромехатроники // Мехатроника. 2000. №5. С.5-9.
14. Зариктуев В.Ц. К проблеме создания мехатронных станочных систем (информационный аспект) // Мехатроника. 2000. № 4. С.23-27.
15. Шалобаев Е.В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней // микросистемная техника. 2000. №4. С.5-9.
16. Теория управления: Терминология. Вып. 107. М.: Наука, 1988. 56с.
17. Советский Энциклопедический Словарь / Под ред. А.М. Прохорова. - М.: Сов. энциклопедия, 1981. С.1600.
18. Снесарев М.Ю. Мехатроника, основные понятия, современный и прогнозируемый уровень мехатронных систем // Энциклопедия: Машиностроение. Т-III-8. - М.: Машиностроение, 2000. С.714-730.
19. Аршанский М.М. Мехатронные технологии обработки металлов резанием // Мехатроника. 2000. №1. С.39-41.
20. Шалобаев Е.В. Соотношение мехатроники и микросистемной техники // Сб. науч. трудов: Вооружение, автоматика и управление. - Ковров: КГТА, 2001. С.328-329.
21. Петров С.Ю., Шалобаев Е.В. Универсальные регистрирующие и показывающие приборы как элемент иерархии мехатронных объектов // Мехатроника. 2001. № 5. С.29-34.
22. Аршанский М.М., Кулешов В.С., Лакота Н.А. От редакционной коллегии // Мехатроника. 2000. №1. С.2.
23. Дроздов В.Н., Никифоров В.О., Волков М.А. Математическая модель мехатронного поворотного стола // Электричество. 1997. №2. С.42-47.
24. Артоболевский И.И. Теория механизмов. - М.: Наука, 1963. 776 с.
25. Мехатроника: Пер. с яп. / Т.Исии, И.Симояма, Х.Иноуэ и др. - М.: Мир, 1988. С.318.
26. Минков К. Робототехника - ренессанс теории механизмов и машин // Материалы 3-й Междунар. школы: Применение механики в робототехнике и новых материалов. - Варна: изд-во Болг.АН, 1988. С.42-47.
27. Антонов Б.И., Филимонов Н.Б. Не «обо всем», а о мехатронике (о границах проблематики журнала) // Мехатроника. 2000. № 6. С.43-47.
28. Шалобаев Е.В., Сабо Ю.И. Увеличение ресурса зубчатой передачи на основе повышения точности ее изготовления // Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции. - СПб.: ИТМО, 2000. С.51.
29. Bostan I. The Creation of High-Strength Planetary - Precession Reducers of New Generation // Gearing and Transmissions. 1991. №1. P.35-39.
30. Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов // Под общ. ред. В.Е. Старжинского и Е.В. Шалобаева. СПб.-Гомель: ИММС НАН Б, 1998. С.538.
31. Oleksiuk W. Profile angle differentiation - a particular feature of smallmodule involute teeth employed in mechatronic equipment // Gearing and Transmissions. 1995. №2. P.12-24.
32. Коськин Ю.П., Путов В.В. Проблемы и перспективы современного развития электромехатроники // Мехатроника. 2000. №5. С.5-9.

33. Меськин И.В., Мальцев Л.Н., Шалобаев Е.В. Обзор состояния разработок голографических цифровых оптоэлектронных преобразователей перемещений // Известия вузов. Приборостроение. 2000. №1-2. С.44-48.
34. Тимофеев Б.П. Точная механика. Современные проблемы // Известия вузов. Приборостроение. 1998. т.41, №1-2. С.73-84.
35. Шалобаев Е.В. Проблемы микросистемной техники и XXI век // Микросистемная техника. 2001. №37-38.
36. Вейко В.П. Лазерная микрообработка // Известия вузов. Приборостроение. 2001. №6. С.5-16.
37. Шилько С.В., Старжинский В.Е. Разработка технологии изготовления зубчатых колес для микроэлектромеханических систем // Сб.: Проблемы исследования, проектирования и производства зубчатых колес. - Ижевск: ИжГТУ, 2001. С.159-164.
38. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. - М.: МГТУ-СТАНКИН, 2000. 80с.
39. Гольдфарб В.И. Спироидный мотор-редуктор // Передачи и трансмиссии. 1994. С.39-48
40. Шалобаев Е.В. Письмо в редакцию // Мехатроника. 2001. №2. С.47
41. Лохин В.М. Интеллектуальные системы управления // Мехатроника. 2001. №1. С.28.
