

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Институт машиностроения и автомобильного транспорта

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
для практических занятий и самостоятельной работы
по курсу «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ»**

Направление подготовки 13.04.03 – «Энергетическое машиностроение»
Профиль подготовки – двигатели внутреннего сгорания
Уровень высшего образования – магистратура
Форма обучения очная

Составитель д.т.н. проф. Драгомиров С.Г.

Владимир – 2016

1. ДИАЛЕКТИКА РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современные машины и аппараты представляют собой совокупность элементов, находящихся друг с другом в особых отношениях и образующих сложную систему.

Существует множество различных определений понятия система, в том числе, описательное и конструктивное.

Описательное определение объясняет систему как совокупность объектов, причем свойства системы зависят от отношений между этими объектами.

В рамках **конструктивного определения** систему рассматривают как конечное множество функциональных элементов и отношений между ними, выделяемое из среды в соответствии с определенной целью и в определенном временном интервале.

Теория технических систем оперирует понятием «техническая система» (ТС). Системный подход позволяет осуществить выбор оптимального варианта уже на этапе проектирования технического устройства. Под **технической системой** в теории систем понимается созданное человеком или автоматом физически существующее устройство для выполнения определенных функций.

Основные признаки технических систем:

- системы состоят из частей, элементов, то есть имеют структуру,
- элементы (части) системы имеют связи друг с другом, соединены определенным образом, организованы в пространстве и времени;
- системы созданы для каких-то целей, то есть выполняют полезные функции;
- каждая система в целом обладает каким-то особым качеством, не равным простой сумме свойств составляющих ее элементов, иначе пропадает смысл в создании системы (цельной, функционирующей, организованной).

Отсутствие хотя бы одного из перечисленных признаков не позволяет считать объект технической системой.

Развитие любой технической системы определяется соответствующими критериями развития, которые можно разделить на четыре группы

- функциональные;
- технологические;
- экономические;
- антропогенные.

Под **функциональными критериями** понимаются те критерии, которые непосредственно отвечают назначению системы. Другими словами, это эксплуатационные характеристики технической системы, например: скорость, высота полета, дальность стрельбы, точность позиционирования робота, количество позиций смены инструмента и т.д.

Технологические критерии позволяют оценить возможности изготовления данной технической системы (материалоемкость, энергоемкость, степень автоматизации и т.д.).

Технологические критерии тесно связаны с **экономическими критериями**, определяющими затраты на изготовление, проектирование, эксплуатацию, ремонт.

По **антропогенным критериям** можно оценить удобство и безопасность создаваемой системы для человека - это дизайн, эргономичность, экологичность.

Основным законом развития техники является **закон улучшения одних критериев и не ухудшения при этом других**.

Технические системы (независимо от своего назначения) последовательно проходят в своем развитии три этапа: медленное нарастание (подготовка), быстрый лавинообразный рост (интенсивное развитие) и стабили-

зация (стагнация) одной из главных эксплуатационных характеристик системы.

Кривая, построенная в осях координат, где по вертикали откладывается численное значение одной из эксплуатационных характеристик, а по горизонтали - возраст технической системы или затраты на ее развитие, получила название S-образной линии жизни технической системы. S-кривая является иллюстрацией качественного развития технической системы (рис.1).

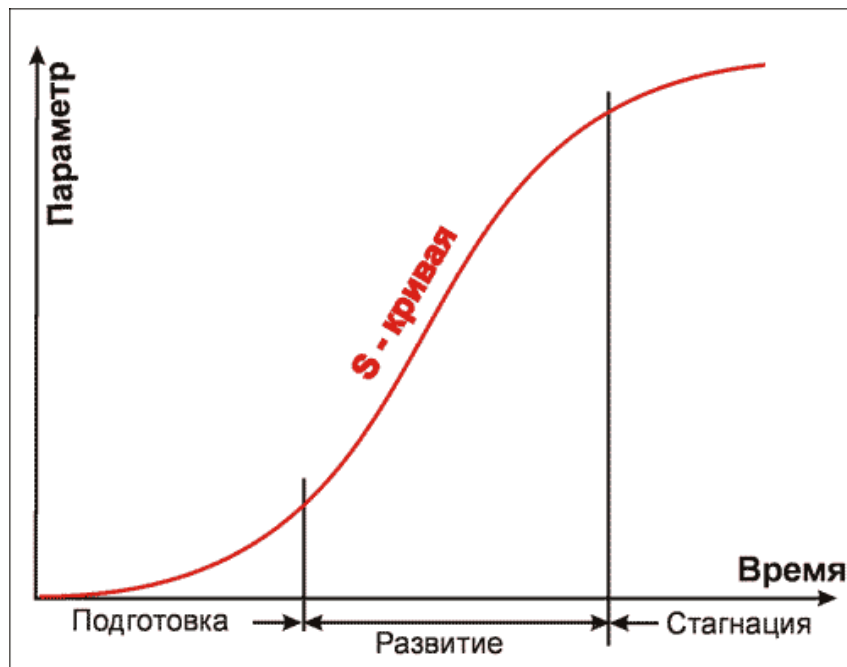


Рис.1.1. Типичная S-образная кривая развития технических систем

Первый этап (подготовка) - медленный рост и становление системы (рождение и детство системы).

Второй этап (развитие) - период интенсивного развития технической системы. Характерной чертой данного этапа развития становится активная экспансия новой системы - она вытесняет другие, устаревшие системы из экологических ниш, порождает множество модификаций и разновидностей, приспособленных для разных условий.

Третий этап (стагнация) – старость и смерть технической системы.

Основным содержанием этапа является стабилизация параметров системы. Некоторое улучшение эксплуатационных характеристик еще наблюдается в начале этапа, но затем параметры остаются на прежнем уровне, несмотря на то, что вложения сил и средств растут. Резко увеличиваются сложность, наукоемкость системы, даже небольшое улучшение параметров требует, как правило, очень серьезных исследований. Другими словами, наблюдается кризис системы, создающий предпосылки для появления новой (альтернативной) системы.

