

А. О. Борисов, А. А. Черноусов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ЧАСТИ САУ ДВС

Описана разработанная подсистема моделирования функций управляющей части САУ ДВС, предназначенная для использования в системе имитационного моделирования процессов в ДВС и других сложных технических объектах. Обеспечивает моделирование переходных режимов работы ДВС, включая выполнение ездового цикла. ДВС; управление; регулятор; имитационное моделирование; переходные процессы

Современная методология проектирования поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) предполагает дополнительное и существенное требование к системе имитационного моделирования (СИМ) показателей и характеристик двигателя – обеспечение возможности моделирования двигателя при действии возмущений, нарушающих равновесное состояние системы «двигатель – потребитель». Актуальность проблемы определяется тем, что показатели двигателя в переходных режимах являются одними из наиболее важных факторов, которые необходимо учитывать уже на стадии проектирования.

В соответствии с основными положениями теории систем автоматического регулирования [1], любая САУ содержит управляющую и управляемую подсистемы и характеризуется наличием цели управления – рис. 1.

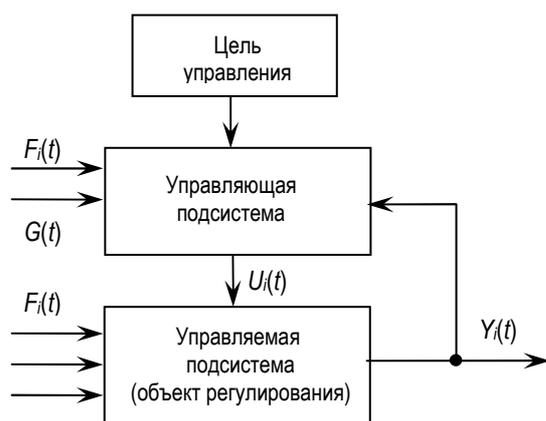


Рис. 1. Обобщенная структура САУ, где $G(t)$ – задающее воздействие; $F_i(t)$ – возмущения; $U_i(t)$ – регулирующие воздействия; $Y_i(t)$ – регулируемые величины

Проблема заключается в том, что известные пакеты прикладных программ, как правило, предназначены для моделирования поведения отдельно взятого объекта управления на заранее заданном режиме работы.

Для моделирования переходных режимов работы ДВС необходима дополнительная имитация работы управляющей части САУ и взаимодействия между ними. Для системы «двигатель – автомобиль» в этом случае появляется возможность моделирования процессов в ДВС и определения его показателей на режимах ездового цикла [2].

Включение моделей функциональных элементов САУ в математическое обеспечение СИМ обеспечивает ее самодостаточность для решения задач анализа и параметрической оптимизации объектов энергомашиностроения с учетом процессов управления.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И СТРУКТУРА ПОДСИСТЕМЫ

Разработанная подсистема моделирования функций управляющей части САУ подчинена следующим принципам:

1. Модульность представления анализируемой модели; модель управляющей подсистемы (как и объекта управления) состоит из отдельных модулей-элементов, связанных между собой модулями-связями, передающими информационные потоки данных. Модульность позволяет моделировать различные схемы автоматизации и легко осуществлять изменение структуры модели. Кроме того, это позволяет применять модели функциональных элементов различной степени детализации.

2. Единство представления модулей; задания исходных данных и связей с другими модулями.

3. Совместимость с другими подсистемами СИМ.

4. Логически и интуитивно понятный интерфейс; простая процедура построения и редактирования проекта.

5. Открытость, что определяет возможность дальнейшего развития подсистемы и совершенствования модулей.

Разработанная подсистема имеет следующую структуру:

1. Модули для тестирования и настройки проекта в целом (его отдельных частей или функциональных преобразователей). Представляют собой модули-генераторы стандартных типов возмущений (ступенчатого и гармонического).

