

Филомофитский Алексей
11.11.2011

Кратко о Моделике и турбинах

Аннотация

Данная статья поверхностно знакомит читателя с языком моделирования Modelica, и в качестве демонстрации его возможностей приводится пример создания модели системы с газовой турбиной, одним из элементов которой является реагирующий элемент (камера сгорания), где происходят химические реакции.

Modelica предназначен для моделирования структурно-сложных гибридных систем. Учитывая современный интерес к исследованию функционирования сложных физических систем, становится актуальным вопрос о принятии средств, подобных Modelica, на вооружение.

В основу статьи положены работы [1] и [2], выдержки из которых приводятся в переводе на русский язык.

Содержание

1. Введение в Modelica.....	4
1.1. История.....	4
1.2. Акаузальное моделирование.....	6
1.3. Компонентная (объектная) декомпозиция	7
1.4. Субъектная декомпозиция.....	7
1.5. Объектно-ориентированное моделирование.....	8
1.6. Соединение компонент	8
1.7. Пример языка Modelica	9
1.8. Наборы библиотек Modelica	9
2. Создание модели системы с газовой турбиной	11
2.1. Компрессор.....	11
2.2. Турбина.....	12
2.3. Камера сгорания.....	12
3. Тестирование модели с турбиной.....	14
3.1. Модель системы с гидравлическим тормозом	14
3.2. Модель системы с контроллером скорости.....	15
4. Заключение.....	17
Литература	18

1. Введение в Modelica

Modelica - это сравнительно новый язык моделирования (появился в 1997 году), поддерживающий важную концепцию беспричинного (акаузального) моделирования, а также объектно-ориентированного моделирования. Возможность структурирования моделей компонентов в библиотеки моделей делает повторное использование моделей естественной частью процесса моделирования. Новые возможности, доступные в Modelica, меняют подход к моделированию.

Надо сказать, что большую популярность Modelica завоевала среди автомобильных производителей таких как Audi, BMW, Daimler, Ford, Toyota, VW. Подтверждением этого является наличие заметного набора библиотек Modelica, направленных на автомобильную промышленность. Работа с моделями строится на основе HIL-технологии (сокр. от англ. Hardware In the Loop, «железо» в цикле моделирования). Создается модель и изучается ее поведение в ходе виртуальных экспериментов. Но область применения Modelica не ограничивается только автомобильной промышленностью. Среди пользователей числятся такие промышленные гиганты как ABB, EDF, Siemens.

1.1. История

Попытки разработки Modelica начались в 1996 году в рамках одной из задач проекта ESPRIT (Simulation in Europe Basic Research Working Group) с целью разработки стандартизированного языка моделирования для применения в различных сферах жизнедеятельности. Идея заключалась в том, чтобы объединить опыт, накопленный в ряде языков моделирования, в том числе: Allan, Dymola, NMF, ObjectMath, Omola, SIDOPS+ and Smile. Первая спецификация языка Modelica была опубликована в 1997 году. Одним из важных замечаний является то, что модели из различных областей (электротехнической, механической, термодинамической и т.д.) описываются одним типом алгебраических, дифференциальных и дискретных уравнений и, таким образом, могут решаться с помощью общего инструмента моделирования, который не зависит от области моделирования. В 2000 году некоммерческая, неправительственная организация Modelica была основана с целью разработки и содействия применению Modelica в качестве стандартного языка моделирования. В настоящее время существуют две основные программы для компиляции кода Modelica: Dymola и MathModelica. Они обладают графическим схемным редактором, что значительно облегчает процесс создания моделей. К

сожалению, они являются коммерческими продуктами. Но есть и открытые варианты компиляторов: OpenModelica и SimForge. Конечно, они не так стабильны и красивы как коммерческие, но являются вполне пригодными. OpenModelica предоставляет пользователю не очень удобный интерфейс для работы с программой – обычную консоль (рис. 1). Но эту ситуацию пытается исправить продукт SimForge (OpenModelica выступает в роли backend) с помощью своего графического редактора. К тому же проект OpenModelica окружает активное сообщество, целью которого является развитие самого проекта. Совсем недавно, в конце 2010 года, вышел продукт под названием OMEdit (или OpenModelica Connection Editor). Это полностью свободно распространяемая полноценная среда для моделирования, основанная на OpenModelica (рис. 2).