Именно на третьем этапе для сохранения жизнеспособности системы привлекаются достижения из смежных областей науки и технологии. Для поршневых двигателей можно назвать две такие области, современные достижения в которых позволяют повысить технический уровень двигателей и продлить их жизнеспособность:

- область автоматического электронного управления объектами, включая интеллектуальные средства управления;
- область новых материалов и технологий.

Существует ещё и четвертый этап – коренное изменение системы, переход на новый уровень развития.

На всех четырех этапах развития технической системы действуют свои законы и закономерности.

Иногда считается, что S-образный закон совершенно не отражает сущности происходящих в системах изменений - он лишь демонстрирует их результат, выраженный в изменении главных показателей. Но в реальности он, не вдаваясь в технические тонкости, позволяет своевременно увидеть закономерности процесса и приближающиеся тенденции и сделать соответствующие выводы.

Если рассматривать любое экспоненциальное развитие, то становится совершенно ясно, что рано или поздно любая экспонента приблизится к уровню когда развитие системы замедлится. Если проще то любая экспонента при конечной величине ее показателя стремится к бесконечности, а этот

результат просто недостижим. В реальной жизни любой процесс или система на некотором максимальном для нее уровне замедляют развитие или наступает остановка или даже его падение.

На примере производства микропроцессоров можно интерпретировать S-кривую следующим образом (рис.1.2). Участок 1 (подготовка) - разработка тех. процесса, подготовка оборудования и отработка технологии, выпуск установочных партий, вплоть до вывода на экономически обоснованный выход годных изделий. Участок 2 (развитие) - выпуск различных моделей и архитектур процессоров на данном тех. процессе. Участок 3 (стагнация) - исчерпываются возможности роста производительности микропроцессора при данном тех. процессе.



Рис.1.2. Анализ интенсивности процессов развития технической системы

На втором участке S-образной кривой имеет место выпуск продукции с максимальной интенсивностью и в максимальных количествах, с постоянно улучшающимися характеристиками.

Другая интерпретация S-образной кривой показана на рис.1.3. Здесь по вертикальной оси отложен некоторый параметр Δ , который характеризует скорость изменения главного параметра ТС. На начальном участке скорость изменения падает с максимальной, до некоторой меньшей величины. Это время, когда технологии имели наработки позволяющие выполнять любые требования потребителей. - На центральном участке прирост показателя стабилизировался. Это время, когда дальнейшее развитие требует больших усилий и затрат. На конечном участке скорость изменения начинает падать. Это может быть вызвано достижением некоторого уровня, когда нарастающие трудности начинают сказываться на производстве.

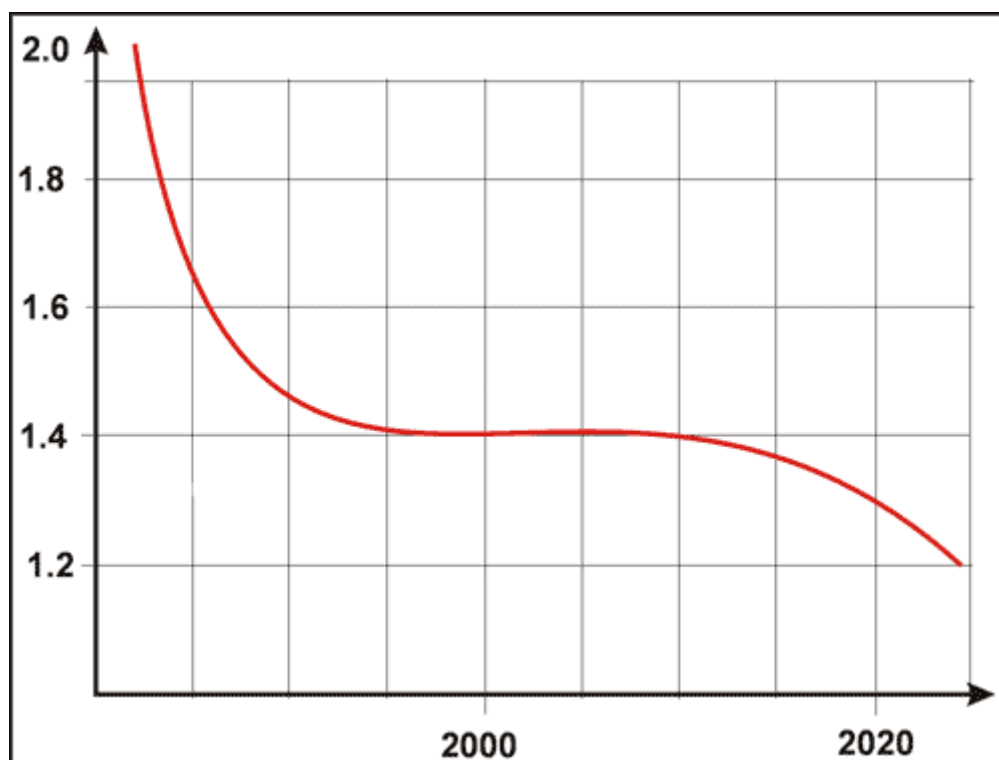


Рис.1.3. Скорость изменения прогрессивный изменений в ТС за период ее существования

Данная зависимость говорит не об остановке развития, а об исчерпании возможностей данного процесса или технологии и подталкивает к поиску новых решений. Новое решение запускает следующий этап развития, описываемый также новой S-образной кривой (рис.1.4)

Так общее развитие отрасли или системы представляет собой последовательные цепочки S - кривых.

В реальной жизни, ресурсы часто заканчиваются не от того что система их израсходовала, а от того, что появилась новая система которая начинает более эффективно выполнять аналогичную функцию и оттягивает ресурсы на себя.

Это характерно не только для кратковременно действующих процессов, но и для общего развития отрасли техники (которая сама по себе



Рис.1.4. Возникновение альтернативной ТС, приходящей на смену предшествующей ТС

может являться участком такой же S-образной кривой).

