

КНИГИ ПРОЕКТА INMOTION

InMotion: «Новые стратегии обучения инженеров с использованием сред визуального моделирования и открытых учебных платформ»*

Сениченков Ю. Б.¹, Зупанчич Б.², Уркиа А.³

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

²Люблянский университет, Любляна, Словения

³Национальный университет дистанционного обучения, Мадрид, Испания



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

<http://www.inmotion-project.net/index.php/ru/>

Аннотация

Проект InMotion в качестве одной из целей ставит создание новых учебных курсов для будущих инженеров по математическому моделированию и компьютерным технологиям моделирования сложных динамических систем. Новые учебные курсы базируются на учебниках и задачниках, разработанных участниками проекта. В будущем книги станут свободно доступными студентам как на английском, так и на русском языках. В этой статье дается краткая характеристика проекта и приводятся тексты только введений к учебникам. Помимо учебников уже разработаны дистанционные курсы, которые по окончании проекта будут свободно распространяться в интернете. О самом проекте и первых впечатлениях от разработанных новых курсов читайте в следующей статье.

Ключевые слова: математическое и компьютерное моделирование, объектно-ориентированное моделирование, моделирование сложных динамических систем, Simulink, OpenModelica, SystemModeler, Rand Model Designer, ISMA.

Цитирование: Сениченков Ю. Б., Зупанчич Б., Уркиа А. Книги проекта InMotion. InMotion: «Новые стратегии обучения инженеров с использованием сред визуального моделирования и открытых учебных платформ» // Компьютерные инструменты в образовании. 2018. № 5. С. 52–68. doi:10.32603/2071-2340-2018-5-52-68

*Поддержка Европейской комиссией выпуска этой публикации не означает одобрения содержания, отражающего взгляды только авторов, и Комиссия не может нести ответственность за любое использование информации, содержащейся в ней.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проект InMotion объединил преподавателей, специалистов в области моделирования из Испании, Словении, Малайзии и России, решивших разработать новые инженерные учебные программы, учебники и дистанционные курсы для бакалавров и магистров в области компьютерного моделирования сложных динамических систем. Участников проекта объединяет также членство в Европейской Федерации Национальных Обществ Моделирования (EUROSIM — <https://www.eurosim.info/eurosim/>).

Практически во всех университетах, готовящих инженеров, традиционно преподавались и преподаются дисциплины, связанные с математическим и компьютерным моделированием, но чаще всего это специальные курсы, включающие в себя специальные приемы моделирования, востребованные в конкретной области, и специализированные среды моделирования. В результате появилось много учебников, где конспективно излагаются отдельные разделы математического моделирования и на пользовательском уровне обсуждаются возможности конкретной среды моделирования. Такие учебники быстро устаревают, так как решают задачи сегодняшнего дня — учат инженера конкретному приему моделирования и показывают, как его применить для решения конкретных задач в конкретной среде компьютерного моделирования.

Альтернативным подходом является изучение базовых курсов по математическому моделированию и языков моделирования для инженеров. Если такие курсы сопровождать задачами с набором прикладных задач, типичных для определенной области, то инженер получит фундаментальные знания и долгосрочные практические навыки компьютерного моделирования.

Знание основ математического моделирования является залогом успешного проектирования сложных технических объектов.

Проектирование и исследование сложных динамических систем с использованием математических моделей невозможно без современных компьютерных инструментов.

Объектно-ориентированный подход к моделированию сложных — иерархических, компонентных, событийно-управляемых систем с компонентами различной физической природы позволяет создавать, сопровождать и модифицировать структурно-сложные модели с разнообразными сценариями поведения, проектировать библиотеки моделей и стандартных компонентов для различных прикладных областей.

Каждая прикладная область имеет свои особенности и традиции компьютерного моделирования, специфические библиотеки, созданные для конкретной среды моделирования. Зная основы моделирования и базовые технологии компьютерного моделирования, легко справиться с любой специфической задачей.

Владение основами математического моделирования сложных динамических систем и универсальными методами компьютерного моделирования позволяет современному инженеру создавать модели технических устройств в любой области, выбирая наиболее подходящие языки и среды моделирования.

В процессе работы над проектом InMotion были написаны книги:

1. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого:

- Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. Математическое моделирование сложных динамических систем. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2019. 187 с.
- Ю. Б. Сениченков, Н. Б. Ампилова, Е. Л. Тимофеев. Математическое моделирование сложных динамических систем. Сборник заданий. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2018. 108 с.

- Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. Компонентное моделирование сложных динамических систем. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2019. 190 с.
 - Ю. Б. Сениченков. Компонентное моделирование сложных динамических систем. Задачник. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2018. 107 с.
2. Новосибирский государственный технический университет:
 - Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов. Основы моделирования событийно-непрерывных систем. НГТУ, 2018.
 3. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет:
 - К. В. Рождественский, В. А. Рыжов, Т. А. Федорова, К. С. Сафронов, Н. В. Тряскин. Компьютерное моделирование динамических систем с использованием среды Wolfram SystemModeler. СПбГМТУ, 2019.
 4. Университет города Любляны:
 - Maja Atansijević-Kunc, Saso Blăzič, Gašper Mušič, Borut Zupančič. Control — Oriented Modelling and simulation: methods and tools. Ljubljana, 2018.
 5. Национальный университет дистанционного образования:
 - Alfonso Urquía Moraleda, Carla Martín Villalba, Miguel Angel Rubio González, Victorino Sanz Prat. Simulation practice with Modelica. UNED, 2018.
 - Alfonso Urquía Moraleda, Carla Martín Villalba. Modeling and Simulation in Engineering using Modelica. UNED, 2018.

Книги зарубежных коллег написаны на английском языке и были переведены на русский язык.

2. КНИГИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АВТОРОВ

2.1. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Современные технические системы настолько сложны, что их производство требует компьютерной поддержки на каждом из этапов их разработки: проектирования, моделирования, создания и испытания опытного образца, выпуска серийных изделий, сопровождения готовой продукции.

Моделирование в производственном цикле играет одну из ключевых ролей.

Компьютерная модель будущего изделия используется для проведения различных испытаний, связанных как с проверкой соответствия поведения модели ожидаемому, так и с изучением и предсказанием свойств, которые потом должны будут быть подтверждены натурными экспериментами с опытным образцом.

Созданная компьютерная модель может быть в дальнейшем также использована как тренажер для обучения, если производство носит массовый характер и обслуживание изделий требует специальных знаний и навыков. Выгода от использования компьютерных моделей только возрастает, если предприятие постоянно модифицирует базовое устройство, наделяя его новыми свойствами или расширяя область применения. В этом случае новая компьютерная модель нового устройства создается в основном на базе уже существующих моделей из готовых библиотечных компонентов и относительно небольшого числа новых компонентов. Уникальные собственные библиотеки позволяют предприятиям существенно сокращать расходы на проектирование, опережать конкурентов. И, наконец, большие предприятия могут себе позволить использовать моделирование для поиска перспективных направлений развития, то есть для проведения научных работ своими силами.

Математическое моделирование давно используется в промышленности. Математические модели и их программные реализации, компьютерные испытательные стенды для тестирования и проведения компьютерных экспериментов, тренажеры для обучения начали широко использоваться уже в конце двадцатого столетия, но это была уникальная, дорогостоящая «ручная работа», выполняемая программистами высокой квалификации с использованием универсальных алгоритмических языков. Только в конце двадцатого века пришло понимание того, что моделирование — это новая инженерная фундаментальная дисциплина, требующая своей теории, своих инструментов, своих специальных языков, своих программных средств моделирования.

С появлением первой практической среды моделирования MATLAB началась новая эпоха математического моделирования. MATLAB предоставил пользователям язык, который упрощал описание моделей за счет использования векторно-матричных конструкций «высокого уровня», давал возможность использовать готовые решатели уравнений, скрывая детали их реализации, и визуализировать результаты вычислений с помощью встроенной двумерной и трехмерной графики. Можно было создать модели в виде нелинейных и линейных алгебраических уравнений, обыкновенных дифференциальных уравнений (макро-подход) и уравнений в частных производных (микро-подход). Одновременно развивался подход, связанный не с численными, а с «символьными» вычислениями. Например, среда Reduce предоставляла пользователям математический язык для описания уравнений, свою графику, но решала фактически те же уравнения, стараясь, прежде всего, найти решения в символьном виде, и, если это было невозможно, обращалась к численным методам. Современные аналоги Maple и Mathematica продолжили и усовершенствовали этот подход, но, что более важно для нас, создали и свои среды для моделирования — MapleSim и SystemModeler.

