

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА СТАДИИ НИР ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЯ

Овчинников В.А.

(ООО «Ладуга», г.Одинцово)

Введение

В настоящее время при проектировании автомобиля активно внедряются методы математического моделирования и исследования математических моделей. При этом круг моделируемых задач очень широк: от моделирования случайных процессов и исследования их статистик, моделирования автомобиля в целом на системном (функциональном) уровне до моделирования поведения автомобиля и его компонент на микроуровне. Важно, что на разных стадиях проектирования могут использоваться различные уровни моделирования систем. В комплексе же математические модели систем автомобиля на разных уровнях и модели синтеза образуют систему поддержки принятия решений при проектировании автомобиля. Такая система позволяет получать приемлемые варианты конструкции и обоснованно выбирать наилучшие. В данной работе рассматриваются возможности и инструменты математического моделирования на стадии НИР и НИОКР.

Любой автомобиль является сложной системой, в которой взаимодействуют многодисциплинарные подсистемы (рис 1.): кузов, подвеска, двигатель, трансмиссия, шины, электросеть, тормозная система, рулевое управление. Причем в связи с внедрением в последнее время электронных систем, таких как ABS, ESP и т.п., взаимодействие между подсистемами и их влияние на автомобиль в целом сильно усложнилось. Поэтому быстрое и качественное исследование совместной работы этих подсистем возможно только с помощью математического моделирования. Соответственно и принятие решений при проектировании подсистем автомобиля также должно выполняться на основании исследований математических моделей.

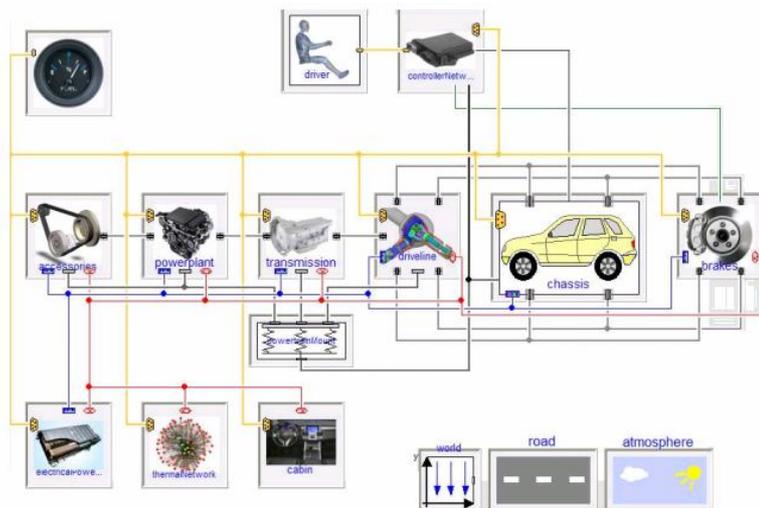


Рис 1. Структура системы «Автомобиль»

Каждая такая подсистема является мультидисциплинарной и состоит из различных физических моделей, таких как модели электроники, механики, гидравлики, пневматики, прочности, газовой динамики, акустики, термодинамики, химии.

К тому же подсистема сама состоит из компонент, которые также могут иметь представление в той или иной физике.

При моделировании конкретного расчетного случая поведения автомобиля или какой-то отдельной подсистемы важно точно моделировать поведение ключевых подсистем, а поведение других можно моделировать приближенно без потери точности. Это достигается с помощью разделения математических моделей на уровни.

На 1-м уровне моделирования функциональная модель неключевой подсистемы представляется в виде черного ящика с заданным поведением. К примеру, рулевое управление можно моделировать в виде передаточной функции, двигатель как источник момента и т.п. При этом можно исследовать поведение автомобиля или работу важных подсистем, меняя общие параметры этого черного ящика. На этом же уровне можно моделировать такие характеристики автомобиля как масса или стоимость.

Примеры задач, исследуемых на 1-м уровне:

- продольная динамика автомобиля;
- вибрации силового агрегата;
- тепловой баланс автомобиля.

На 2-м уровне подсистема моделируется как набор взаимодействующих компонент. При этом физика описывается более детально, и воспроизводятся тонкие эффекты. Параметрами являются параметры компонент подсистемы. Данный уровень важен как для проектировщиков автомобиля, так и для интегральных поставщиков подсистем.

Примеры задач для 2-го уровня:

- исследование работы трансмиссии;
- исследование работы подвески;
- электробаланс автомобиля;
- структурный синтез кузова по требованиям NVH.