S-образная кривая - это индикатор, который описывает состояние системы и способствует своевременному принятию решения по поиску

новых направлений ее развития. Это позволяет сократить технологический разрыв. А в случае отсутствия решений, стимулировать их поиски.

Да и "Закон Мура" только часть этой самой S-образной кривой на ее начальном этапе (экстенсивного развития). Наверное, поэтому то, что по закону Мура "число транзисторов удваивается каждый год или каждые два года", свидетельствует о том, что закон Мура приводится в соответствие с велением времени.

2. МЕХАТРОНИКА КАК НОВЫЙ ЭТАП В РАЗВИТИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Мехатроника находится только в стадии становления, поэтому на сегодняшний день ее определение и базовая терминология еще полностью не сформирована. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть определения, выражающих суть предмета мехатроники как в широком, так и в узком (специальном) смысле.

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.

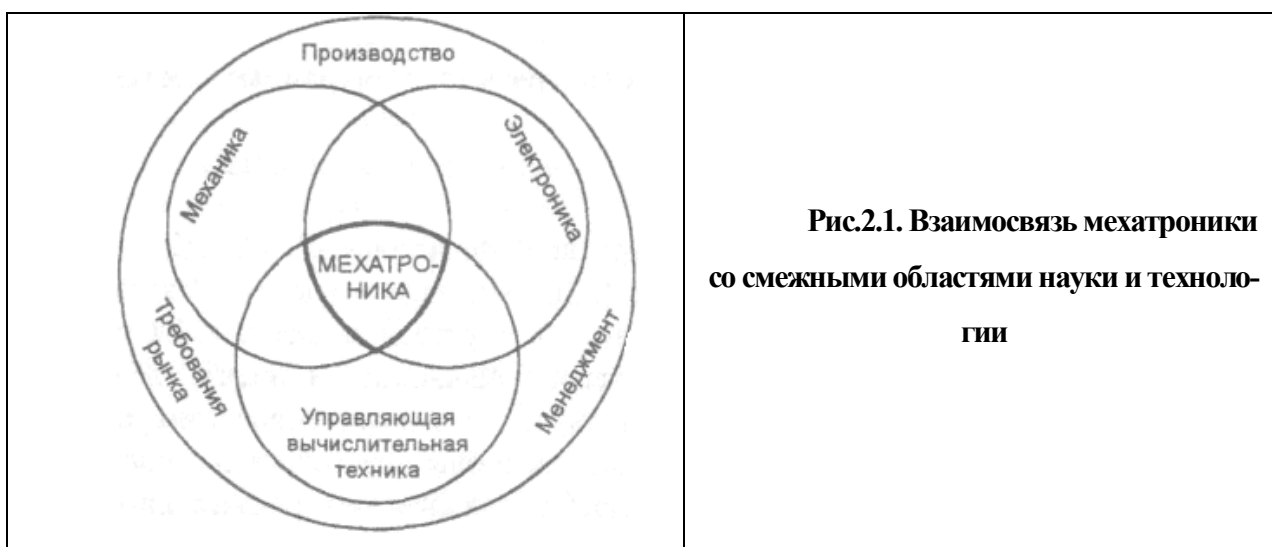


Рис.2.1. Взаимосвязь мехатроники со смежными областями науки и технологии

Комментарии к определению

1. Мехатроника изучает новый методологический подход (в некоторых работах даже используются более укрупненные понятия - "философия", "парадигма") 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.

2. В определении подчеркивается синергетический характер интеграции составляющих элементов в мехатронных объектах. Синергия (от греч.) - это совместное кумулятивное действие, направленное на достижение общей цели. При этом принципиально важно, что составляющие части не просто дополняют друг друга, но объединяются таким образом, что образованная система обладает качественно новыми свойствами, превышающими простую сумму свойств отдельных составляющих элементов.

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. 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 по требуемой управляемой координате. Из таких модулей, как из функциональных кубиков, komponуются 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. Данная группа методов опирается на новые идеи в теории управления, современные аппаратные и программные средства вычислительной техники, перспективные подходы к синтезу управляемых движений МС

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 адекватности. Некоторые среды являются недетерминированными 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.

В состав мехатронной системы 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.

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 и 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.

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 (на схемах они обычно обозначаются I/O).

III. Взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс в режимах программирования и непосредственно в процессе движения МС.

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

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.

Характерно, что электрическая энергия используется в современных системах как промежуточная энергетическая форма. Таким образом, для физической реализации мехатронной системы теоретически необходимы четыре основных функциональных блока: последовательно соединенные информационно-электрический и электромеханический энергетические преобразователи в прямой цепи и электро-информационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Примечание

Если работа силовой части машины с энергетической точки зрения основана на гидравлических, пневматических или комбинированных (например, электрогидравлических) процессах, то очевидно необходимы соответствующие преобразователи и датчики в цепи обратной связи.

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 МС должны обеспечивать непосредственный переход от замысла системы через ее математическое моделирование к управлению функциональным движением в реальном времени. Таким образом, проектирование МС предполагает разработку комплекса аппаратно-программных средств, ориентированных на конкретные прикладные задачи.

3. МЕХАТРОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ ТРАНСПОРТНЫМ ПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Современные информационные и компьютерные технологии, учитывающие уникальные специфические свойства поршневого двигателя как объекта мик-

ропроцессорного управления, позволяют улучшить весь комплекс конструктивных, технологических, экологических и эксплуатационных характеристик двигателей.

Новая заявляемая цель микропроцессорного управления поршневыми двигателями, которая уже получила практическое воплощение – улучшение их экологических и экономических характеристик за счет высокого уровня индивидуальной оптимизации рабочего процесса в каждом цикле каждого цилиндра. Она достигается автоматическим выбором и установлением совокупности значений параметров рабочего процесса в цилиндрах двигателя и алгоритмов управления, оптимальных по расходу топлива и качеству переходных процессов, при выполнении ограничений по экологическим и техническим параметрам.