2. Функциональные модули, предназначенные для обеспечения:

- моделирования функций бортовой системы автоматического регулирования. Синтезированный модуль управляющей части САУ замыкает набор моделей из других предметных областей, которые имитируют процессы в ДВС, и позволяет моделировать поведение двигателя на неустановившихся режимах работы;

- моделирования двигателя с учетом необходимых характеристик автомобиля при имитации ездового цикла. Данная группа моделей должна имитировать требуемый закон изменения нагрузки и частоты вращения вала двигателя;

- моделирования переходных процессов в элементах и САУ в целом в предметной области «управление».

3. Модули вывода, предназначенные для визуализации на экране и регистрации интересующих пользователя параметров.

4. Однонаправленные связи.

Рассмотрим особенности построения функциональных модулей. Данные модули должны имитировать функционирование датчиков режима работы объекта, блока управления и исполнительных механизмов. Современные датчики и исполнительные механизмы характеризуются различными принципами действия и разнообразием конструкции, их модели могут быть построены в соответствующих предметных областях или представлять собой достаточно сложные сборки (субпроекты) с использованием нескольких предметных областей в соответствии с используемыми физическими эффектами. Такую возможность представляют соответствующие подсистемы моделирования предметных областей СИМ («гидродинамика»; «термогазодинамика»; «механика и триболо-

гия» и др.). Для моделирования функций блока управления, который сегодня выполняется на базе электронных компонентов, также существуют СИМ, детализированные до уровня моделирования процессов в единичных простейших элементах, например Electronics Workbench.

Однако существуют по меньшей мере два фактора, которые определяют в лучшем случае нецелесообразность, а в худшем – невозможность применения известных специализированных пакетов прикладных программ для моделирования элементов управляющей части САУ. Как показывает практика, детализированное «предметное» моделирование работы датчика или исполнительного механизма оказывается необходимым крайне редко – для решения некоторых специальных «тонких» вопросов, требующих повышенной точности расчета. Такое моделирование, естественно, требует повышенных временных и материальных ресурсов. Для «быстрого» анализа САУ существуют широко известные системы моделирования: MathCAD / MATLAB и др., содержащие библиотеки с набором типовых звеньев автоматики. Второй фактор заключается в несовместимости этих специализированных СИМ с разработанной системой моделирования рабочих процессов в двигателе и других сложных технических объектах.

В связи с этим для построения функциональных модулей в рассматриваемой СИМ также использован известный набор типовых звеньев автоматики: идеальное усилительное с несколькими входами, инерционные звенья 1-го и 2-го порядков, интегрирующие и дифференцирующие, а также дискретные импульсные и релейные.

Особенность рассматриваемых модулей заключается в том, что в них используются модели не физических явлений, а цепочек функциональных (алгебраических и логических) преобразований.

Для моделирования функций блока управления используются:

- модули интерполяторов, предназначенных для формирования и последующего использования программ регулирующих воздействий;

- модули логических элементов компараторов, сумматоров, импульсных звеньев, предназначенные для выполнения логических операций в процессах управления, построения регуляторов с широтно- и фазоимпульсным преобразованием сигнала и т. п.;

- модули позиционных, интегрирующих и дифференцирующих звеньев (типовые звенья автоматики), предназначенные для формирования различных законов управления и их комбинирования.

Кроме указанных выше, в состав рассматриваемой группы модулей входят специализированные, предназначенные для решения некоторых конкретных задач моделирования САУ.

Модули-задатчики программ ездовых циклов

Указанные программы задаются в виде зависимостей скорости автомобиля от времени. На рис. 2 показаны программы европейского ездового цикла Правил № 15 ЕЭК ООН (вверху) и цикла федерального стандарта США (внизу). Эти программы играют роль задающего воздействия для системы автоматического (или неавтоматического) управления автомобилем в процессе выполнения им ездового цикла.