42. Кулиш И.А., Подураев Ю.В., Шомко Й. Интеллектуальное управление мобильными роботами на основе комбинации нейросетевого и нечеткого методов // Мехатроника. 2001. №5. С.8-11.
43. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Принципы организации интеллектуального управления мехатронными системами // Мехатроника. 2001. №1. С.29-38.
44. Смольников Б.А., Романов С.П., Юревич Е.И. Бионика в робототехнике // Мехатроника. 2001. №1. С.25-27.
45. Экспертные системы: инструментальные средства // Л.А.Керов, А.П.Частиков и др. Под ред. Ю.В.Юдина. - СПб.: Политехника, 1996. - С.220.
46. Шалобаев Е.В., Шифрин Б.М., Петров С.Ю. Нечеткая логика как элемент теоретической основа управления в мехатронных системах // Сб.: Управление в технических системах. - Ковров: КГТА, 2000. С.49-51.
47. Ющенко А.С., Киселев Д.В. Ситуационное управление мобильным роботом на основе нечеткой логики // Мехатроника. 2000. №5. С.10-15.
48. Голицын Г.А., Фоминых И.Б. Интеграция нейросетевой технологии с экспертными системами // Труды 5-й конф. по искусственному интеллекту. - Казань: ТГУ, 1996. С.34-35.
49. Associative Neural Memories: Theory and Implementation / Ed. M.H.Hassoun, N.Y.: Oxford Universitet Press. 1993.
50. Лысов Н.Ю. Разработка и исследование быстродействующих интеллектуальных приводов мехатронных систем // Мехатроника. 2001. №2. С.35-43.
51. Лохин В.М., Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения // Мехатроника. 2001. №2. С.27-35.
52. Мирошник И.В., Никифоров В.О. Адаптивное управление пространственным движением нелинейных объектов // Автоматика и телемеханика. 1991. №9. С.78-87.
53. Путов В.В. Адаптивное управление динамикой сложных мехатронных систем // Мехатроника. 2000. №1. С.20-25.
54. Мехатроника: Недетерминировани мехатронни системи / П.Парушев, К.Георигиев, К.Костадинов и др. // Актуални проблеми на науката. Т.XVII. № 2-3. - София: изд.-во Болг.АН, 1990. - 101с.

55. Филимонов Н.Б. Гомеостатические системы и двух режимный автомат ограничений состояния управляемых динамических объектов // Известия вузов. Приборостроение. 1998. №1-2. С.17-34.
56. Шалобаев Е.В.. Современное состояние и ближайшие перспективы развития мехатроники // Материалы 4-й Междунар. конф.: Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии. - Владимир: ВГУ, 2000. С.255-260.
57. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. Л.: Машиностроение, 1990. С.208.
58. Александров В.В. Несколько слов о мехатронике // Мехатроника. 2001. №1. С.4.
59. Лагутина Г.С. О простоте и сложности // Конверсия в машиностроении. 1994. №4. С.50-51.
60. Konstantinov M., Patarinski S., Seturov Z., Markov L. Mechatronics // Pros. 7-th Congress on IFToMM. V.I, Sevilla, Sept. 17-22, 1987.
61. Минков К. Роботика. София: изд-во ун-та К.Охридски, 1986. 314с.
62. Минков К. Неортогонализм в природе и машиностроении // Труды ИМБМ - София: изд-во Болг.АН, 1988. С. 174-180.
63. Гълъбов В. Мехатроника и кинематична геометрия // Материалы 3-й Международной школы: Применение механики в робототехнике и новых материалов. - Варна: изд-во Болг.АН, 1988. С.184-191.
64. Парушев П., Кулев А. Болгарский опыт в мехатронике // Mechatronics (пер. с англ.). 1990. №8. С.78-85.
65. Кулешов В.С., Подураев Ю.В. Первый выпуск дипломированных специалистов по специальности «Мехатроника» // Мехатроника. 2001. №5. С.42-45.
66. Проблемы качества механических передач и редукторов. Точность и контроль зубчатых колес и передач // Под ред. Б.П. Тимофеева и Е.В. Шалобаева. - Л.: ЛДНТП, 1991. 120с.
67. Кругликов В.К., Ноздрин М.А., Брицкий В.Д. и др. Скважинный прибор «Сканер-98» // Диагностика веществ, изделий и устройств. - Орел: ОГТУ, 1999. С.101-102.
68. Шалобаев Е.В., Юркова Г.Н., Ефименко В.Т., Ефименко А.В. Лазерные стимуляторы // Датчики и системы. 2001. № 8. С.58-59.