Однако проблемные вопросы адаптации поршневого двигателя в условиях эксплуатации все еще находятся в стадии изучения и теоретического осмысления.

Двигатели, имеющие большое число управляемых параметров и позволяющие осуществить настройку на каждый эксплуатационный режим, получили название двигателей с изменяемым рабочим процессом (ДИРП), или адаптивных (интеллектуальных) двигателей.

Необходимость создания таких двигателей обусловлена, прежде всего, многорежимностью функционирования их в условиях эксплуатации. Достаточно сказать, что поршневой двигатель жестко привязан к определенным режимам эксплуатации в силу специфики технологии проектирования и особенности конструкции, закладываемой при этом.

Исследования и разработки по созданию адаптивных двигателей осуществляются в настоящее время в двух направлениях.

Первое направление базируется на дальнейшем расширении возможностей двигателей традиционных схем путём увеличения числа управляемых элементов. Конструктивные решения, реализующие по какому-либо параметру, называют «элементами адаптации»;

Второе направление связано с разработкой двигателей, у которых в зависимости от условий рядовой эксплуатации происходит изменение (конвертирова-

ние) самой схемы. Это направление потребует «глобального» пересмотра существующей технологии проектирования двигателя и использование самой современной фундаментальной теории управления.

На современном этапе существенное развитие получило первое направление. Во-первых, используются традиционные технологии проектирования двигателей. Во-вторых, перейти резко на новые технологии проектирования поршневых двигателей сразу не удастся. Слишком много нерешенных проблем. В-третьих, мировое двигателестроение не готово к переходу на конвертирование самой схемы двигателя в процессе эксплуатации.

Главная отличительная особенность двигателей с изменяемым рабочим процессом любой схемы состоит в том, что указанные свойства адаптивности достигаются увеличением числа управляемых элементов (каналов управления) по сравнению с существующими двигателями, что предопределяет применение у них систем автоматического управления нового типа.

Рассмотрим возможности использования адаптивных технологий по первому направлению, которые уже реализованы в современных транспортных двигателях.

Наибольшее развитие работы по созданию интеллектуальных двигателей получили в автомобильном двигателестроении в последнее десятилетие.

1. Фирма R.Bosch разработала систему обработки отработавших газов дизелей. Предложенная система отработавших газов взаимодействует с системой впрыскивания топлива. Электронный блок управляет фильтром твердых частиц и накопительным нейтрализатором NOx, достигая на каждом режиме работы двигателя получение эффективной нейтрализации отработавших газов. Блок также управляет рециркуляцией газов, положением дроссельной заслонки и давлением наддува.

2. Бензиновые двигатели ведущих фирм мира оснащены устройством, обеспечивающим полностью изменяемые фазы газораспределения (системы EVA фирмы Aura Systems; VVN фирмы Meta, предложение фирмы Systems Renault и др.).

Наибольший интерес представляет система управления впускным клапаном, разработанная фирмой Systems VDO (устройство Variable Valve Lift Control – VVLC) и применение на четырехцилиндровом двигателе фирмы BMW – Valvetronic (VT). Двигатель R6 фирмы BMW оснащён четырьмя клапанами на цилиндр, механизмом регулирования фаз газораспределения и высоты перемещения клапана –Valvetronic и bi-VANOS, которые заменяют дроссельную заслонку.

Двигатели RSX (фирма Honda) оснащены «интеллектуальной» системой управления распределительными валами i-VTEC.

Фирма Porsche (двигатель 911 GT2) установила систему Vario CAM Plus, которая осуществляет одновременное регулирование момента открытия впускного клапана и выбор одного из вариантов его подъёма.

На двигателях фирма BMW (316ti) установлены системы Valvetronic и Doppel-Vanos, позволяющие изменять фазы газораспределения как впускных, так и выпускных клапанов.

Фирма EUCAP разработала для двигателей фирмы Fiat клапанный механизм с электронным управлением VVA (Variable Valve Actuation).

Предложена новая система EVCP (Electromotive Variable Camshaft Phasing), которая использует электрический привод для регулировки фаз газораспределения. Система разработана фирмами AFT и INA.

Механизм «VaneCAM» с бесступенчатым регулированием фаз газораспределения третьего поколения (фирмы:BMW, Volkswagen) базируется на механизме, работа которого основана на применении шаговых двигателей.

Фирма Mahle предложила механизм регулирования фаз газораспределения VVT – Variable Valve Timing. Разработанный механизм годится для впускных и выпускных клапанов, в том числе и для обоих одновременно.

Клапанная система с изменяемыми фазами и высотой подъема, разработанная фирмой Yacobs Vehicle Systems, конструктивно выполнена как единая система, размещенная в головке цилиндров. Управление клапанами электрогидравлическое. Кроме указанного, система позволяет изменять скорость перемещения клапана.

Фирмами AVL и R.Bosch предложена электрогидравлическая система Valvetrain EHVS – одно из наиболее интересных решений для замены механического привода к клапанам. EHVS может обеспечить любую характеристику подачи воздуха в цилиндры двигателя. В EHVS могут независимо регулироваться следующие параметры: фазы газораспределения (открытие и закрытие), величина подъема каждого в отдельности клапана, скорость, ускорение и перемещение клапана.

Уже началось активное применение систем, использующих электромагнитные клапаны, например, на двигателях легковых автомобилей, легких и тяжелых грузовиков. Быстродействующие электромагнитные клапаны позволяют, так же как и электрогидравлические форсунки, обеспечить индивидуальную оптимизацию продолжительности, фазы и перемещения на любом режиме работы двигателя, вплоть до полного отключения цилиндров (циклов), и быстрый перевод двигателя в тормозной режим.

Фирма Aura Systems утверждает, что с электромагнитными клапанами EVA при использовании любых типов топлив (бензина, дизельного, природного газа, этанола, метанола или спирта) топливная экономичность двигателя за счет насосных потерь и потерь на трение улучшается на 15 %.