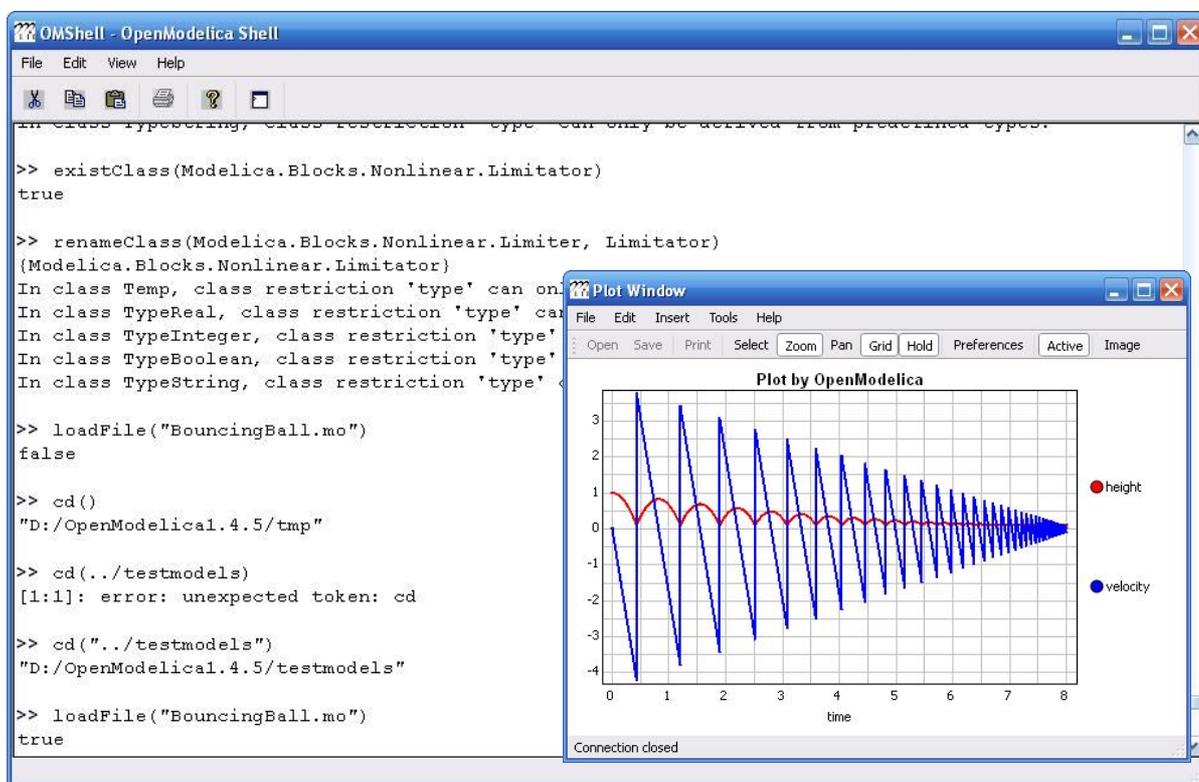


Рис. 1. Консоль OpenModelica

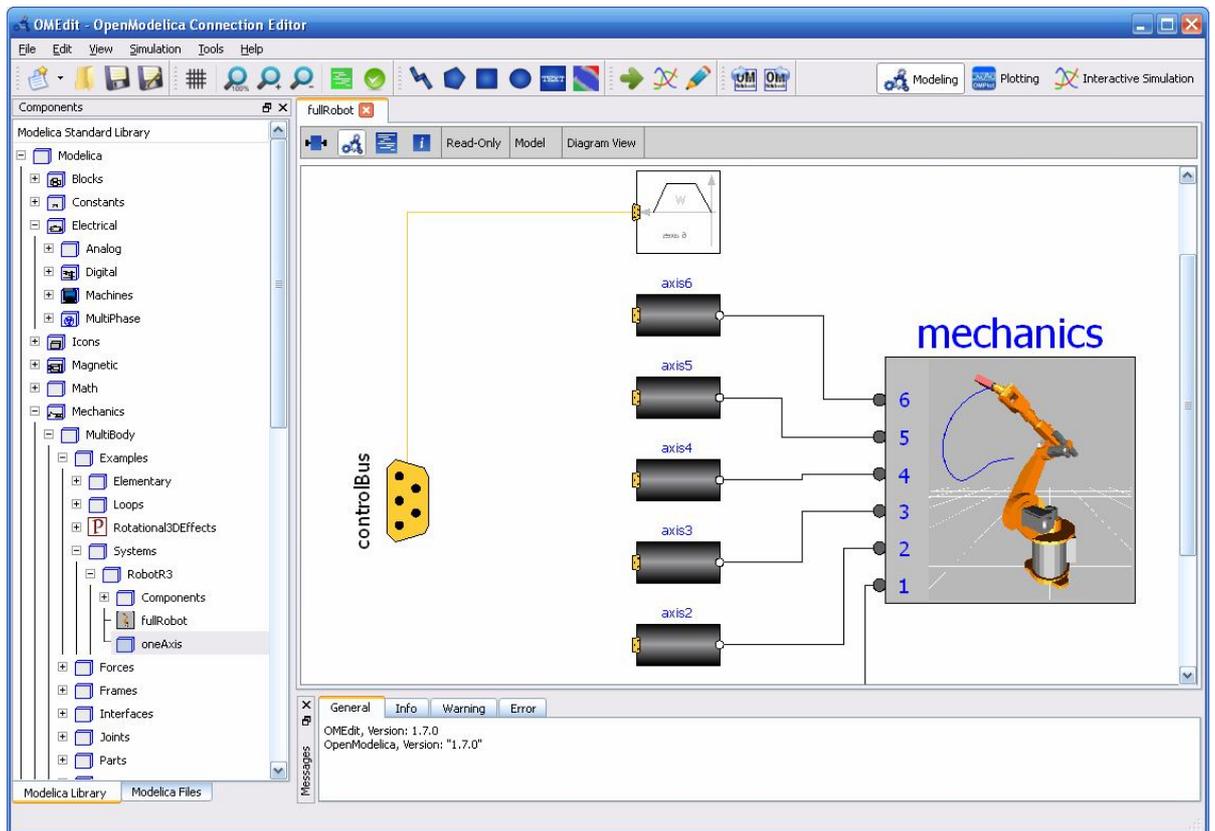


Рис. 2. Окно среды OMEdit

1.2. Акаузальное моделирование

В большинстве термодинамических систем компоненты участвуют в сложном взаимодействии друг с другом. Рассмотрим подсистему охлаждающего цикла, охватывающего компрессор и конденсатор. Компрессор влияет на условия работы конденсатора, и, наоборот, конденсатор также влияет на условия работы компрессора. Взаимодействия такого типа обычно приводят к неявной системе уравнений. Многие, прочно вошедшие в обиход, программы для моделирования, такие как Simulink и VisSim, используют концепцию блочного моделирования, которая представляет из себя методику последовательного моделирования, где используются модели с четко определенными входами и выходами. Из-за присутствия в термодинамических системах взаимодействий компонентов, где нечетко определяются входы и выходы, делают этот тип систем плохо подходящим для формулирования в терминах блочного моделирования. Более того, реализованные модели работают только на одном наборе граничных условий. Рассмотрим запись закона Ома в последовательном языке моделирования. В зависимости от граничных условий, может быть использована одна из трех формулировок:

$$U=R*I$$

$$R=U/I$$

$$I=U/R$$

Чтобы охватить все варианты, необходимо три реализации одного закона. Акаузальное моделирование – это концепция записи уравнений модели в нейтральной форме без учета порядка вычисления. Таким образом, при использовании акаузального моделирования необходима только одна реализация закона Ома, которой может быть любая из трех выше приведенных форм. Акаузальное моделирование тесно связано с физическим моделированием. Физическое моделирование является концепцией построения модели системы, при котором соединения компонентов модели отражают физическую структуру системы. Кроме того, компоненты модели должны быть независимы от конкретной реализации системы, так что граничные условия для компонентов модели системы могут изменяться в случае применения в моделях различных систем.

1.3. Компонентная (объектная) декомпозиция

Компонентная декомпозиция является декомпозицией системы на физические компоненты. Простой охлаждающий цикл может быть разбит на следующие компоненты: компрессор, конденсатор, вентиль, испаритель и трубы. Такой инструмент для моделирования как Simulink является компонентно-ориентированным, так как вы можете собирать модели из реализаций физических компонентов. Однако он не использует понятие физического моделирования, так как реализации компонентов зависят от того, как они соединены в модели системы.

