

Разработка математической модели двигателя внутреннего сгорания с использованием программного комплекса PRADIS

Карпенко А.П., МГТУ им. Н.Э. Баумана

Мухлисуллина Д.Т., МГТУ им. Н.Э. Баумана

Овчинников В. А. ООО «Ладуга»

В работе рассматривается параметризованная трехмерная модель механической подсистемы двигателя внутреннего сгорания (ДВС), как элемента системы автоматизированного проектирования ДВС. Модель учитывает трение между элементами, податливость материала и имеет модульную структуру, которая позволяет построить модели ДВС различной конструкции. Модель разработана в среде программного комплекса динамического анализа PRADIS.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; параметризованная трехмерная модель; программный комплекс PRADIS.

"Если мы попытаемся включить в модель слишком много черт действительности, то мы захлебнёмся... Если, наоборот, оробев от столь мрачных перспектив, мы построим слишком упрощённую модель, то вскоре обнаружим, что она не предсказывает дальнейший ход явлений настолько, чтобы удовлетворить нашим требованиям. Следовательно, учёный... должен идти прямой и узкой тропой между Западнями Переупрощения и Болотом Переусложнения".

Р. Беллман

Введение

В силу сложности и многообразия задач, сопровождающих моделирование автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), возникает необходимость разработки систем автоматизированного проектирования ДВС (САПР ДВС). Эти САПР должны включать в себя математические модели шатунно-поршневой группы и газораспределительного механизма (механика), систем впуска и выпуска (газовая динамика), систем топливоподачи и охлаждения (гидравлика) и т.д.

Целью работы является построение параметризованной трехмерной модели механической подсистемы ДВС, которая позволяет конструктору исследовать выходные характеристики

ДВС в зависимости от интересующих его параметров двигателя и на этой основе решать задачу оптимизации ДВС.

В качестве базовой САПР используется комплекс анализа динамики систем различной физической природы – PRADIS [1]. Важным преимуществом комплекса перед другими подобными программными системами является большая библиотека моделей, включающая в себя

- модели одномерных, двухмерных и трехмерных механических элементов,
- модели электронных компонентов,
- модели гидравлических и пневматических компонентов,
- модели элементов сплошной среды,
- модели контактных элементов и т.д.

Одним из активных пользователей комплекса PRADIS является ОАО АВТОВАЗ. В этой связи в настоящее время в комплексе активно развивается автомобильный модуль. Рассматриваемая в работе модель ДВС является частью этого модуля.

Разработанная модель ДВС использована для исследования работы одно-, двух- и четырехцилиндрового восьмиклапанного рядного автомобильного двигателя внутреннего сгорания с верхним расположением газораспределительного механизма.

1. Структура модели

Основными элементами модели двигателя являются маховик FLYWHEEL, передача DRIVE, подшипник коленчатого вала ROT и набор цилиндров CYLINDER. Общая структура модели представлена Рис. 1. Здесь и далее для представления структуры моделей используется входной графический язык препроцессора Qucs [].