На 3-м уровне моделируется работа уже самих компонент, например, генератор, аккумулятор, фильтр двигателя, шина и т.д. Этот уровень важен для поставщиков 2-го уровня или для инженера-конструктора на стадии НИОКР. При этом задача поставщика - создание адекватных моделей производимых компонент, предоставление их характеристик, чтобы инженер мог использовать эти данные при проектировании.

Пример задач для 3-го уровня:

- работа главного тормозного цилиндра;
- работа гидроусилителя руля;
- работа амортизатора подвески;
- оптимизация формы щитка передка.

При такой классификации моделей можно выделить различные этапы формирования технического задания на проектирование автомобиля.

При исследовании на 1-м уровне исходными данными является концепция автомобиля (класс, примерная стоимость, масса, мощность силового агрегата, ...). Итогом исследования является проработанная концепция и техническое задание на НИР для подсистем.

При исследовании на 2-м уровне необходимо синтезировать параметры подсистемы, подобрать компоненты таким образом, чтобы характеристики подсистемы соответствовали техническому заданию. Соответственно параметры компонентов, которые удовлетворяют этому условию, будут являться техническими требованиями к данным компонентам. Таким образом, формируется техническое задание на НИОКР компонент.

Рассмотрим инструменты исследования математических моделей. Наиболее активно сейчас используется имитационное математическое моделирование. Постепенно в работе инженера начинают применяться системы оптимизации: параметрической оптимизации, топологической оптимизации. Однако все это инструменты для уровня НИОКР, как правило, с использованием для 3-го уровня моделирования. В то время как на стадии НИР для задач 1-го и 2-го уровня начинают играть роль следующие инструменты:

- статистический (а также регрессионный и ковариационный) анализ (учет случайных факторов, исследование брака и допусков, построение статистической модели системы);
- поиск решений на множестве Парето (наилучших решений среди альтернатив);
- дискретная оптимизация (оптимизация модификаций автомобиля);
- кластерный анализ (группировка решений, формирование базового семейства);
- нечеткий (Fuzzy) анализ (поведение системы в условиях неопределенности общих параметров, технологических условий, свойств компонент или подсистем).

Система в целом и каждая из подсистем любого уровня может быть описана следующим образом: математической моделью, набором расчетных случаев, набор критериев и ограничений оптимизации, набор правил и эвристик исследования системы. В целом это представляет собой базу знаний. Используя данную базу знаний, система поддержки принятия решений позволяет генерировать программу исследований и проектирования, оценивать систему в целом, давать рекомендации по выбору альтернатив на стадии НИР.

Рассмотрим работу описанной концепции на примерах.

Моделирование гибридного автомобиля

Систему «Автомобиль» можно показать на примере модели гибридного автомобиля [1]. Модель разработана с использованием библиотек на языке Modelica и может моделироваться в таких системах как PRADIS, SimulationX, Modelica и др. поддерживающих стандарт Modelica 3.0.

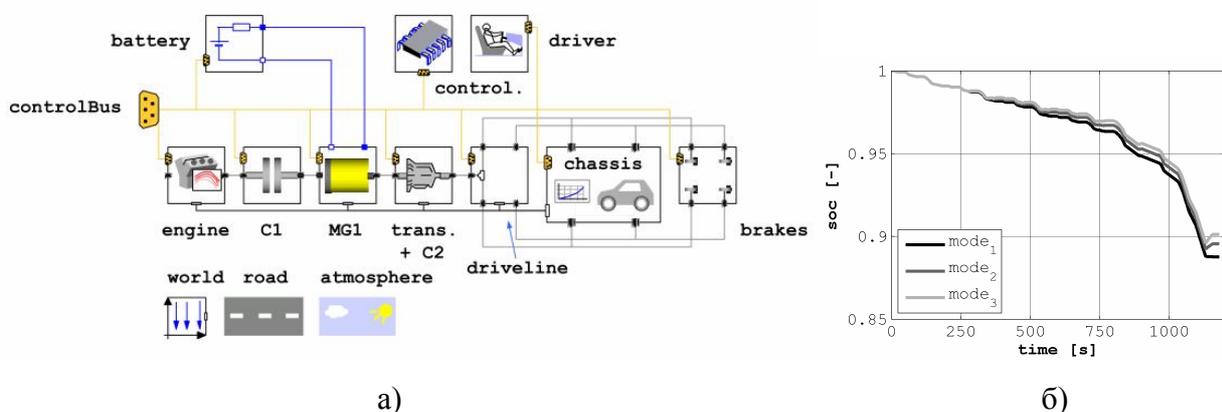


Рис 2. Модель гибридного автомобиля (а) и результаты анализа разряда аккумулятора (б)

В состав модели входят ключевые подсистемы автомобиля и специально разработанные для гибрида (система управления, топливные элементы, электродвигатель). Здесь ключевыми подсистемами анализа является система управления и электрическая сеть. Остальные же подсистемы представлены как модели 1-го уровня. Моделируется работа электрической сети при движении автомобиля в различных режимах.