1.4. Субъектная декомпозиция

Субъектная декомпозиция тесно связана с концепцией объектно-ориентированного моделирования. Идея субъектной декомпозиции заключается в том, чтобы объединить общие свойства группы моделей в супер-модель, от которой суб-модели могут наследовать методы и свойства. Рассмотрим пример охлаждающего цикла, состоящего из компрессора, конденсатора, расширительного клапана и испарителя. Компоненты моделируются, используя законы сохранения массы, импульса и энергии. Вместо записи уравнений баланса для каждого из компонентов, некая супер-модель, содержащая уравнения баланса, может быть унаследована каждым из компонентов. Преимущество здесь в том, что такой код, который используется в нескольких

компонентах, может быть реализован единожды, а затем повторно использован, экономя время на реализацию и отладку.

1.5. Объектно-ориентированное моделирование

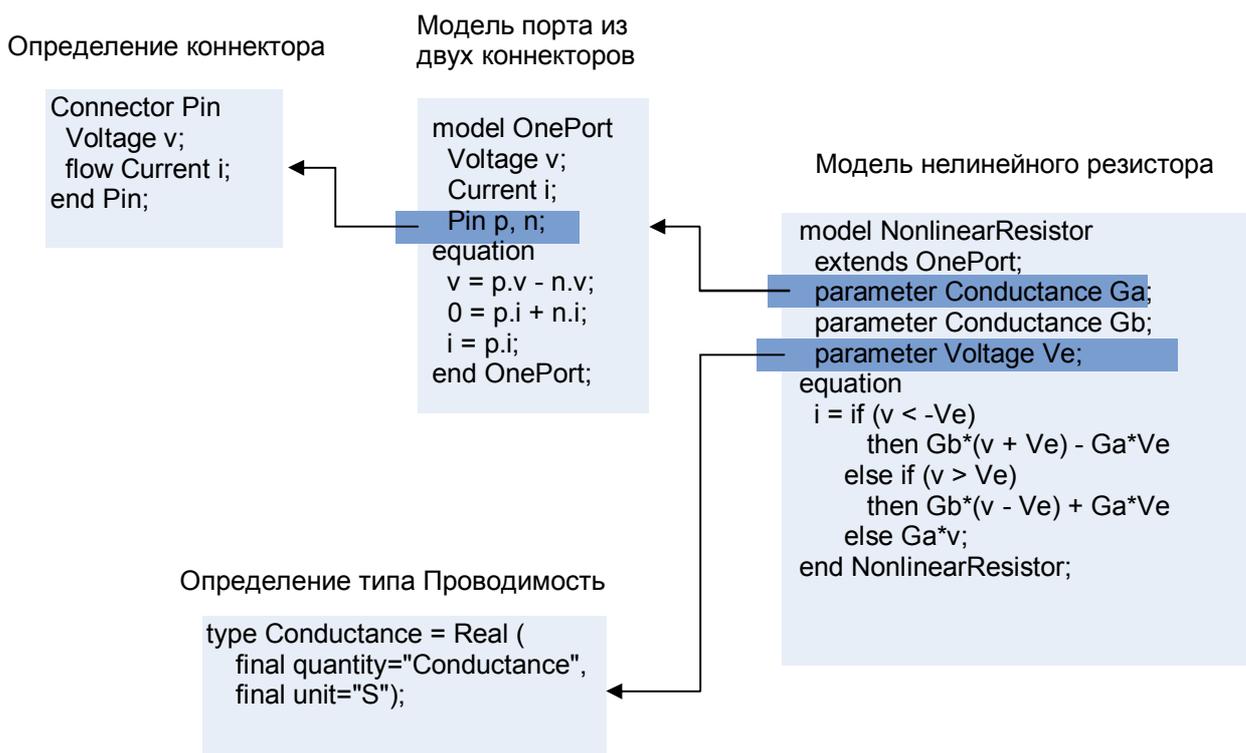
Структурное моделирование физических систем, использующее объектно-ориентированный подход к моделированию, не так хорошо известно как объектно-ориентированное программирование. Согласно принципам ООП, язык моделирования Modelica обладает тремя свойствами: инкапсуляция, наследование, полиморфизм.