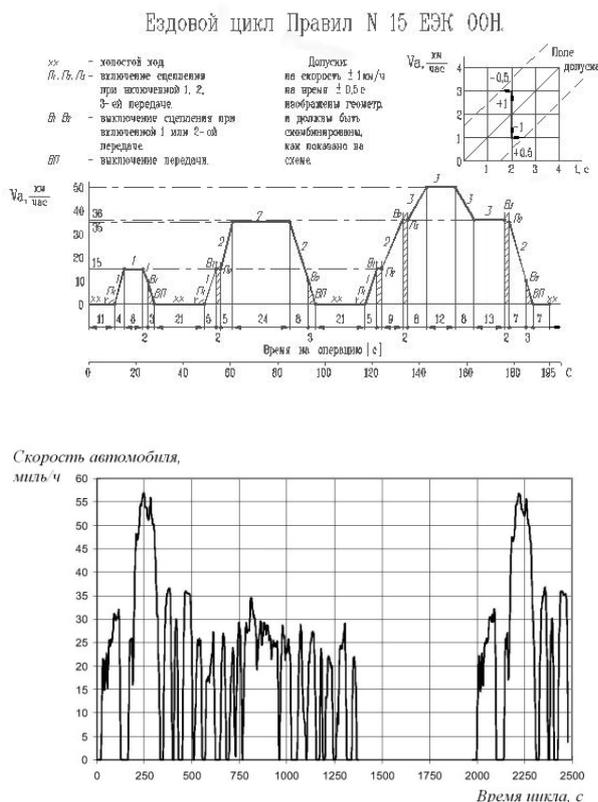


Рис. 2. Программы ездовых циклов; городского европейского (вверху); федерального стандарта США (внизу)

Модуль водителя

Специализированный функциональный преобразователь, осуществляющий управление моделируемой системой «двигатель – автомобиль».

Управление скоростью автомобиля. При реальном выполнении ездового цикла водитель имеет перед глазами монитор с изображением программы цикла и маркером, положение которого соответствует действительной скорости автомобиля. Действия водителя заключаются в визуальной оценке соответствия действительной скорости автомобиля скорости, заданной программой, и выработке требуемых управляющих воздействий на дроссельную заслонку и тормозную систему. Целью данного управления является выполнение программы ездового цикла с точностью, соответствующей назначенным допускам. Качество управления в данном случае оценивается визуально по степени рассогласования положения маркера с текущим заданным значением скорости автомобиля в соответствии с программой ездового цикла.

Рассмотренный алгоритм поведения водителя формально соответствует принципу обратной связи. Система «водитель – двигатель – автомобиль» образует систему замкнутого управления. Принцип обратной связи в целом соответствует задаче выполнения ездового цикла, поскольку заранее неизвестна программа воздействия на дроссельную заслонку, которая позволила бы выполнить ездовой цикл с требуемой точностью. Однако выполнение ездового цикла осуществляется водителем-испытателем, имеющим определенные навыки выполнения программы. Кроме того, независимо от выполняемой программы ездового цикла, у водителя существуют общие профессиональные навыки в управлении дросселем и муфтой сцепления при трогании автомобиля с места и при переключении передач. С точки зрения теории автоматического регулирования существование навыков у водителя, приобретенных в процессе тренировки, эквивалентно действию разомкнутого канала регулирования по определенной программе.

Для учета указанных особенностей поведения водителя система управления скоростью автомобиля при моделировании ездового цикла выполнена комбинированной и содержит два параллельных канала регулирования:

- с обратной связью по скорости;

- канал разомкнутого (программного) регулирования.

В этом случае оказывается возможным повысить динамическую точность системы регулирования. Смысл этого заключается в следующем: система управления не дожидается появления отклонений действительной скорости автомобиля от заданной (как в случае только замкнутого регулирования), а в нужный момент времени принудительно разгоняет или тормозит его по заданной программе для выхода на нужный режим; а по каналу замкнутого управления теперь остаются незначительные корректировки положения дросселя, поскольку величины отклонений скорости оказываются на порядок меньшими, чем в первом случае. Можно считать, что теперь эти отклонения связаны лишь с различиями в техническом состоянии двигателя и автомобиля, в механических потерях, параметрах окружающей среды, с внесенными изменениями в программы систем питания, зажигания и т. п. На рис. 3 представлены результаты моделирования выполнения фрагмента Европейского ездового цикла с использованием только замкнутого канала управления (вверху) и комбинированным управлением (внизу).