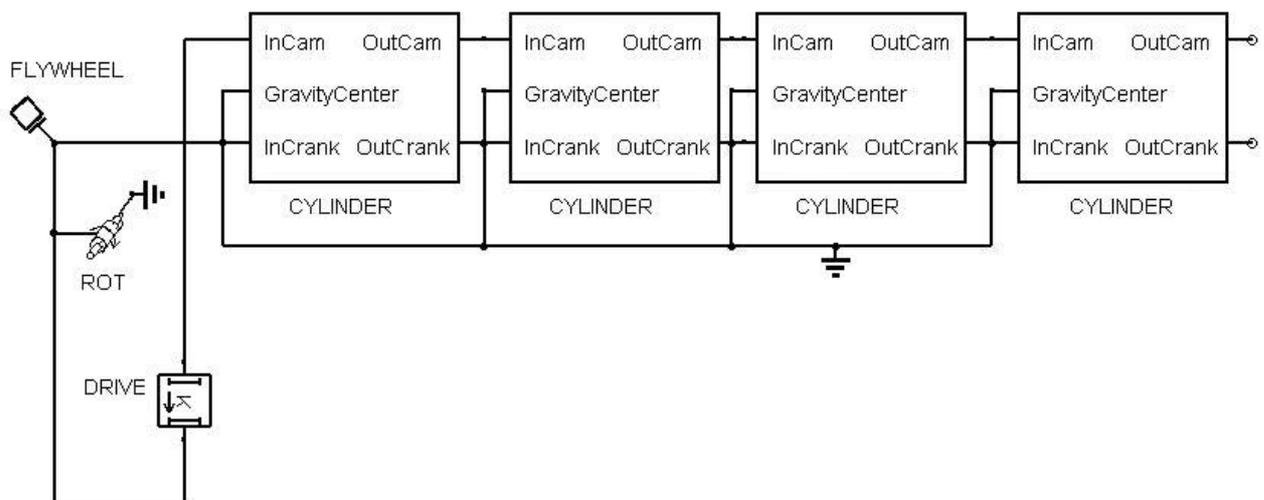


Рис. 1. Qucs- схема четырехцилиндрового двигателя с испытательным стендом.

Маховик FLYWHEEL представлен библиотечной моделью, которая отображает

инерционные свойства произвольного твердого тела при его пространственном движении.

Модуль DRIVE моделирует ременную или цепную передачу, служащую для передачи вращения от коленчатого вала на распределительный вал. Модель учитывает потери в передаче, которые определяются моментом трения в передаче.

Подшипник ROT моделируется с помощью библиотечного цилиндрического шарнира. Модель учитывает упругие и вязкостные свойства подшипника [].

2. Модель цилиндра

Модель цилиндра CYLINDER является наиболее сложным элементом модели двигателя. Модель состоит из модуля кривошипно-шатунного механизма и модуля участка системы газораспределения.

Схема модуля кривошипно-шатунного механизма представлена на Рис. 2. Модуль включает в себя модель кривошипа CRANKSHAFT с противовесами COUNTERWEIGHT, которые образуют участок коленчатого вала, модель шатуна CONNECTING_ROD, а также модели поршня PISTON и системы индикаторного процесса INDICATE_PROCESS_SYSEM. Последняя модель по заданной зависимости давления газов в цилиндре двигателя от угла поворота кривошипа формирует силу, действующую на поршень. Указанная зависимость может быть задана, как в аналитическом виде, так и в виде таблицы значений.

Схема модуля участка системы газораспределения представлена на Рис. 3. Модуль включает в себя модели участка распределительного вала CAMSHAFT, кулачка CAM, клапана VALVE и пружины SPRING с тарелками TOP_PLATE и BOTTOM_PLATE.