Естественный вопрос: а что такого можно сделать с помощью объектно-ориентированного моделирования, чего нельзя добиться традиционным подходом? Объектно-ориентированный подход в первую очередь связан с вопросом о связи между моделью и структурированием кода. Одинаковые модели могут быть реализованы с или без ООП. Разница исключительно лишь в реализации, а не в математической модели. Объектно-ориентированное моделирование обладает возможностью совместного использования кода, что уменьшает повторение частей кода и облегчает его поддержку. Однако одним из недостатков объектно-ориентированного моделирования является опять таки фрагментация кода. Недостатком является то, что при возникновении необходимости поправить модель может случиться сложность с представлением всей иерархии модели.

1.6. Соединение компонент

Мощным средством Modelica является ограниченный специальный класс connector, который объявляется как набор переменных без раздела с уравнениями или алгоритмами. Коннектор специфицирует связи между компонентами (моделями). Соответствующий коннектор – это обычно первая вещь, которая определяется при создании модели или библиотеки элементов. Переходы между областями физики (механика, электротехника, гидравлика и т.д.), как правило, осуществляются включением различных типов коннекторов в модель. Соединение из двух коннекторов автоматически создает уравнение, которое рассматривается как связь между двумя компонентами. Другие средства связи также существуют - через глобальные переменные или между уровнями модели, - но соединение коннекторов является стандартным интерфейсом.

1.7. Пример языка Modelica



1.8. Наборы библиотек Modelica

На данный момент на базе Modelica создано довольно большое количество различных библиотек, не считая стандартной библиотеки (Modelica Standard Library), которая включает в себя богатый набор элементов для моделирования электротехники (аналоговой, цифровой, электродвигателей), механики (1D/3D), термодинамических, гидравлических систем, магнитных явлений, систем управлений и карт состояний. Библиотеки предоставляются с двумя типами лицензий: бесплатной (около 20 библиотек) и коммерческой (около 10 библиотек). Среди бесплатных библиотек можно выделить:

- Waste Water. Моделирование и обработка очистных сооружений.
- Neural Network. Нейронные сети.
- ATplus. Моделирование и управление зданием.
- Motorcycle Dynamics. Динамическое моделирование мотоцикла (с учетом тестирования и проверки активных систем управления динамикой мотоцикла).
- ThermoPower. Моделирование тепловых электростанций.

- Buildings. Моделирование системы энергообеспечения здания и ее управления

Среди коммерческих библиотек:

- Smart Electric Drives. Моделирование гибридных электрических автомобилей.
- Vehicle Dynamics. Моделирования динамики автомобиля.
- Air Conditioning. Системы кондиционирования воздуха.
- Hydro Plant. ГЭС компоненты.

2. Создание модели системы с газовой турбиной

В этой главе будет рассмотрено создание системы с газовой турбиной с помощью Modelica. Более подробное описание и полные результаты исследования представлены в работе [2]. Здесь же приведены только основные моменты и рассуждения проекта по созданию модели турбины.

Вся система была разделена на несколько компонентов. Вот три основных: компрессор, турбина и камера сгорания. В ходе работы над моделью участники пользовались специальной библиотекой ThermoFlow. Эта библиотека была разработана на факультете автоматического управления университета Lund. Кстати, как и рассматриваемая модель системы с газовой турбиной.

2.1. Компрессор

Модель компрессора основана на общем уравнение для установившегося состояние потока. Таким образом, пренебрегая быстрыми динамическими процессам, заменяем их статическими отношениями. Такой подход используется, когда модель обладает как быстрой, так и медленной динамикой.

В модели компрессора используется компрессорная карта. Используя эту карту, политропная эффективность и поток массы могут быть рассчитаны в виде зависимости от перепада давления и скорости вращения ротора.