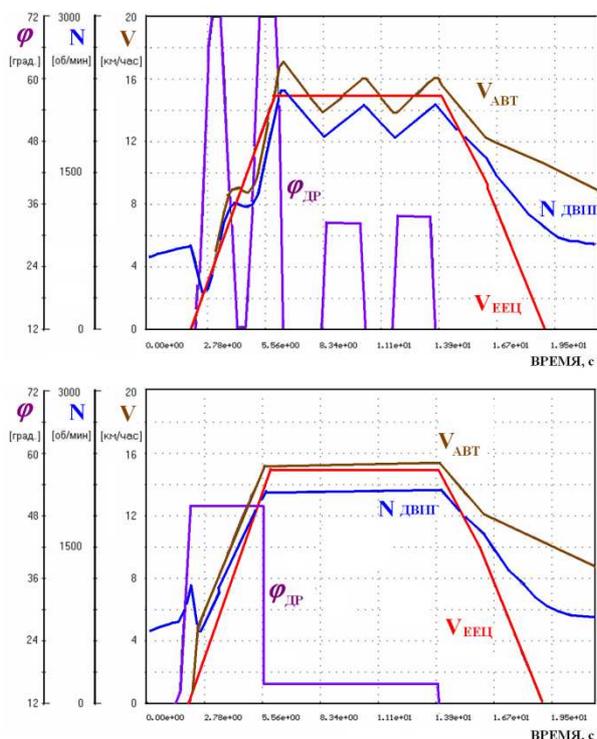


Рис. 3. Результаты моделирования выполнения фрагмента ездового цикла; замкнутый канал управления (вверху); комбинированное управление (внизу)

Первый вариант соответствует действиям необученного водителя или первым испытаниям автомобиля другой марки. Второй вариант – действия тренированного водителя-испытателя, многократно выполнявшего данный ездовой цикл на одном и том же автомобиле. Оптимизация параметров регулятора системы с обратной связью может обеспечить требуемую точность выполнения программы цикла, но наличие неизбежных при этом многократных перемещений дроссельной заслонки в процессе имитации разгона искажает реальную картину явления и приводит к неадекватным результатам моделирования расходов топлива и выбросов токсичных компонентов.

Программой ездового цикла в определенных его фазах предусматривается использование тормозов, поэтому в систему встроены соответствующий модуль, а в систему управления введен дополнительный канал регулирования. Его задача: в том случае, если полное закрытие дросселя (режим торможения двигателем или принудительного холостого хода) не обеспечивает необходимой величины отрицательного ускорения, увеличить момент сопротивления модуля «потребитель» по определенному закону, имитируя действие тормозов.

Управление моделью трансмиссии заключается в изменении ее передаточного отношения в нужные моменты времени (моделирование процесса переключения передач).

В реальном автомобиле этот процесс происходит определенным и достаточно однотипным образом, при этом одновременно изменяется положение дроссельной заслонки и педали сцепления. Процессы включения передачи в момент начала движения автомобиля и выключения передачи перед его остановкой (или после) аналогичны и могут рассматриваться как частный случай общего процесса переключения передачи. Таким образом, во время данного процесса автомобиль управляется по особому алгоритму, который не зависит от вида ездового цикла и является универсальным.

Поэтому на основе анализа действий реального водителя в систему управления введен специальный канал, на который при достижении момента переключения передачи на все время процесса переключения передается управление системой «двигатель – потребитель». В данной модели трансмиссии принят упрощенный алгоритм переключения, представленный на рис. 4.