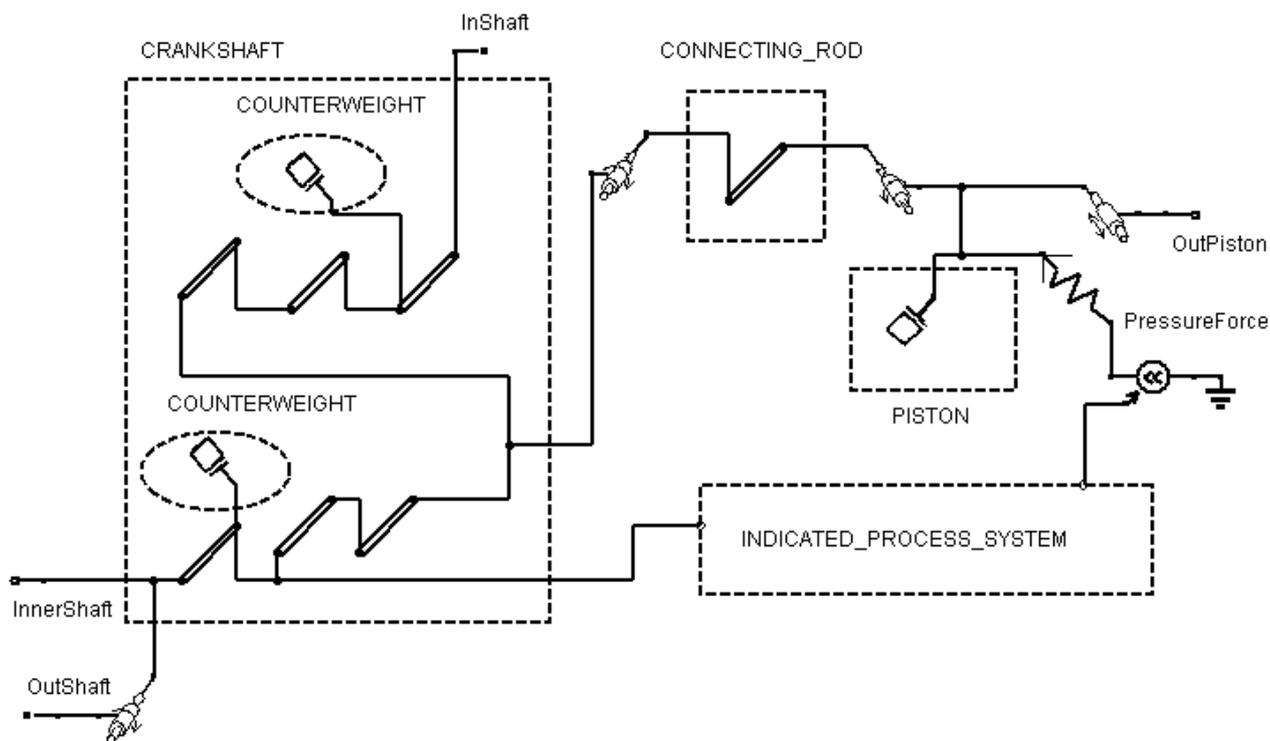


Рис. 2. Qucs-схема кривошипно-шатунного механизма.

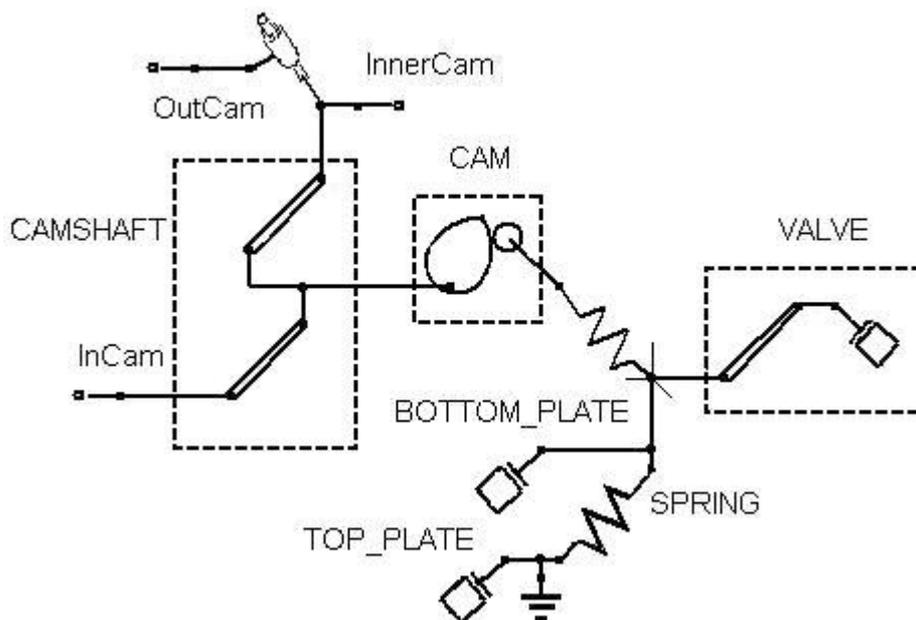


Рис. 3. Qucs-схема участка газораспределительного механизма

Модели коленчатого и распределительных валов, а также стержней клапанов построены на основе библиотечной модели упругого пространственного прямолинейного балочного элемента. Эта модель отражает упругие деформации элемента в результате его растяжения (сжатия), изгиба и кручения вокруг продольной оси, а также перемещения элемента в трехмерном пространстве. В качестве модели шатуна использован такой же балочный элемент, но со смещенным центром тяжести. Имеется возможность использования также библиотечной модели произвольного упругого тела с податливостью, которая рассчитывается с помощью конечно-элементного модуля решателя комплекса PRADIS.

Модели поршней, тарелок, клапанам и маховика, построены на основе библиотечной модели трехмерной инерционной массы. Противовесы моделируются с помощью той же модели трехмерной массы, но со смещенным центром тяжести.

Подшипники коленчатого и газораспределительных валов моделируются с помощью библиотечных моделей цилиндрических шарниров.

