

УДК 621.43XXX

**Использование моделей двигателя для разработки алгоритмов  
управления**

**Теренченко А.С., Козлов А.В.**

ФГУП НАМИ, Россия

**Гришин А.Ю., Скрипник А.А.**

ООО «АВЛ», Россия

**Application of engine models for development of control algorithms**

**Terenchenko A.S., Kozlov A.V.**

FSUE NAMI, Russia

**Grishin A.Yu., Skripnik A.A.**

ООО «АВЛ», Россия

*Основными проблемами при разработке современных систем управления являются ограниченный бюджет и сокращение сроков на проведение испытаний и калибровку при росте количества вариантов применений двигателя и повышении требований к качеству. Применение математических моделей двигателя для разработки систем управления позволяет существенно сократить время разработки управляющего программного обеспечения. Создана модель двигателя, позволяющая проводить анализ характеристик двигателя как на стационарных, так и в переходных режимах работы, а также разрабатывать алгоритмы управления двигателем с последующим переносом в среду реального времени программно-аппаратных комплексов разработки систем управления.*

*Ключевые слова: математическая модель, двигатель, электронная система управления, программа расчета, MiL, HiL, режим реального времени.*

*The main problems in the development of modern control systems are limited budget and reducing the time for testing and calibration in conditions of the increasing number of engine applications and the increasing quality requirements. Application of engine mathematical models for the development of the engine control systems can significantly reduce time for development of control software. Engine model has been created that enables the analysis of*

*characteristics of the engine as in stationary and transient operation, as well as to develop engine control algorithms with subsequent transfer into the HiL systems.*

*Keywords: mathematical model, engine, electronic control system, calculation program, MiL, HiL, real-time mode.*

Несмотря на достижения в области электрификации силового привода, двигатель внутреннего сгорания в ближайшие годы будет продолжать играть доминирующую роль в сфере дорожного и личного автомобильного транспорта.

Алгоритмы управления двигателем постоянно усложняются. Кроме того, при использовании автоматических трансмиссий требуется обеспечить взаимодействие систем управления двигателя и трансмиссии, что увеличивает сложность системы. Количество вариантов применений одного двигателя также растет.

Основными проблемами при разработке современных систем управления являются ограниченный бюджет и сокращение сроков на проведение испытаний и калибровку; несопоставимые результаты, полученные при применении различных моделей в различной среде; неполноценный цикл тестирования системы управления и компонентов, вызванный задержками поставок компонентов и транспортных средств; необходимость в обеспечении высокой степени безопасности и вероятность повреждения в процессе дорожных испытаний; запоздалая идентификация структуры отказов программного обеспечения и несвоевременное определение критических условий и режимов работы, приводящие к повышению стоимости; угроза качеству транспортного средства, вызванная постоянно повышающейся сложностью силового агрегата и большим количеством возникающих задач по испытаниям и калибровке.

С этим связана потребность в создании методологий разработки алгоритмов управления без проведения натурных испытаний (разработка, основанная на моделях, MIL) или с проведением натурных испытаний отдельных компонентов в виртуальном окружении (HiL) [1]. Указанные методологии требуют применения быстродействующих моделей [2] двигателя как в офисе, так и в среде программно-аппаратного тестирования, предоставляющих возможность перераспределения и существенного сокращения отведенных сроков и снижения объема затрат. Благодаря применению единой модели обеспечивается постоянство и воспроизводимость результатов испытаний с возможностью их сравнения и модульного наращивания модели в течение всего процесса разработки транспортного средства. Обеспечивается снижение степени риска, связанного с недостатками идентификации критических условий и режимов работы, за счет выполнения программ испытаний на более ранней стадии, даже тогда, когда аппаратное обеспечение еще отсутствует. Появляется возможность передачи и применения модели двигателя широкому кругу партнеров фактически без всякого риска.

Ниже приводится классификация нульмерных и одномерных моделей двигателя по расчетному времени и детализации моделирования (Рис.1). Трехмерные модели рабочего процесса при разработке алгоритмов управления могут использоваться только в качестве вспомогательных для уточнения скоростей тепловыделения и газодинамических процессов и в данной классификации не приводятся.

**1. 1D Одномерная газодинамическая модель с разрешением по углу поворота коленчатого вала.** Современное ПО для моделирования двигателей позволяет собирать модели из базовых элементов, таких как цилиндры, трубопроводы, турбокомпрессоры, системы постобработки ОГ, системы управления и т.д. Решение уравнений Эйлера предоставляет необходимую информацию о волновых процессах в трубопроводах и их влиянии на коэффициент наполнения, КПД компрессора и турбины и т.д.