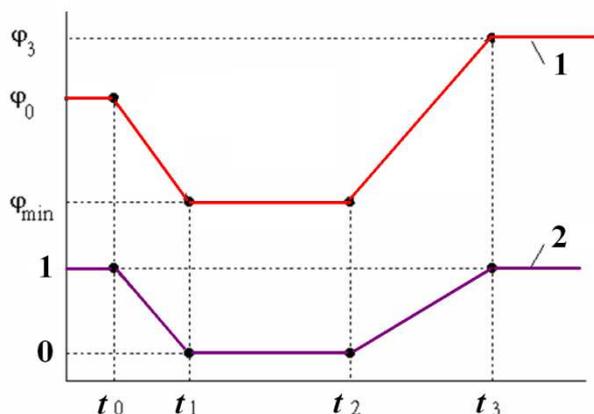


Рис. 4. Алгоритм моделирования работы муфты сцепления; 1 – перемещение дроссельной заслонки; 2 – перемещение муфты сцепления

При достижении времени момента переключения передачи t_0 и до момента t_1 по определенной программе происходит разъединение механической связи модулей «двигатель» и «автомобиль» (имитация выжимания педали сцепления) и установка дроссельной заслонки в положение, соответствующее холостому ходу.

В течение промежутка времени $t_1 - t_2$ (в течение которого в реальном автомобиле и происходит переключение передачи) двигатель работает без нагрузки.

С момента t_2 и до момента t_3 (момент окончания процесса переключения) происходит, также по определенной программе, обратный процесс «соединения» модулей «двигатель» и «автомобиль» (опускается педаль сцепления) и установки дроссельной заслонки в необходимое положение (нажатие педали «газа»).

Затем управление передается основной САУ.

Модули потребителей

Для обеспечения возможности адекватного моделирования неустановившихся режимов работы двигателя необходима имитация поведения замкнутой системы. Применительно к нашей задаче это означает, что набор модулей, из которых собирается система, должен быть замкнут модулем (или набором модулей), имитирующим поведение потребителя механической энергии двигателя.

Несмотря на многообразие конструктивного исполнения потребителей механической энергии двигателя, существуют три их основных вида, которые отличаются физическими яв-

лениями, лежащими в основе формирования момента сопротивления:

- наземный колесный транспорт;
- воздушный и водный транспорт с винтовым движителем;
- электрические генераторы.

Любой потребитель имеет массы, которые движутся поступательно или вращательно, определяя его инерционные свойства, и характерные зависимости мощности или момента сопротивления от режима его работы.

Для построения модуля потребителя в рассматриваемой СИМ используется сборка из двух модулей:

- модуля «масса» или «ротор», которые задают инерционные свойства потребителя;
- модуля (функционального преобразователя), который определяет статические характеристики потребителя.

На рис. 5 представлен пример статических характеристик, используемых в модуле потребителя «автомобиль» – зависимость момента сопротивления на валу двигателя и частоты вращения вала от скорости движения на различных передачах при различных массах автомобиля.

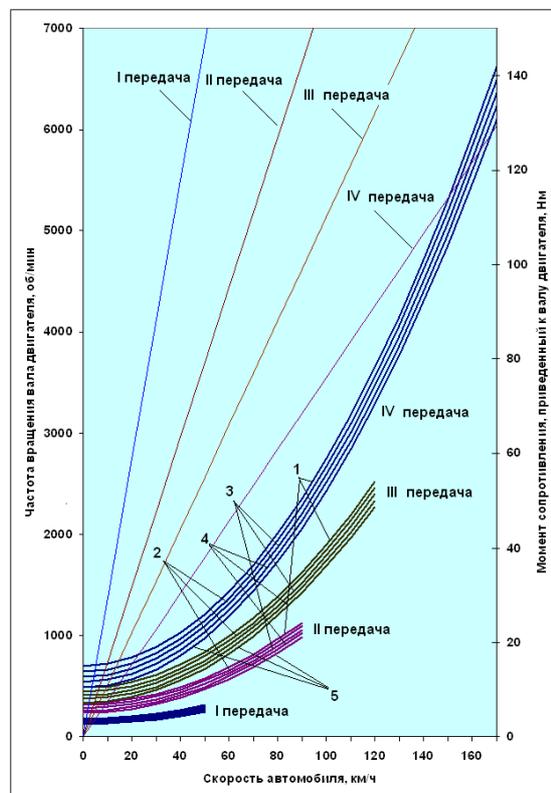


Рис. 5. Статические характеристики модуля потребителя «автомобиль»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САУ