3. Фирма Delphi Automotive Systems разработала оригинальную систему отключения цилиндров. На 8-цилиндровом V-образном двигателе фирмы General Motors с рабочим объемом 5,3 л установлен фирмой Eaton Automotive новый электрогидравлический механизм отключения четырех цилиндров (включение и отключение цилиндров осуществляется электронной системой).

Японская фирма Honda разработала для американского рынка автомобиль с 6-цилиндровым V-образным двигателем с рабочим объемом 3,5 л систему отключения отдельных цилиндров – «Variable Cylinder Management».

Фирма Chrysler предложила систему MDS (Multi-Displacement Systems) – отключение отдельных цилиндров. Разработанная система за 40 мс может осуществить переход от работы на восьми цилиндрах к работе на четырех. Управляет этим переходом электронная система двигателя.

4. Фирма Garrett (США) предложила турбокомпрессор с изменяемым входным сечением турбины – VNT (Variable Nozzle Turbine). Механизм VNT третьего поколения, предложенный фирмой, имеет по сравнению с предшественником меньшие размеры и более эффективен. В нем приняты новые формы лопаток и новый ротор турбины, улучшена система управления.

5. Аппаратура Common-Rail фирмы Denso (Япония) многофункциональная, она, кроме подачи топлива, регулирует соотношение воздух-топливо, рециркуляцию отработавших газов, управляет турбокомпрессором с переменной геометрией.

Второе поколение системы Common-Rail фирмы R.Bosch обеспечивает до пяти впрыскиваний за один цикл. Разработку третьего поколения системы фирма R.Bosch завершила еще в 2003 г. Для повышения точности процесса впрыскивания и сохранения её на весь ресурс двигателя была разработана расширенная версия программного обеспечения, которая включала:

- регулировку количества впрыскиваемого топлива IQA (Injector Quantity Adjustment);
- регулировку электрического напряжения в форсунке IVA (Injector Voltage Adjustment);
- коррекцию колебаний давления PWC (Pressure Wave Correction).

Система предусматривает также управление количества подаваемых доз топлива при предвпрыскивании. Кроме того, система регулирует отношение полного количества подаваемого воздуха к вводимому топливу.

Фирма Tesis Dynaware разработала для блока электронной системы модель управления en-Dyna в реальном масштабе времени применительно к дизелю, оснащённому топливной системой Common-Rail. Модель включает три раздела: вычисление поступающего в цилиндры двигателя воздуха, определение массы впрыскиваемого топлива и моделирование крутящего момента.

На ведущих фирмах мира, таких как R.Bosch, Siemens, Delphi, Denso и других, практически уже завершены разработки новых поколений топливных систем Common-Rail с пьезофорсунками. Пьезофорсунка практически не имеет задержек

при переключении, работает очень быстро и точно, процесс хорошо воспроизводится. В блоке управления запрограммированы характеристики двигателя и впрыскивания, в него непрерывно поступают данные о положении коленчатого и распределительного валов.

В последнее время ведут интенсивные разработки по так называемым изменяемым распылителям форсунок (Variodusen или Vario-Injector) с рядами малых и больших распыливающих отверстий.

Фирма Caterpillar совместно с фирмой Navistar реализовали на многих двигателях топливную систему с гидравлической насос-форсункой с электронным управлением HEUI (Hydraulic Electronic Unit Injection). Кроме того, на многих двигателях фирмы Caterpillar успешно используется система MEUI (Mechanical Electronic Unit Injection).

6. Фирма Mayflower разработала новую оригинальную систему изменения степени сжатия в двигателях, названную e3. Новая идея изменения степени сжатия предложена фирмой FEV, которая заключается в следующем – эксцентрично расположенная ось коленчатого вала, позволяющая при повороте перемещать ось и, тем самым, изменять степень сжатия.

Механизм, уменьшающий степень сжатия на больших нагрузках для получения недетонирующего процесса сгорания топлива на полной нагрузке и сохраняющий высокую компрессию на частичных режимах, используется на фирме Ford – двигатель DISI.

Голландская фирма Gomecsys разработала механизм изменения степени сжатия, названный GoEngine. В предложенной конструкции каждая кривошипная головка шатуна соединена с коленчатым валом через узел, который находится в зацеплении с эллиптической системой, позволяющей ей вращаться вокруг коленчатого вала. Управление осуществляется электронной системой.

7. Фирма Borg Warner разработала регулируемый двухступенчатый турбокомпрессор R2S для 6-цилиндрового рядного двигателя BMW 535.

8. Регулируемый резонансный наддув реализован на 6-цилиндровых двигателях фирмы BMW. Разработан трехступенчатый резонансный выпуск. В принятой

схеме имеются две заслонки, расположенные в коллекторе и переходной трубе, которые могут быть или полностью открыты или закрыты. Положение заслонок определяется режимом работы двигателя.

9. На четырехцилиндровом двигателе K1200S фирмы BMW установлена система управления детонацией. Она обеспечивает в зависимости от режима работы двигателя установку той фазы зажигания, при которой нет детонации.

Эти примеры можно было бы продолжить. Важнейшим фактором, определяющим эффективность микропроцессорного управления двигателями (агрегатами на их базе) является алгоритмы управления, в первую очередь, регулирования частоты вращения и реализующие их структуры микроконтроллеры.

Применение рациональных алгоритмов в сочетании с импульсным управлением подачей топлива и воздуха обеспечивает достижение предельно возможных наилучших значений показателей качества. Это относится, прежде всего, к точности поддержания частоты вращения в установившихся режимах, величине максимального отклонения и длительности переходных процессов пуска, разгона, нагружения и отработки изменения нагрузки.

В комплекс алгоритмов управления входят в общем случае: алгоритмы оптимального адаптивного управления опережением, давлением, числом фаз, формой характеристики впрыскивания топлива, ограничением подачи топлива, исключением подачи топлива при условиях, не обеспечивающих его воспламенения и эффективного сгорания, фазами газораспределения, давлением наддува и др.