Численное решение уравнений газовой динамики в трубопроводах осуществляется с помощью метода контрольного объема и занимает существенную долю процессорного времени, не позволяя проводить моделирование в режиме реального времени.

**2. 0D Газодинамическая модель с разрешением по углу поворота коленчатого вала.** В настоящее время нульмерные модели вызывают всё больший интерес, связанный с возможностью описания пульсаций в объемных элементах и проведению расчетов в режиме реального времени. Эти модели могут применяться во всем процессе разработки, начиная с разработки концепции и до виртуальных испытаний и калибровок в режиме реального времени.

**3. 0D Газодинамическая модель с разрешением по углу поворота коленчатого вала и модель цилиндра с численной оптимизацией.** Данные модели позволяют сократить расчетное время с помощью выбора одного характерного цилиндра.

**4. 0D Модель цилиндра, основанная на усредненных значениях процесса газообмена или с разрешением по углу поворота коленчатого вала.** Инновационный подход, основанный на совместном применении моделей рабочего процесса в камере сгорания с разрешением по углу ПКВ и осреднении решения в газоздушном тракте.

**5. 0D Модель цилиндра, основанная на усредненных значениях процесса газообмена и суррогатная модель блока цилиндров.** Комбинация модели осреднения в газоздушном тракте и суррогатного описания блока цилиндров. Ключевая идея данной модели состоит в конденсации элементов со сложным физическим описанием и длительным временем расчета в суррогатные функции, основанные на данных. Известны различные суррогатные подходы, такие как Relevance Vector Machines (RVM), Support Vector Machines (SVM), Intelligent Neural Network

(INN) и др. Суррогаты могут быть откалиброваны на результатах испытаний или одномерных моделях.

**6. Транзиентная суррогатная модель двигателя.** В отличие от вышеописанных моделей, где двигатель был представлен в виде сети базовых элементов, транзиентная модель позволяет сконденсировать весь двигатель в одну передаточную функцию.

**7. Модель двигателя на основе карты стационарных характеристик.** Наиболее простой подход, основанный на применении двумерных характеристик двигателя, таких как зависимости крутящего момента и расхода топлива от нагрузки и частоты вращения двигателя. Переходные режимы могут моделироваться с помощью введения дополнительных корректирующих таблиц или функций.

Для разработки алгоритмов управления используются типы 2 и 3, достаточно детально описывающие физические процессы, происходящие в двигателях и, при этом, позволяющие проводить расчет в режиме реального времени.

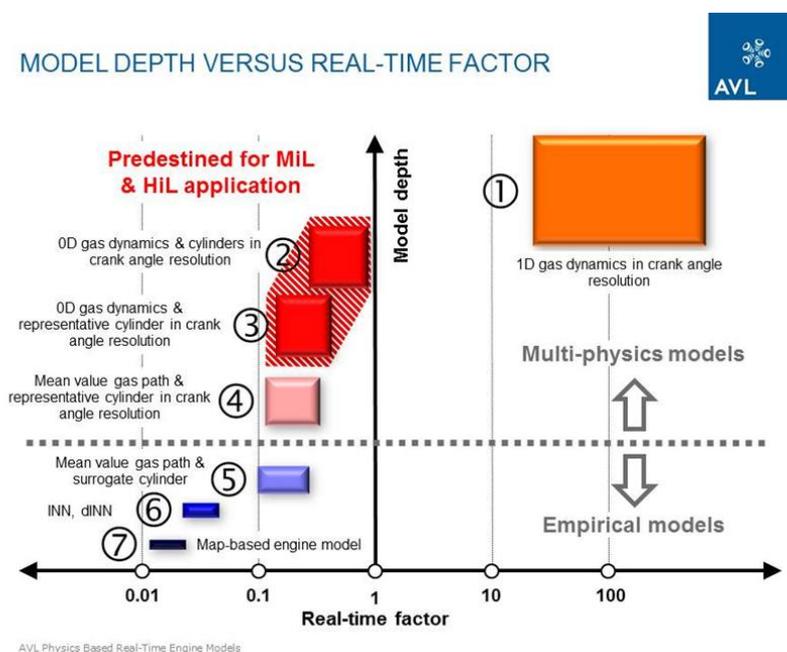


Рис.1 Классификация моделей двигателя

## **Взаимодействие с Системой Воздухоподачи**

Модель двигателя 'Cruise M' разделяется на две различные области в зависимости от возрастания шага интегрирования по времени: область низкой частоты (время) охватывает все компоненты системы газообмена, наряду с термической (температурной) и механической системами; область высокой частоты (угол поворота коленчатого вала) содержит цилиндр и все его непосредственно присоединенные компоненты потока и передачи, такие как каналы, форсунки и теплообмен со стенками. Существуют различные методики моделирования данных областей, которые задаются параметрами настроек взаимодействия системы воздухоподачи внутри элемента Блока Цилиндров CRUISE M:

- Методика усредненной величины;
- Методика наполнения / опорожнения;
- Методика наполнения / опорожнения для нескольких цилиндров;

### **Методика усредненной величины**

В рамках методики усредненной величины, производится заблаговременный расчет рабочего процесса в камере сгорания для одного полного цикла двигателя в условиях заданных граничных величин (усредненные показатели давления на впуске / выпуске отработавших газов, частоты вращения двигателя и температуры стенок). Расчет в камере сгорания возвращает показатели усредненного расхода газа для газообмена и теплообмена со стенками, а также крутящего момента двигателя. Все камеры сгорания заменяются единственной характерной камерой сгорания и соединяются с одним ресивером. Влияние отдельных камер сгорания на процессы газообмена в зависимости от угла поворота коленчатого вала не отражается на процессах газообмена. Другой характерной особенностью данной методики является "неравномерность" нагрузки на центральный процессор в процессе расчета одного оборота двигателя. При интегрировании рабочего процесса коэффициент реального времени существенно увеличивается (на следующие 720 градусов).

## **Методика наполнения / опорожнения**

В рамках методики наполнения / опорожнения, расчет рабочего процесса происходит в параллельном режиме с системой газообмена. Для каждого шага по времени для системы газообмена, интегрирование рабочего процесса происходит в условиях заданных граничных величин для показателей давления на впуске / выпуске отработавших газов, частоты вращения двигателя и температуры стенок, а показатели усредненного расхода (газа) возвращаются системе газообмена. Осуществляются отдельные операции моделирования и расчетов для индивидуальных цилиндров многоцилиндрового двигателя. Таким образом, учитывается влияние пульсации в объемах и их воздействие на эффективность воздухоподачи, работу турбины и компрессора. При использовании методики наполнения / опорожнения, средняя нагрузка на центральный процессор выше по сравнению с методикой усредненной величины, но распределяется более равномерно. Для того чтобы снизить нагрузку на центральный процессор, сохраняя преимущества методики наполнения / опорожнения, применяется методика наполнения / опорожнения для нескольких цилиндров.

## **Методика наполнения / опорожнения для нескольких цилиндров**

Методика наполнения / опорожнения для нескольких цилиндров является усовершенствованным (в части вычислений) вариантом стандартной методики наполнения / опорожнения. Ее применение способствует сокращению длительности и объема вычислений для многоцилиндрового двигателя, в то же время обеспечивая те же технические характеристики взаимодействия камеры сгорания – системы газообмена, как и в формате стандартной методики наполнения / опорожнения. Поэтому, применение данной методики рекомендуется для многоцилиндровых двигателей с идентичными цилиндрами для офисного применения, а также является обязательным для испытаний аппаратно-программного обеспечения в замкнутом контуре (HiL). В рамках методики

наполнения / опорожнения для нескольких цилиндров, ряд цилиндров можно объединить в группы. В каждой из групп есть один основной, эталонный цилиндр. Задание характерных особенностей основной, характерной камеры сгорания применяется с целью снижения расходов на вычисления для других камер сгорания, снижая таким образом общую нагрузку на центральный процессор. Существует возможность задать множественные группы цилиндров в рамках одного Блока Цилиндров.

### **Одномерная модель двигателя**

На первом этапе в ПО AVL BOOST создана одномерная термодинамическая модель б/и цилиндрического рядного двигателя с турбонаддувом и непосредственным впрыском топлива, учитывающая процессы газообмена и теплообмена в трубопроводах, фильтрах, охладителях и ресиверах, а также потери давления в местных сопротивлениях. Двигатель имеет рабочий объем 3.0 л, номинальную мощность 300 кВт и максимальный крутящий момент 600 Н\*м. Схема модели двигателя приведена на рис. 2.