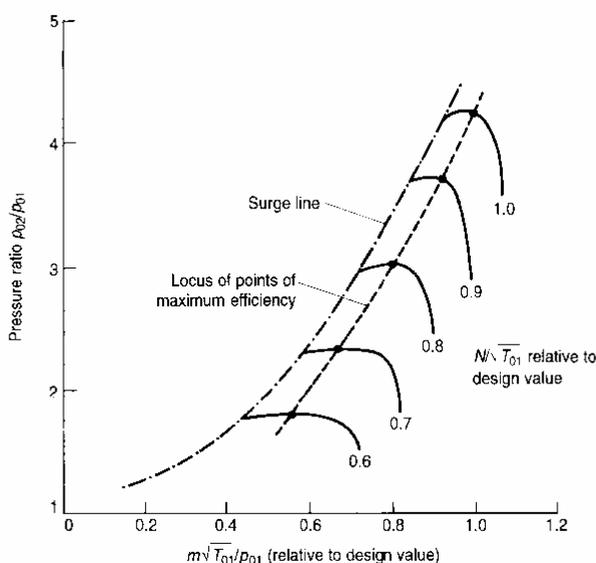


Рис. 3. Карта для центробежного компрессора

Модель компрессора включает уравнения и для механического поведения. Внутри модели механические и термодинамические силы связаны уравнениями.

2.2. Турбина

Модель турбины создается по такому же принципу, как и модель компрессора. То есть она также основана на уравнении для установившегося состояния и делаются те же допущения, что и при обсуждении компрессора. В случае компрессора, производитель предоставил карту для оценки потока массы и эффективности. Для турбин существуют также карты, но они имеют специальные характеристики. Типичная карта для турбины представлена на рисунке 4.

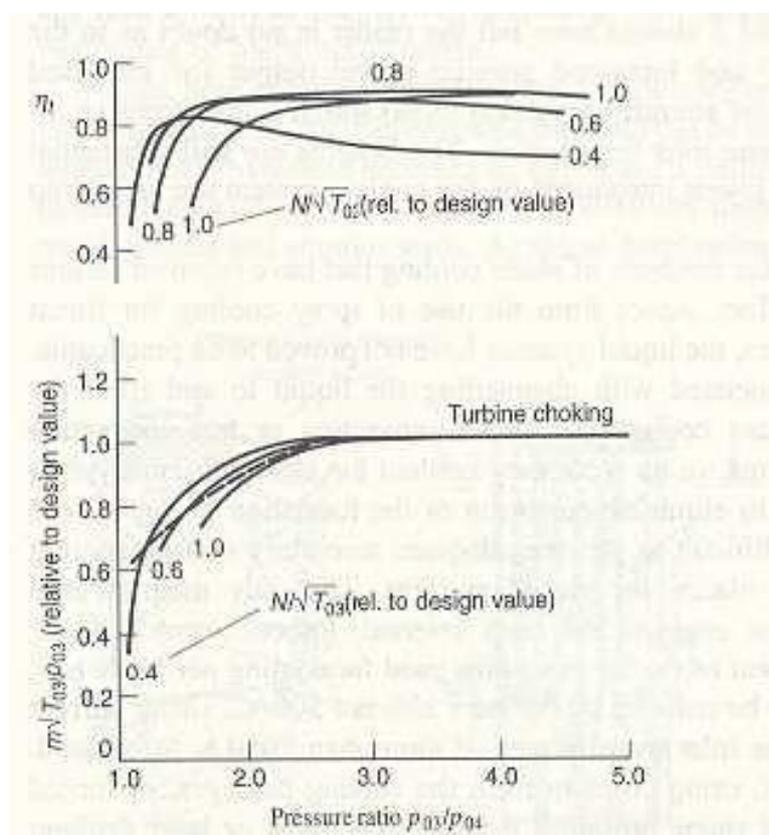


Рис. 4. Карты турбины

2.3. Камера сгорания

Преыдущие модели были ограничены: они были не реагирующими термодинамическими системами. Но для модели камеры сгорания должны быть приняты во внимание химические реакции. В не реагирующих системах используются

просто понятия полезной внутренней энергии (связанной с изменениями температуры и давления) и латентной внутренней энергии (связанной с изменениями фазы). Когда имеешь дело с реагирующими системами, необходимо рассматривать внутреннюю химическую энергию, которая связана с разрушением и образованием химических связей между атомами.

В процессе горения некоторые молекулы разрушаются, создавая другие молекулы с выделением большого количества энергии. Следовательно, энергетический и массовый балансы должны быть включены в химические уравнения процесса горения.