Здесь нельзя забывать и о средствах и алгоритмах безразборной автоматической технической диагностики.

На всех двигателях с электронными управляющими устройствами достигнуто существенное снижение эксплуатационного расхода топлива, температуры отработавших газов и вредных выбросов. Улучшены также пусковые и тормозные характеристики, повышена живучесть и надежность объектов применения.

В настоящее время изучаются потенциальные возможности применения биосистем и искусственного интеллекта (ИИ) для управления рабочими циклами, прежде всего, автомобильных двигателей. В выбранной области применения ИИ

(управление поршневым двигателем) под искусственным интеллектом следует понимать не только возможность современных суперкомпьютеров производить миллионы операций в доли секунды, но и выбирать в качестве цели осмысленные решения в многовариантной ситуации.

Ряд специалистов считает, что поиск начальных подходов к созданию систем ИИ для управления двигателем, а может быть, и всем транспортным средством, например, автомобилем, является современным и перспективным.

Выше представленные «элементы адаптации» реализованы, как уже отмечалось, в основном в автомобилестроении. Однако уже накопленный опыт позволяет в ближайшее время перенести часть решений на судовые дизельные установки, дополнить их своими эксклюзивными техническими решениями.

Интеллектуальное управление транспортным поршневым двигателем позволяет осуществить концепцию «эластичного двигателя». Так, мероприятия по управлению рабочим процессом дизеля в комплексе включают:

- применение многофазной подачи топлива;
- управление углом опережения подачи топлива;
- изменение фаз газораспределения;
- рециркуляцию отработавших газов;
- использование регистровой системы наддува, регулируемых турбокомпрессоров;
- в переходных процессах дизель-генераторов переменного тока при набросках нагрузки применяется подача воздуха на колесо турбины или компрессора для разгона ротора ТКР и улучшения динамических показателей и др.

Все эти мероприятия направлены на адаптацию двигателя (агрегата) к меняющимся условиям эксплуатации. Набор этих мер по управлению рабочим процессом на каждом конкретном двигателе выбирается разработчиками в зависимости от особенностей эксплуатации, а также для выполнения требований нормативных актов (по экологическим показателям).

Система управления с электронно-управляемой механической насосфорсункой устанавливается на большинстве двигателей Caterpillar с рабочим объ-

емом 10 – 16 л. Основной особенностью системы является высокое давление впрыска топлива, достигающее 2000 бар по сравнению с системами РЕЕС (механические форсунки), у которых оно не превышает 1200 бар.

В последние года фирма Caterpillar инвестировала значительные средства в создание и развитие технологии ACERT (Advanced Combustion Emission Reduction Technology – улучшенной технологии снижения эмиссии при сгорании). Она позволяет добиться достижения потребительских свойств дизелей, опережающих требования эксплуатирующих организаций, за счет:

- совершенствования топливоподачи путем применения многоступенчатого регулируемого впрыска в камеру сгорания, в том числе системы CR – SFCR (Single Fluid Common Rail), обеспечивающего приемлемую топливную экономичность при минимальных выбросах вредных веществ с отработавшими газами;
- совершенствования газообмена путем применения клапанов с управляемым временем открытия, двух турбокомпрессоров в системе наддува с малым временем разгона ротора;
- широкого применения электроники, управляющей процессами топливоподачи, газообмена – HEUI, использования гибкой технологии привода впускных клапанов – FCT (Flus Cam Technology), разработанной фирмой MaK, входящей в состав корпорации Caterpillar, и др.

Основное направление применения новой технологии – снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей и снижения дымности, создание двигателей LEE (Low Emission Engine) – с низкими значениями выбросов вредных веществ.

Реализуя технологию в два этапа - в начале применив FCT, а затем совместно с известной более 10 лет усовершенствованной системой – HEUI (Hydraulic Electronic UnitInjector) – электронно-управляемой насос-форсункой, фирма Caterpillar поставила задачу добиться существенного улучшения экологических показателей (в частности, снизить выбросы NO_x до 6 г/кВт·ч) – ниже требований ИМО.

Здесь следует обратить внимание на другую особенность двигателей Cat с

электронными системами управления – на саму электронную систему управления.

С момента появления первых двигателей и до настоящего времени осуществляется совершенствование компьютера (ЕСМ) двигателя, который на первых порах имел 8-битовый процессор, затем 16-битовый. В настоящее время ЕСМ АДЕМ-III (Advanced Diesel Engine Management) имеет 32-битовый процессор частотой 24 МГц как элемент технологии ACERT. Изменялось при этом и количество входов, ввиду необходимости увеличения числа датчиков для учета большего перечня рабочих параметров и внешних условий. Начинается оснащение ЕСМАДЕМ-IV, имеющих 170 входов и линий связи с двигателем.

У электронных двигателей ЕСМ включает две основные части – управляющий компьютер и персональный модуль. Персональный модуль ЕСМ является перепрограммируемым и представляет собой чип, содержащий программное обеспечение компьютера, рабочие таблицы, определяющие закон подачи топлива и закономерности функционирования в различных режимах, а также содержит информацию о конкретном применении двигателя. В общем случае ЕСМ может иметь более ста различных программируемых параметров.

Файл, загружаемый в персональный модуль, может быть заменен из библиотеки, постоянно обновляемой фирмой через Интернет или иным образом, бывает съемным или установленным стационарно. Таким образом, изменение уставок выполняется не с помощью регулировок на регуляторе скорости, как на обычных дизелях, а в файле при помощи специального электронного оборудования – компьютера со специальной программой. Это дает возможность значительно упростить процесс контроля и управления двигателем, увеличивает надежность, частично уменьшает объем технического обслуживания.

В неперепрограммируемой части ЕСМ заложены алгоритмы управления двигателем. Информация об объявленных параметрах двигателя, приведенная в его информационных данных, вносится в персональный модуль ЕСМ и изменяется по заводскому рип-коду.