Инициализация потерь давления и теплообмена в элементах впускной системы была выполнена на основании данных от поставщиков компонентов и на продувочном стенде. Коэффициенты расхода впускных и выпускных каналов были взяты из аналогичной конструкции. Возможно проводить дальнейшее уточнение коэффициентов расхода на продувочном стенде или с помощью CFD расчетов.

Скорость тепловыделения в отсутствие данных индицирования взята на основании опыта моделирования двигателей аналогичной конструкции. Модель двигателя также включает модель турбокомпрессора.

Для данной модели были использованы карты характеристик стандартного компрессора и турбины, имеющиеся в базе данных AVL. Использование двух турбокомпрессоров должно обеспечить лучшую динамику двигателя.

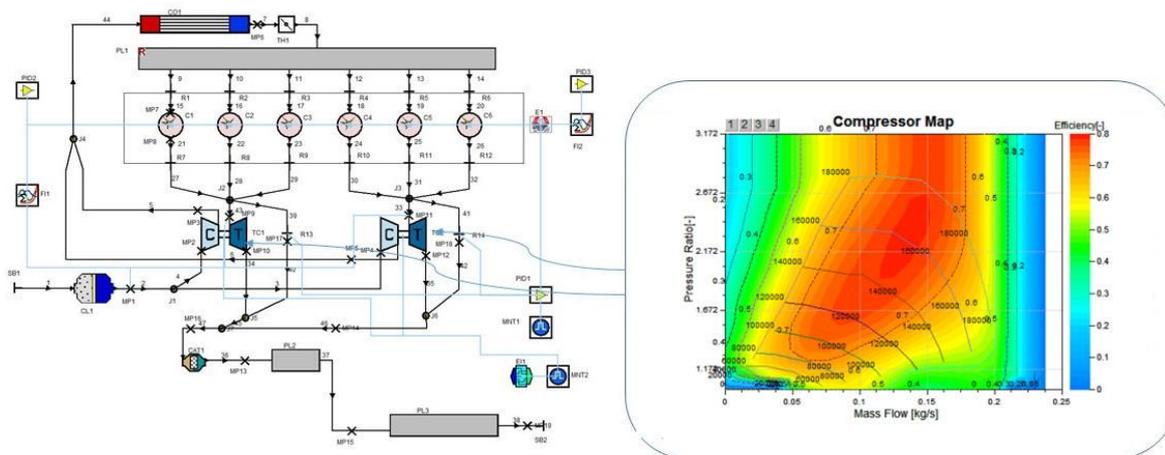


Рис. 2 Схема модели двигателя с характеристиками турбокомпрессора

Рассмотрены импортный турбокомпрессор и турбокомпрессор российского производства. Проведено моделирование по ВСХ. При применении обоих турбокомпрессоров получено заданное целевое среднее эффективное давление.

### Нульмерная модель двигателя

На втором этапе одномерная модель с целью сокращения расчетного времени для будущего использования в режиме реального времени была сконвертирована в нульмерную модель AVL CRUISE M (см. Рис 3). Данная модель включает упрощенное описание процессов газообмена, однако позволяет учитывать влияние фаз газораспределения на процессы газообмена в цилиндре. Тепловыделение в цилиндре двигателя описывается с помощью функции Вибе. Учитывается теплообмен с деталями двигателя, рубашкой охлаждения и окружающей средой. В дальнейшем модель может быть использована также для разработки системы управления тепловым балансом автомобиля. К модели двигателя подключена модель системы электронного управления, созданная средствами ПО Matlab [3]. Элементы системы управления созданы в соответствии с требованиями стандарта AUTOSAR [4], [5]. Реализованы функции управления перепуском газов в турбине (wastegate), фазами газораспределения на впуске и на выпуске. Контроль повышения давления

в основном используется, чтобы установить желаемый коэффициент избытка воздуха. "Boost Pressure Controller" используется для установки желаемого давления наддува "Boost Pressure" перепускным клапаном турбо нагнетателя "Waste gate", с помощью которого можно регулировать медленные переходные процессы на стационарных рабочих режимах. Также, можно проводить регулирование байпасным клапаном двигателя «Bypass», с помощью которого очень быстро можно снизить давление. Этот клапан может использоваться только временно.

Проведено моделирование работы двигателя с электронной системой управления в переходных режимах. Результаты представлены на Рис. 4. Также, проведено моделирование на частичных нагрузках при 10%, 25%, 50% и 75% нагрузки. Результаты представлены на рис. 5.

Модель позволяет проводить дальнейшую разработку алгоритмов управления, а также предполагает последующий перенос в среду реального времени программно-аппаратных комплексов разработки систем управления.