Модель контакта между поршнем и цилиндром представляет собой библиотечную модель цилиндрического шарнира, которая позволяет моделировать зазоры, нелинейную податливость, а также нелинейную вязкость в различных направлениях.

В модели системы газораспределения используется модель дискового кулачка с роликовым толкателем. Возможно также использование модели кулачка с тарельчатым толкателем. Профиль кулачка описывается кубическим сплайном, что обеспечивает гладкую зависимость силы, действующей на толкатель, от угла поворота кулачка. Моделируются податливость и инерция кулачка и ролика, трение скольжения и качения между кулачком и роликом.

Пружины моделируются с помощью библиотечной модели упругого линейного пространственного элемента. Имеется возможность задать нелинейную упругую характеристику пружины в виде таблицы значений "деформация - усилие".

3. Модель испытательного стенда

В стационарных условиях ДВС испытывают в отведенных для этой цели и соответствующим образом оборудованных помещениях (боксах) на специальных стендах (Рис. 4) [1]. При этом эффективная мощность, развиваемая двигателем, поглощается тормозной установкой.

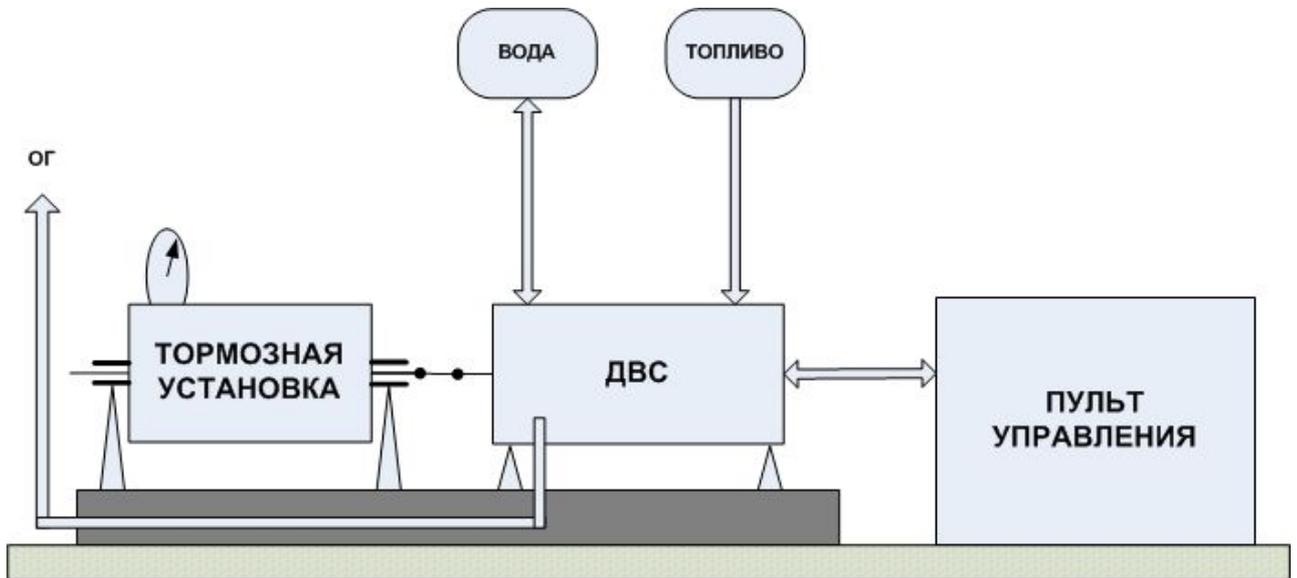


Рис. 4. Схема стенда для испытания двигателя внутреннего сгорания:

ОГ – отработанные газы

Модель испытательного стенда TEST_DESK представлена на Рис. 5. В модели тормозной установки используются библиотечные модели демфера VISCOSITY и упругого элемента SPIRAL_SPRING. Элемент модели POWER_CALCULATION позволяет автоматически на основе момента и частоты вращения коленчатого вала двигателя вычислять его мощность.

4. Исследование модели и результаты

Для формирования математической модели исследуемой системы в программном комплексе PRADIS используется расширенный узловый метод для механических систем [1]. Решатель PRADIS реализует несколько методов интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). При исследовании модели ДВС для интегрирования систем ОДУ использовался неявный метод Штермера [3], для решения систем нелинейных алгебраических уравнений - метод Ньютона, для решения систем линейных алгебраических уравнений - метод Гаусса для разреженных матриц.