На рис. 6 представлена сборка САУ расходом воздуха авиационного поршневого двигателя с выпускной системой изменяемой геометрии.

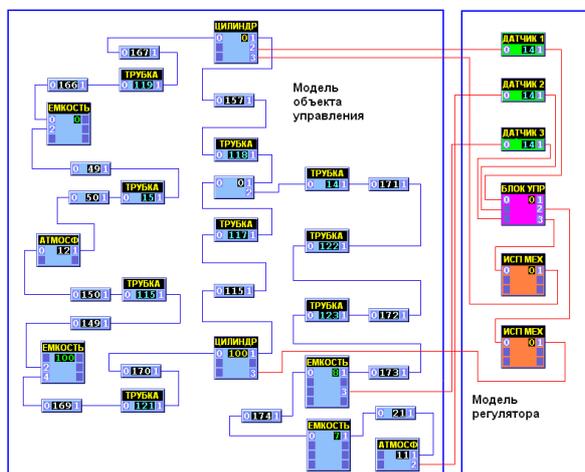


Рис. 6. Пример проекта САУ расходом воздуха авиационного поршневого двигателя типа АПД-800

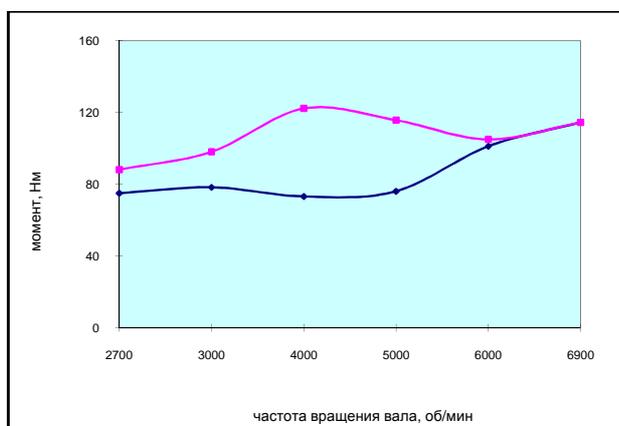


Рис. 7. Результаты моделирования статических характеристик САУ расходом воздуха двигателя АПД-800

Модель собственно двигателя как объекта управления выделена слева. На схеме справа выделена модель регулятора, который воспринимает с помощью датчиков параметры режима работы двигателя, при этом датчики получают упомянутые параметры (в данном случае – изменение частоты вращения вала двигателя, атмосферного давления и давления за дросселем) из специальных портов соответствующих модулей проекта. Информация с датчиков поступает

в блок управления, который устанавливает соответствие геометрических параметров выпускной системы текущему режиму работы и с помощью моделей исполнительных механизмов реализует требуемые изменения геометрии. В данном случае в качестве элементов изменяемой геометрии выбраны так называемые «мощностные клапаны» или регуляторы псевдофазы выпуска. Они предназначены для организации продолженного расширения при низких частотах вращения вала, при которых эффективность настройки выпускной системы близка к нулю.

Результаты моделирования показывают традиционно значительный (20–30%) прирост величины момента двигателя при изменении фазы выпуска по сравнению с применением нерегулируемой выпускной системы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САУ

Для демонстрации возможностей разработанной подсистемы была осуществлена формализация агрегатной схемы, сборка проекта и имитация переходного процесса поршневого двигателя с внутренним смесеобразованием, качественным регулированием мощности, турбонаддувом, комбинированным регулятором давления наддува и регулятором частоты вращения. Агрегатная схема системы приведена на рис. 8.