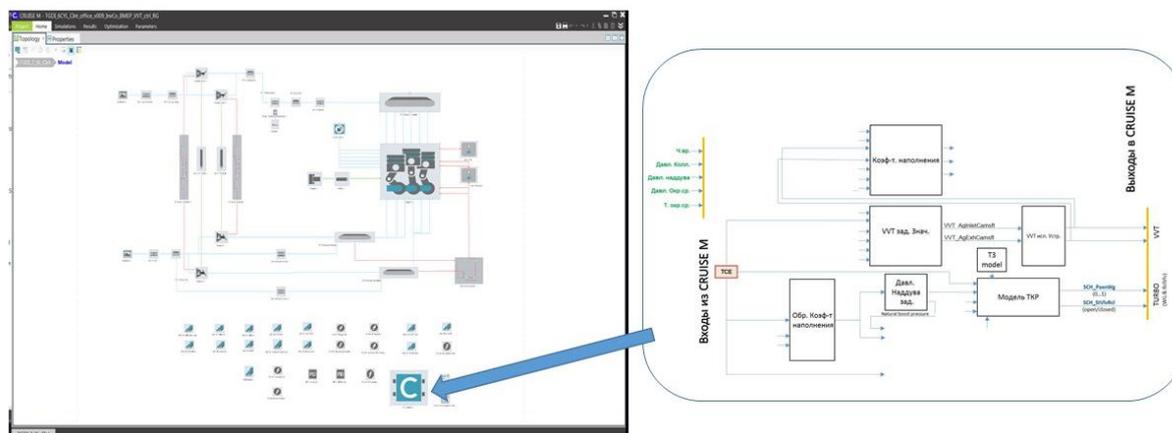


Рис. 3. Нульмерная модель CRUISE M двигателя с системой электронного управления MATLAB.

Методика на основе компьютерного моделирования крайне полезна в процессе исследования новых систем сгорания, так как оптимизации подлежит не только термодинамическая часть, но и функциональные характеристики блока управления.

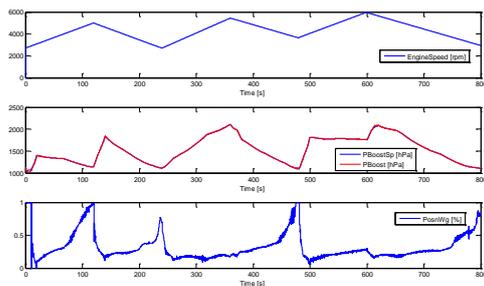


Рис. 4. Результаты моделирования двигателя в переходных режимах.

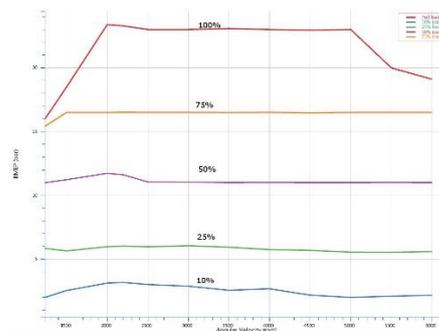


Рис. 5. Результаты моделирования двигателя на частичных режимах. Режимы указаны в % от полной нагрузки.

В данном случае, система программно-аппаратного обеспечения в замкнутом контуре способствует созданию условий работы, предусматривающих безопасность и воспроизводимость результатов, при весьма ограниченных затратах, а также сведению к минимуму воздействия на результаты условий окружающей среды. Оптимальная корреляция между реальными и виртуальными условиями обеспечивает сведение к минимуму циклов оптимизации параметров в ходе процесса разработки.

#### Литература:

- [1] Dr. H. Hülser, Dipl.-Ing. K. Neunteufl, Dr. C. Roduner, Dipl.-Ing. R. Schneider. New Control Concepts for Gasoline, Diesel and Hybrid. Theory and Practice of Algorithm Design, AVL List GmbH, Graz 27. Internationales Wiener Motorensymposium 2006
- [2] Johann KRAMMER, Scalable Modeling Depths for Realtime Engine Simulation Applied for Model Based Calibration Controls, AVL List GmbH, Measurement & Calibration Congress, Brazil, 2014
- [3] Официальная вебстраница MATLAB <http://www.mathworks.com/>
- [4] Официальная вебстраница AUTOSAR: <http://www.autosar.org>
- [5] Frank Kirschke-Biller, AUTOSAR - A Global Standard; 4th AUTOSAR Open Conference, Paris, France, June 11, 2012