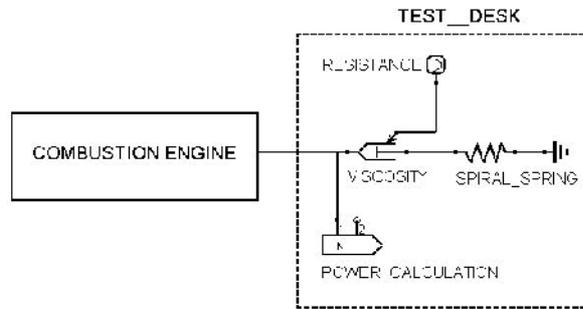


Рис. 5. Qucs-схема стенда для испытания двигателя внутреннего сгорания.

Модели всех элементов ДВС являются параметризованными. В качестве параметров моделей используются геометрические характеристики двигателя (диаметр цилиндра, ход поршня, длины валов), инерционные характеристики деталей (массы и моменты инерции), физические свойства материалов и характеристики соединений (жесткость, вязкость). Все параметры моделей имеют значения по умолчанию, что позволяет конструктору сосредоточиться только на наиболее важных параметрах. Отметим, что в комплексе PRADIS параметризация моделей реализована на языке программирования Python [].

На основе рассмотренных моделей элементов ДВС построены модели одно-, двух- и четырехцилиндрового восьмиклапанного двигателей, а также выполнен анализ их внешних скоростных характеристик, определяющих зависимость мощности и крутящего момента двигателя от числа оборотов его коленчатого вала при полной подаче топлива [4]. Некоторые результаты исследования представлены на Рис. 6, 7.

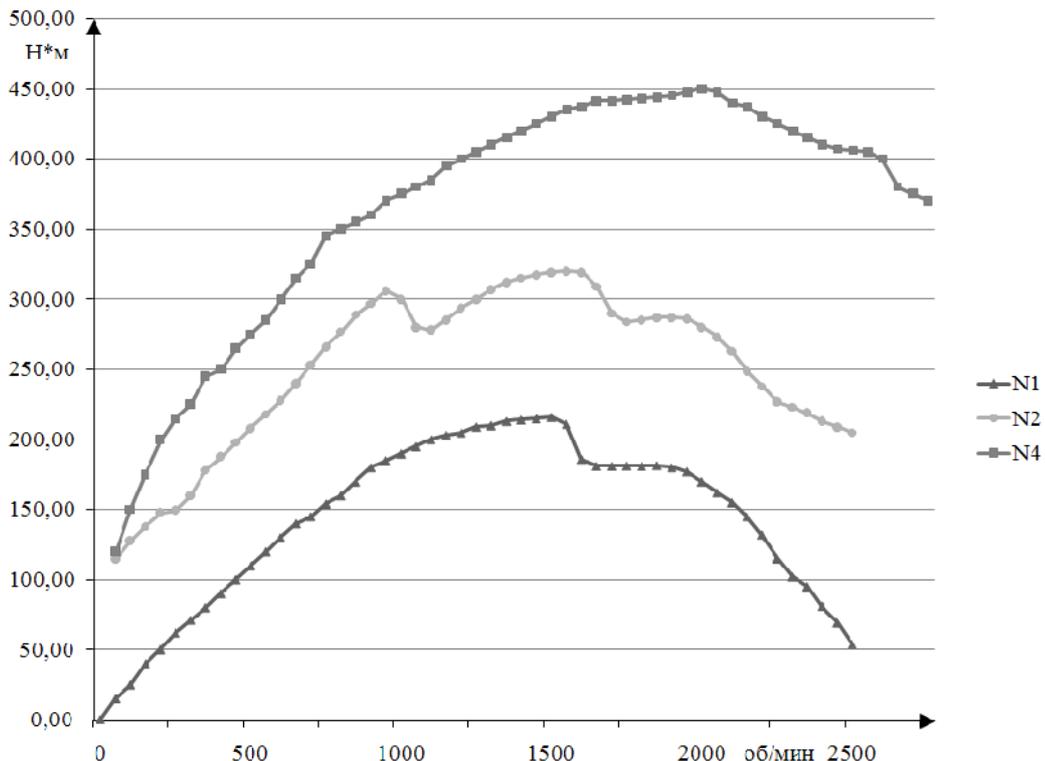


Рис.6. Зависимость крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала одноцилиндрового (N_1), двухцилиндрового (N_2) и четырехцилиндрового (N_4) двигателей.