Помимо основных задач управления рабочим процессом дизеля, ЕСМ обеспечивает решение ряда других задач:

- мониторинг показаний датчиков с выявлением ошибочных показаний;
- самотестирование электронной системы с выводом активных кодов-извещений о неисправностях компонентов электронной схемы в текущий момент времени;
- сохранение в памяти имевших место выводов информации об активных кодах в прошлом;
- сохранение в памяти имевших место выходов рабочих параметров за установленные пределы (перегрев, превышение установленных пределов частоты вращения, низкое давление смазочного масла и др.);
- выполнение тестов и калибровок некоторых элементов по командам от специальной программы.

Датчики, установленные в различных системах двигателя, отслеживают параметры, после чего полученная информация посылается ЕСМ.

Фирма Caterpillar придерживается твердого мнения, что в гибком электронном управлении топливоподачей и газообменом в сочетании с применением различных технологий управления кроется успех завтрашнего развития быстроходных дизелей.

На конгрессе СИМАС, прошедшем в г. Киото (Япония) в 2004 г, фирмой Deutz AG (Германия) был сделан доклад о создании и представлении в 2003 г на мировой рынок нового 16-цилиндрового V-образного дизеля TDC 2016 мощностью 1500 кВт, предназначенного для установки на прогулочные суда.

На базе этого двигателя была создана новая модификация TDC 2016 VCR, объединяющая технологию CR со средствами контроля и повышения надежности дизеля.

Это позволило увеличить мощность дизеля, снизить удельный расход топлива с учетом ограничений по эмиссии выпускных газов дизеля.

Основные размеры дизеля остались неизменными (размерность 13,2/16, развал цилиндров 60°, габариты соответствуют ограниченным объемам машинных помещений).

Мощность дизеля увеличена до 1840 кВт при частоте вращения 2300 мин⁻¹,

среднее эффективное давление - 27,3 бар, удельный расход топлива 211 г/(кВт·ч).

Система CR размещена в развале блока цилиндров между воздушными ресиверами. Такое размещение позволило сохранить количество узлов и массу системы. Все трубопроводы высокого давления имеют одинаковую длину.

Снижение температур выпускных газов, ограничение вредных выбросов достигается за счет точного дозирования впрыскиваемого топлива, времени впрыска, возможности управления впрыском по фазам – предварительного, основного и последующего – при давлении впрыска 1600 бар.

Встроенный блок управления ECU (Engine Control Unit) состоит из нескольких функциональных узлов, выполняющих основные функции управления – регулирование частоты вращения, давления топлива в магистрали, количества впрыскиваемого топлива и времени впрыска, зависящих от режимов работы двигателя. Соответственно осуществляется управление секциями клапанов и электромагнитными форсунками в функции частоты вращения по сигналу от электромагнитного датчика частоты вращения и датчика высокого давления.

При разработке системы CR MAN Diesel первоочередное внимание уделялось вопросам безопасности, надежности и отсутствию ограничений на качество применяемых тяжелых топлив. Безопасность, в свою очередь, обеспечивается за счет ряда функциональных и конструкторских решений, включая резервирование. Эти решения сводятся, в основном, к следующему.

- Высокое давление в клапане подачи существует только в момент впрыска, тем самым исключается риск неконтролируемого впрыска из-за утечек в клапанах управления.
- Все трубопроводы, емкости и магистрали высокого давления имеют двойные стенки. Тем самым исключается риск выброса топлива под высоким давлением наружу из-за утечек или повреждений стенок.
- В каждом цилиндре имеются клапаны ограничения топливopодачи для предотвращения неконтролируемого впрыска.
- В каждом цилиндре имеются обратные клапаны, что исключает возможность обратного выброса топлива из системы отвода (низкого давления) в ци-

линдр.

- Благодаря наличию трех топливных насосов высокого давления (ТНВД) система сохраняет работоспособность (в аварийном режиме) даже в случае отказа одного из ТНВД.

- Наличие двух датчиков давления топлива в магистрали и двух датчиков скорости/ВМТ обеспечивает продолжение работы в случае отказа одного из датчиков каждой группы.

Новым в конструкции компрессора является применение внутренней рециркуляции (IRC), благодаря которой расширяется зона устойчивой работы компрессора и создается возможность выбора оптимальных совместных режимов работы двигателя и компрессора. За счет рециркуляции удалось повысить КПД компрессора на больших нагрузках. Это, в свою очередь, позволило снизить расход топлива, а также механические и тепловые напряжения в компрессорном колесе (по сравнению с турбокомпрессором без IRC).

Следует отметить, что для повышения приемистости и улучшения качества переходных процессов турбокомпрессор TCR может быть выполнен с управляемым электроускорителем.

В новом двигателе приняты также конструктивные меры по улучшению газообмена (оптимизирована форма клапанов и седел из-за существенного повышения максимального давления в цилиндре, увеличения средней скорости поршня вследствие роста отношения s/d).

Охладитель надувочного воздуха выполнен с большим запасом по объемам, что было одним из условий оптимизации рабочего процесса, изобарного турбонаддува и газообмена.

4. ПРОБЛЕМЫ ПРИ СОЗДАНИИ АДАПТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ БУДУЩЕГО

Выше были изложены реализованные технические решения по первому направлению создания адаптивных поршневых двигателей.

Остановимся на основных проблемных вопросах при реализации второго

направления:

1. До сих пор основным остается аддитивный принцип, принятый в практике проектирования и доводки современных двигателей. Традиционно в процессе создания или совершенствования комбинированных двигателей внутреннего сгорания (КДВС) в специальных конструкторских бюро дизелестроения (СКБД) заводов, проектных организациях отработка отдельного модифицированного элемента конструкции ДВС осуществляется автономно с последующим включением в общую систему КДВС и соответствующей доводкой на экспериментальном стенде.