Моделирование коробки переключения передач.

Ключевыми элементами модели КПП являются: зубчатое зацепление, синхронизатор, тросики управления, валы, различные модели сцеплений. При моделировании на 1-м уровне модель КПП характеризуется такими параметрами как число ступеней, передаточное число ступени, к.п.д. ступени, жесткость передачи, инерция передачи. При моделировании на 2-м уровне модели элементов должны максимально точно воспроизводить различные эффекты, например, силы трения, «трещетку» зубьев при неполном зацеплении, инерцию и упругость валов и шестерен. На рис.3 показана модель АКПП и ее исследование [2].

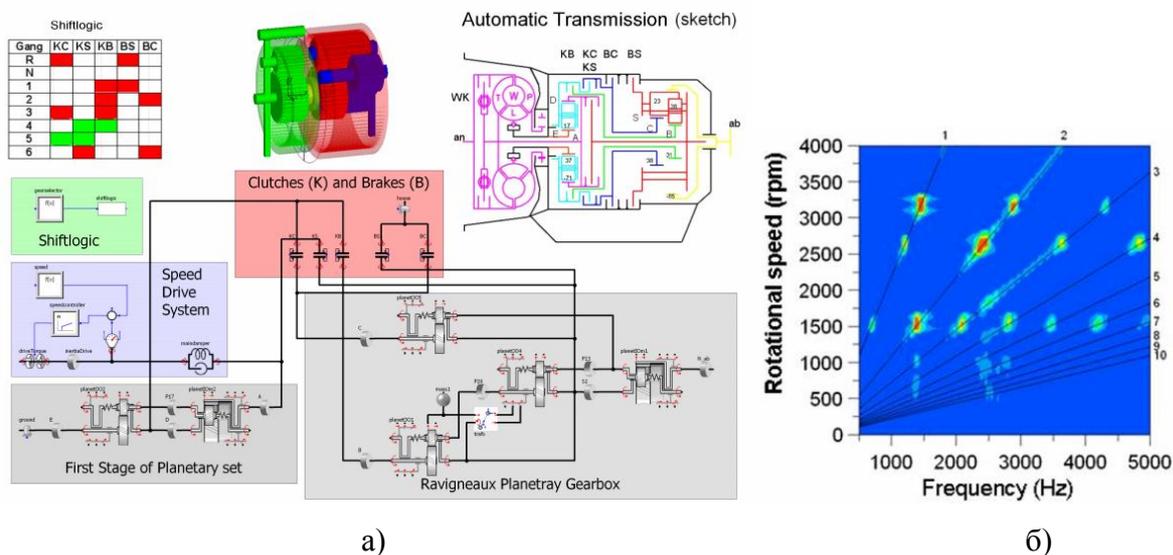


Рис 3. Автоматическая коробка переключения передач (модель в SimulationX) (а), спектральный анализ для нормальной контактной силы в зубчатой передаче (б).

Такая модель позволяет оптимизировать конструкцию по потреблению топлива, улучшению комфорта переключения передач и динамики, передаче момента, уменьшению

шумов. Для исследования КПП могут применяться специализированные инструменты, такие как анализаторы спектра.

Рассмотрим проблему, возникающую при исследовании трансмиссии на 1-м уровне моделирования – подбор передаточных чисел коробки передач. Критериями подбора могут быть такие характеристики, как топливная экономичность, скорость разгона автомобиля и его эластичность, нагрузки в трансмиссии, максимальная скорость и др. В целом данная задача является многокритериальной проблемой оптимизации. Соответственно задачу можно решать непосредственно как задачу многокритериальной оптимизации, но иногда бывает полезно рассмотреть целое множество оптимальных решений – которые не хуже друг друга. Таким свойством обладают решения лежащие во множестве Парето. Для поиска множества Парето может быть использован один из инструментов многовариантного анализа (например, PRADIS/Multi). На рис. 4 показан результат поиска множества Парето для трансмиссии заднеприводного автомобиля [3].