Результаты исследования показывают хорошее согласие с данными, полученными

экспериментальным путем, что подтверждает адекватность разработанной модели.

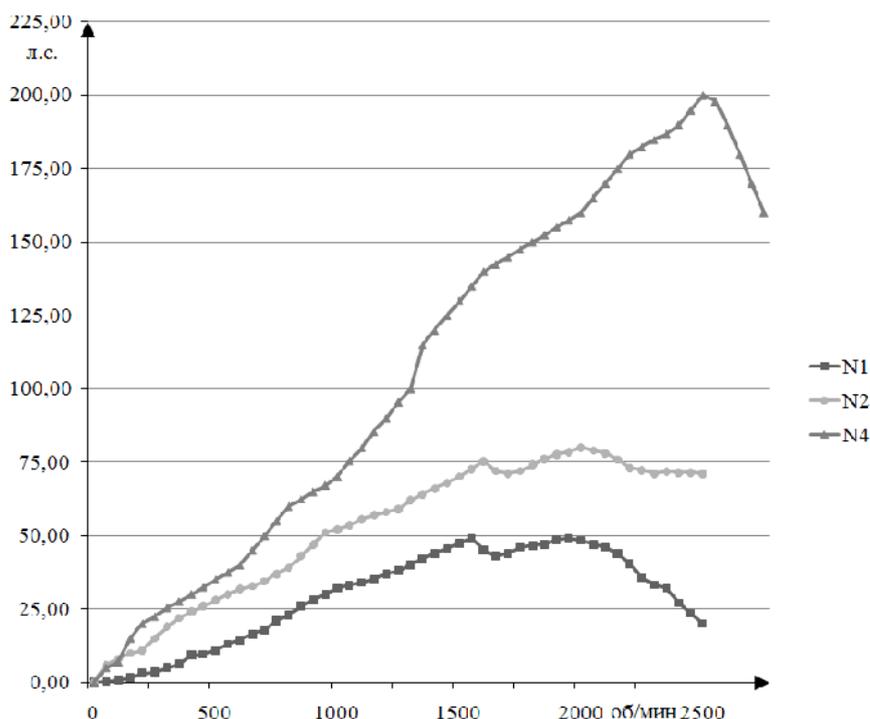


Рис.7. Зависимость мощности от частоты вращения коленчатого вала одноцилиндрового (N_1), двухцилиндрового (N_2) и четырехцилиндрового (N_4) двигателей.

Заключение

При разработке модели ДВС использован модульный подход, так что модель может быть использована для построения моделей двигателей с различными конструктивными решениями: рядных двигателей; V- или W-образных двигателей; оппозитных двигателей и т.д.

Построенная модель ДВС позволяет исследовать работу кривошипно-шатунного механизма двигателя, его газораспределительной системы, рассчитать неравномерность вращения вала, колебания силового агрегата на опорах и т.д.

Все разработанные модели элементов ДВС являются параметризованными, что позволяет конструктору двигателя за короткий срок рассмотреть различные варианты его построения и выбрать оптимальный вариант. Меняя параметры моделей, можно, например, снизить колебания двигателя и этим повысить комфортность автомобиля, снизить расход горючего и т.д. [3]. При поиске оптимального решения, естественно, следует учитывать ограничения на массу элементов и всего двигателя, на прочность элементов и геометрию деталей и т.д. Таким образом, параметрический синтез ДВС сводится к задаче многомерной условной, вообще говоря, многокритериальной оптимизации и требует наличия в САПР ДВС программных компонентов, реализующих методы решения таких задач.

Литература

1. PRADIS - анализ динамики систем различной физической природы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.laduga.ru/pradis/pradis.shtml>, свободный.
2. Кухаренок Г.М., Петрученко А.Н., Русецкий И.К. Теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. Лабораторные работы

(практикум) для студентов специальности «Двигатели внутреннего сгорания». Белорусский национальный технический университет. Минск, 2005. - 55с.

3. Жоголев Е.А. Программа интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка методом Штермера // Вычислительные методы и программирование. Т. I. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1962.
4. Вырубов Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». –М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.