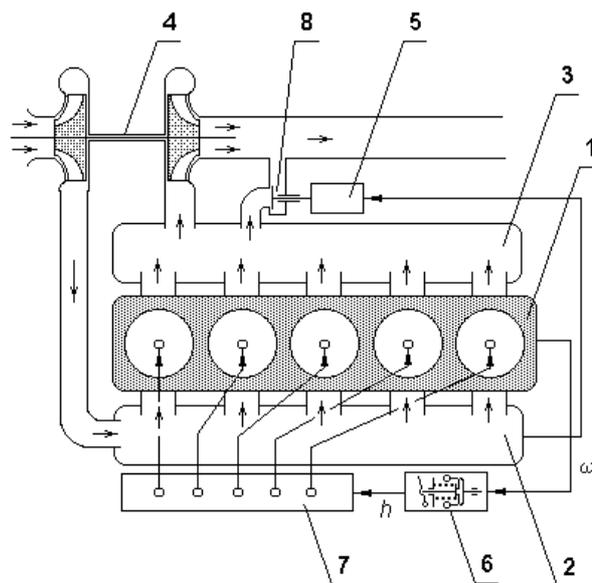


Рис. 8. Агрегатная схема САУ давления наддува комбинированного двигателя

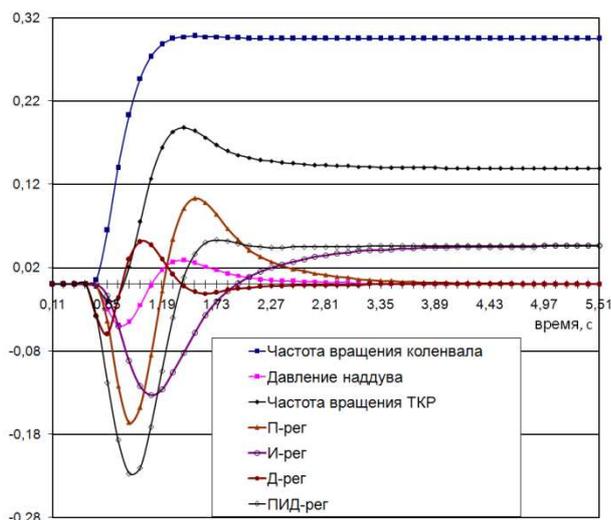


Рис. 9. Результаты расчета переходного процесса двигателя с комбинированным регулятором давления наддува

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная подсистема моделирования функций управляющей части САУ позволяет решать широкий круг исследовательских и проектных задач:

- в совокупности с другими подсистемами СИМ ALLBEA производить исследование характеристик двигателя на установившихся и неустановившихся режимах как при произвольных внешних и внутренних воздействиях, так и при выполнении ездовых циклов;

- по результатам моделирования обосновывать выбор законов управления и параметров регуляторов, датчиков и исполнительных механизмов САУ;

- обеспечивать расчетное сопровождение моторных испытаний двигателя, осуществлять идентификацию моделей элементов САУ и системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Солодовников В. В.** Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования / под ред. В. В. Солодовникова. Кн. 1. М.: Машиностроение, 1968. 768 с.

2. **Regner G., Loibner E., Krammer J.** AVL Modeling Integration of Vehicle and Engine Cycle Simulation with CRUISE – BOOST. AVL List GmbH, Walter L., Truemmer R. AVL Powertrain Engineering Inc. SAE Technical Paper Series 2001-06-1230, 2001.

ОБ АВТОРАХ

Борисов Александр Олегович, доц. каф. двигателей внутреннего сгорания. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1977). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (МАМИ, 1982). Иссл. в обл. управления двигателями внутреннего сгорания.

Черноусов Андрей Александрович, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1994). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. численного моделирования газообмена и систем имитационного моделирования ДВС.