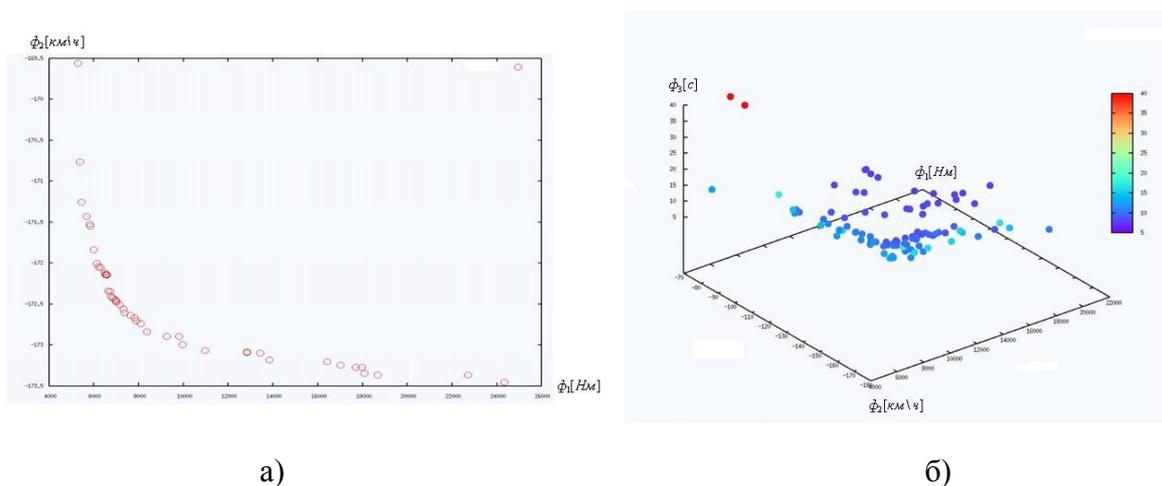


Рис 4. Фронт Парето для критериев скорость-нагрузка (а), фронт Парето для критериев скорость-нагрузка-время разгона.

Каждое из этих решений является оптимальным с точки зрения указанных критериев. И далее уже конструктор может выбрать приемлемое решение с учетом различных слабоформализуемых факторов (наличие, компоновка, предполагаемая стоимость и т.п.).

Моделирование двигателя внутреннего сгорания и его элементов.

Рассмотрим на примере двигателя внутреннего сгорания переход от функционального моделирования на стадии НИР к моделированию на микроуровне на стадии НИОКР. На рис. 5 показана функциональная модель ДВС (Modelica, PRADIS).

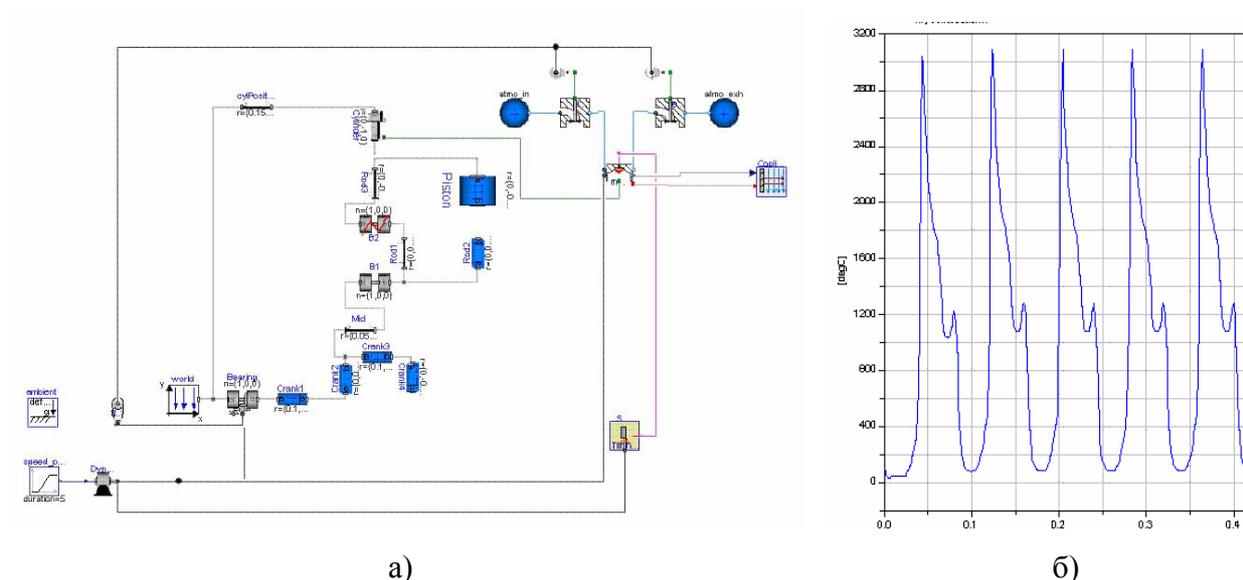


Рис 5. Модель цилиндра ДВС. Схема цилиндра (а), температура газов в цилиндре (б)