Процесс горения будет рассматриваться как мгновенный. Это довольно таки логичное предположение, так как переходные процессы, участвующих в горении происходят гораздо быстрее, чем все другие переходные процессы в системе. Вводятся некоторые дополнительные предположения:

- Кинетическая и потенциальная энергия не учитываются в энергетическом балансе.
- Эффективность камеры сгорания предполагается выражать в качестве постоянного параметра, то есть пользователь может выбрать нужное значение до запуска симуляции.
- Предположение о том, что газ обладает идеальными свойствами для всех компонентов, используется для расчета всех свойств газовой смеси.

Баланс массы и энергии рассчитываются при условии постоянного объема. Но для модели камеры сгорания массовый и энергетический балансы реализованы в качестве потоковой модели. Помимо уравнений для оценки массового и энергетического балансов, также необходимы уравнения для расчета соотношения между потоком массы и изменением давления. В модели камеры сгорания оцениваются потоки массы и энергии, которые затем используются для оценки балансов массы и энергии.

3. Тестирование модели с турбиной

В этой главе представлены две разные полные динамические модели турбин. Первая соответствует модели турбины, подключенной к гидравлическому тормозу без контроллера. Вторая модель включает в себя контроллер скорости, который сравнивает скорость вращения турбины с эталонной, и регулирует расход топлива с тем, чтобы поддерживать постоянную скорость.

3.1. Модель системы с гидравлическим тормозом

Модель показана на рисунке 5.

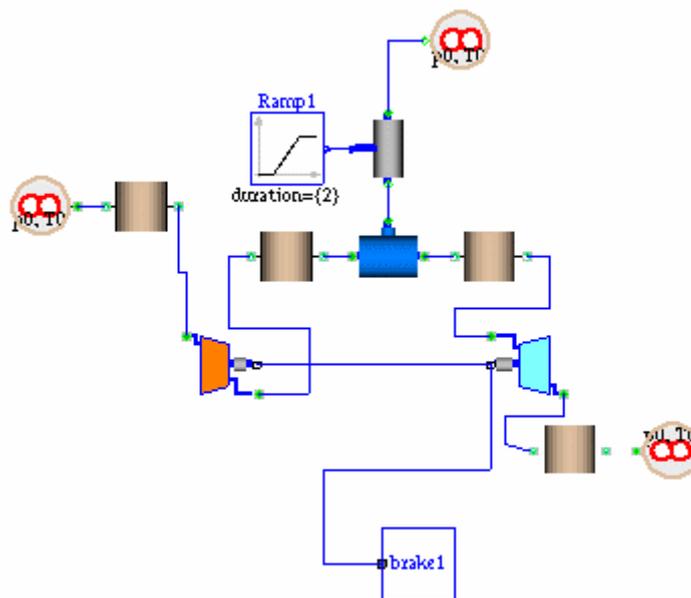


Рис. 5. Полная модель газовой турбины с открытым циклом

Для того чтобы определить условия окружающей среды, например температуры, давления, состава воздуха, необходимо было бы разработать модель среды. В библиотеке ThermoFlow термодинамические резервуары используются для этой цели. Резервуар рассматривается как постоянный объем бесконечных размеров, т.е. показатели состояния окружающей среды не меняются, когда происходит обмен энергией и массой. В модели турбины эти показатели состояния – это температура, давление и состав смеси газов CO₂, H₂O, N₂ и O₂. Данные показатели являются параметрами, которые могут быть изменены пользователем для каждой симуляции. Таким образом, можно с легкостью задать различные условия окружающей среды для

моделирования. Однако компрессор и турбина не связаны непосредственно с окружающей средой. Трубы и фильтры являются причиной падения давления между атмосферным давлением и давлением на входе компрессора и на выходе камеры сгорания. Для того чтобы принять это во внимание, к модели резервуара добавляется потоковая модель с простым уравнением снижения давления. Такая составная модель представляет из себя источник воздуха. Два таких источника используется в модели турбины: один расположен в начале цикла, то есть перед компрессором, и другой - в конце цикла, т.е. после турбины.

Другой резервуар используется для моделирования топливного бака. Его состояние характеризуют давление, температура и состав смеси газов CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 и CO_2 . Таким образом, можно составлять различные композиции природного газа для своих экспериментов.

Для того чтобы извлекать мощность, получаемую от турбины, необходима модель тормоза, рассеивающая энергию. Для этого была реализована модель гидравлического тормоза. Эта модель основана на связи между крутящим моментом и скоростью:

$$\tau = c_1 + c_2 \cdot n^2, \text{ где}$$

τ - крутящий момент,

n - скорость вращения,

c_1 и c_2 - параметры, которые задаются пользователем.