В процессе автономной оптимизации элементов, например, проточных частей термо газогидродинамической системы КДВС (впускные и выпускные каналы, турбина, компрессор и т.д.) целевой функцией являются, как правило, локальные характеристики выделенных элементов коэффициент расхода, гидравлического сопротивления, КПД и т.д.). В том же время достижение оптимума по локальным характеристикам не гарантирует того, что будет получено пропорциональное улучшение конечного технико-экономического показателя двигателя – удельного эффективного расхода топлива. Это связано с тем, что установка на двигатель модифицированного элемента вызывает перераспределение термогазогидродинамических параметров и приводит к установлению нового состояния, как правило, не наилучшего.

Задача усложняется необходимостью обеспечить также оптимальные экологические показатели на всех режимах работы двигателя.

2. Нелинейность взаимодействия различных физических процессов в элементах сложной системы Σ (КДВС) при иерархически изменяемой структуре.

Следует отметить, что необходимы фундаментальные компоненты, представляющие основу поисковых исследований в области разработки сложных систем:

- теории исследуемого класса систем;
- методики и аппарата построения сложных проектных решений;
- технических (вычислительных) средств реализации соответствующих ме-

тодик.

3. Внедрение в практику проектирования КДВС основ современной фундаментальной теории управления сложных систем.

Сложность системы Σ (КДВС) обусловлена тем, что приложение фундаментальной теории имеет ряд проблемных аспектов. Во-первых, в поле зрения исследователей попадает целый ряд новых категорий и понятий чисто математического характера.

Прежде всего, необходимо сформулировать систему нового класса, относящейся к сложным системам с логико-динамическими процессами управления. Сложность заключается в том, что в функционировании логико-динамических систем (ЛДС) объединены два сложившихся принципа функционирования, связанных с управлением на континуальном и конечном (возможно счетном) множестве состояний.

По существу необходимо «органическое» объединение фундаментальных моделей в виде конечных динамических систем (КДС) и динамических дифференциальных систем (ДДС).

Во-вторых, функционирование ДДС рассматривают в континуальной области конечномерного пространства, а КДС – на конечном множестве обобщенных координат. Время задается дискретно (на счетном множестве). В-третьих, конечный (логический) автомат рассматривается как математическая модель функционирования физической системы. Универсальность такой модели заключается в том, что формализованные элементы автомата: вход, выход, состояние задаются с помощью абстрактных символов, не связанных через соотношения размерностей.

Выделенный класс сложных систем Σ (КДВС) относится к иерархическим системам, которые обладают следующими свойствами:

- традиционные метрические свойства (нижний уровень – дифференциальная динамика);
- логические свойства (средний уровень – структурная динамика);
- комбинированные свойства (верхний уровень – динамика взаимодействия подсистем).

Нижний уровень – дифференциальная динамика, например, для термогазо-гидродинамической системы в КДВС представлена удовлетворительно. Пока необходимо констатировать, что даже на нижнем уровне существует ряд нерешенных вопросов. Что касается среднего и верхнего уровня, то эти области в поршневых двигателях остаются нерешенными для специалистов.

4. Согласование характеристик поршневого двигателя с другими характеристиками систем, входящих в комбинированные установки.

Основные проблемы:

– нелинейное взаимодействие между подсистемами сложной системы Σ (КДВС);

– отсутствуют характеристики регулируемых турбин, компрессоров, поршневых двигателей;

– нет ясности с постановкой вариационной задачи по согласованию характеристик турбины, компрессора и поршневого двигателя;

– нет каналов управления, позволяющих обеспечить оптимальное протекание согласованных характеристик.

5. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов по управлению.

Адаптивный двигатель должен быть оборудован автоматизированными регуляторами по управлению: фазами газораспределения, степенью сжатия, энергетическими потоками в системе наддува, теплоносителями в системе охлаждения надувочного воздуха, тепловыми режимами в деталях КДВС (ЦПГ, головка, гильза цилиндра и т.д.), износами в деталях движения, колебаниями в двигателях (крутильные, продольные, изгибные) и т.д.

Однако при аналитическом конструировании оптимальных регуляторов по управлению необходимо разрешить следующие проблемы:

- а) Как обосновать квадратичный функционал для описываемых систем?
- б) Какой физический аналог потребуется при замене механических систем?
- в) Как найти оптимальную траекторию управления, которая непосредственно связана с особенностями управления физическими процессами в двигателях?

б.Создание математических моделей с изменяемым рабочим процессом в комбинированных двигателях внутреннего сгорания.

Необходимо констатировать, что отсутствует теоретическая база физических процессов при работе адаптивного двигателя в реальных условиях эксплуатации. Нельзя механически переносить на частичные режимы уже разработанные теории рабочих процессов при максимальной мощности. Теория рабочих процессов адаптивных двигателей на несколько порядков сложнее, более общая и рассматривает сугубо нелинейные процессы, которые до настоящего времени не расшифрованы.

Скорее всего, можно предположить, что распознавание физических процессов адаптивного двигателя можно начать с понимания изменяемого рабочего процесса в КДВС при работе его в реальных условиях эксплуатации, которая требует разрешение следующих проблем:

а) Расшифровка физических процессов различной природы в двигателях внутреннего сгорания при работе его на частичных режимах.

б) Понимание «нелинейной деформации» рабочих процессов при переходе от номинального режима к частичным нагрузкам, природа которой неясна до настоящего времени.

в) Привлечение современных теорий: вариационного исчисления, гибридного графа, логико-динамических систем к глубокому пониманию физических процессов адаптивных двигателей.

г) Широкое использование экспериментальных исследований для реального понимания физических процессов при работе двигателя на частичных режимах.

Все перечисленное выше показывает, что развитие поршневого двигателестроения вступило в новую фазу – создания, выпуска и эксплуатации суперинтеллектуальных двигателей новых поколений. На этом пути, будем надеяться, нас ждут впечатляющие научно-технические идеи, которые позволят продлить жизненный цикл современных ДВС на обозримую перспективу, повысит их значимость в мировой энергетике.