Модель описывает механические, термодинамические, газодинамические процессы и состоит из подсистем: механическая, впуска-выпуска, камеры сгорания, рециркуляции газов (EGR), охлаждения. С помощью данной модели решалась проблема повышения экологичности ДВС. В ходе оптимизации на стадии НИР получены целевые параметры системы EGR для стадии НИОКР.

На рис. 6 показаны результаты CFD анализа на микроуровне модуля EGR. С помощью конструктивных решений (оптимизация канала охлаждающей жидкости, оптимизация канала выхлопных газов, оптимизация формы корпуса) были достигнуты целевые значения параметров с учетом ограничений по массе и технологичности.

При этом конечно-элементная модель состояла из 50 млн. элементов, решалась совместная тепловая задача, задача течения выхлопных газов и охлаждающей жидкости. Для сравнения, размерность функциональной модели всего двигателя около 100 степеней свободы.

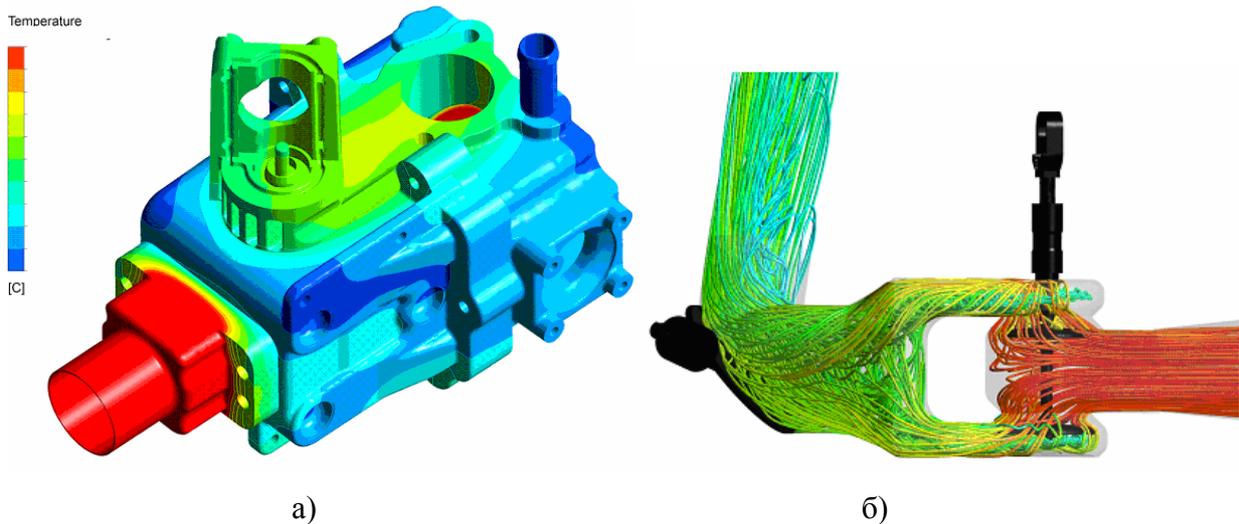


Рис 6. Распределение температуры по корпусу EGR (а), давление в потоке газов (б)

Заключение.

В работе рассмотрено применение системного моделирования для принятия решений при проектировании автомобиля на стадии НИР и НИОКР. Системное моделирование начинает играть большую роль в связи с усложнением взаимодействия модулей автомобиля. На примерах показано применение функциональных моделей на стадии НИР и переход от функциональных моделей к моделям на микроуровне на стадии НИОКР

Список литературы:

1. D.Simic, T.Bäuml. Implementation of Hybrid Electric Vehicles using the Vehicle Interfaces and the SmartElectricDrives Libraries. - Proceedings of the 2009 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium.
2. SimulationX Application. User Guide, ITI, Dresden, 2010.
3. А.П.Карпенко, В.А.Овчинников, А.С.Семенихин. Распределенная программная система для построения множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации динамических систем с использованием параллельного генетического алгоритма. – Наука и образование, #7 июль 2008.