3.2. Модель системы с контроллером скорости

Вторая модель может использоваться для воспроизведения ситуации, которая ближе к фактическому использованию турбины на экспериментальном заводе. Эта модель очень похожа на предыдущую, но здесь модель тормоза заменена подачей крутящего момента на вход, который, например, может производиться генератором. Когда значение крутящего момент возрастает, скорость уменьшается. Значение скорости сравнивается с эталонной скоростью, и контроллер увеличивает подачу топлива с целью повышения скорости, пока не будет достигнуто устойчивое состояние. Модель PI-регулятора (Proportional-Integral регулятор) была взята из библиотеки Block. Полную модель можно увидеть на рисунке 6.

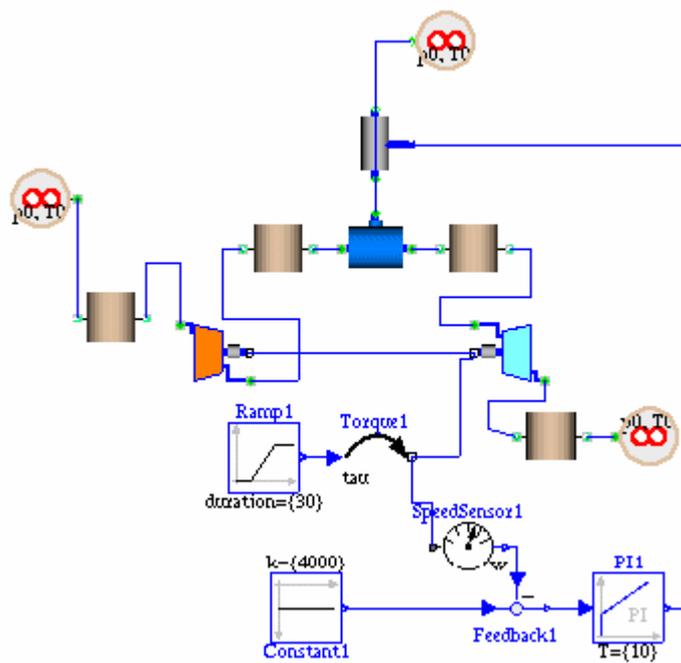


Рис. 6. Полная модель газовой турбины с регулятор скорости

4. Заключение

В этой главе представлены основные результаты и выводы по проделанной работе [2]. Вот они:

- Модель турбинной системы хорошо воспроизводит динамическое поведение реальной установки. Результаты, полученные при моделировании очень близки к результатам, полученным в экспериментах, проведенных на реальном устройстве. С другой стороны, отсутствуют данные для сравнения некоторых результатов, полученных при моделировании переходных процессов. Тем не менее, результаты были представлены работникам отдела теплоэнергетики, которые дали заключение о том, что результаты близки к реальным.
- Модель может быть повторно использована для различных устройств, путем изменения некоторых классов. Разработанная модель носит общий характер, за исключением деталей, связанных с компрессорной картой, и уравнений, используемых в модели турбины.
- Некоторые модели могут быть использованы в качестве новых компонентов библиотеки ThermoFlow, продолжая, таким образом, ее развитие.

Литература

- [1] Dynamic Modeling of Thermo-Fluid Systems. Автор: J.M. Jensen, 2003. 215 с.
- [2] Modeling of a Gas Turbine with Modelica. Автор: Antonio Alejandro Gomez Perez, 2001. 77 с.
- [3] A Thermo-Hydraulic Library in Modelica. Howto. Автор: Jonas Eborn, Hubertus Tummescheit & Falko Wagner, 2000. 14 с.

Дополнительные ссылки на материалы по Modelica на русском языке:

- [4] Сатья «Modelica» (из двух частей). Автор: Андрей Зубинский. Интернет-журнал «Компьютерное Обозрение». [Электронный ресурс]. Ссылки для доступа:
первая часть - http://ko.com.ua/modelica_34622, режим доступа свободный;
вторая часть - http://ko.com.ua/modelica_34904, режим доступа свободный.
- [5] Имитационное моделирование сложных динамических систем. Автор: Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. [Электронный ресурс]. Ссылка для доступа: http://www.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds_sim.asp, режим доступа свободный.