Не менее плодотворной оказалась идея «компонентного» моделирования. Технические системы редко можно представить в виде единого, не делимого на части устройства — обычно это устройство, состоящее из блоков (компонентов) и информационных связей между блоками. Блоки могут быть объединены управляющими, «направленными» связями, либо «физическими», когда связи подчиняются аналогам законов Кирхгофа, либо компоненты могут обмениваться «сигналами». Для моделирования таких компонентных устройств потребовались свои среды моделирования. В этих средах моделирования устройство создается из блоков (декомпозиция) и связей пользователем, и автоматически строится невидимая пользователю единая, «однокомпонентная» модель всего устройства (агрегация).

Для инженерного проектирования компонентных моделей «с сосредоточенными параметрами», моделей на основе макро-подхода (алгебро-дифференциальные уравнения с начальными условиями) были созданы среды моделирования Simulink (язык блок-схем, использующийся в теории управления, управляющие связи) и Dymola (язык моделирования Modelica, «физические» связи).

Компонентное моделирование дискретных систем на основе объектно-ориентированного подхода было реализовано с помощью языка UML (Unified Modeling Language). Помимо всего прочего, язык UML «узаконил», стандартизировал объектно-ориентированный подход и использование машин состояний для моделирования событийно-управляемых систем. Как оказалось, машины состояний можно использовать для описания не только дискретных, но и непрерывных событийно-управляемых динамических систем.

В результате на сегодняшний день инженеры могут воспользоваться средами MapleSim и SystemModeler, работать со средой «Simulink+Toolboxes» или, точнее, вос-

пользоваться технологией проектирования, поддерживаемой корпорацией MathWorks, могут использовать другие среды, с другими (объектно-ориентированными) технологиями — среды на базе языка Modelica, среду Ptolemy II, Rand Model Designer.

Выбор огромен: от сред специального назначения, до универсальных сред. Эти инструменты все шире используются на производстве, и о них нужно рассказывать студентам. При этом становится все более очевидным, что инженеров, прежде всего, нужно учить основам математического моделирования, а уж затем применению конкретных сред и языков моделирования. Математическое моделирование становится самостоятельной инженерной дисциплиной со своей теорией и широкой областью практического применения.

С методической точки зрения, представляется разумным начать изучение с однокомпонентных систем («Математическое моделирование сложных динамических систем»). Затем объяснить, как можно разбивать большие системы на компоненты, связывать их между собой и автоматически строить в итоге ту же однокомпонентную, но большую и трудно поддающуюся «ручному» анализу итоговую систему («Компонентное моделирование сложных систем»). Завершать обучение следует выполнением курсовой работы, ориентированной на решение конкретных прикладных задач с помощью современного востребованного промышленностью инструментария.

Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков

Математическое моделирование сложных динамических систем

Аннотация. Математическое моделирование широко применяется в современном производстве и требует хорошо подготовленных специалистов, способных

- создавать сложные модели с помощью сред моделирования,
- изучать их свойства, проводя вычислительные эксперименты,
- применять их для решения практических задач.

Одним из востребованных практикой типов моделей являются сложные динамические системы. Модели на основе обыкновенных дифференциальных и разностных уравнений давно используются при проектировании новых устройств, но если раньше моделированием занимались в основном математики, то теперь, с появлением компьютерных сред моделирования, проектированием на базе моделирования могут и должны заниматься инженеры.

За последние пятьдесят лет инженерное образование существенно изменилось и уже немислимо без таких базовых, фундаментальных, еще недавно традиционно математических дисциплин, как информатика, теория алгоритмов, вычислительная математика. Адаптация этих дисциплин для инженеров — дело не простое, и это хорошо видно на примере того же моделирования. Существуют прекрасные математические книги, посвященные различным разделам моделирования, но практически нет книг для инженеров. Аналогичная ситуация была в области вычислительных методов линейной алгебры, методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений и других разделов вычислительной математики в семидесятых годах прошлого столетия, пока не появились пакеты прикладных программ и вслед за ними сразу и книги для инженеров, написанные математиками. Достаточно вспомнить книги Дж. Форсайта, М. Малькольма, К. Моулера «Машинные методы математических вычислений», Дж. Райса «Матричные вычисления и математическое обеспечение» и другие, переведенные на русский язык издательством «МИР» в восьмидесятых годах прошлого столетия. Особенностью этих книг было то, что они учили не тому, как создавать, а тому, как правильно пользоваться

программными реализациями численных методов, опираясь на известные теоретические результаты.

Цель этой книги — рассказать инженерам об особом типе математических моделей — динамических системах, о методах исследования этих систем, их свойствах, возможности их исследования с помощью современных математических пакетов. Создавать и исследовать модели можно с помощью различных компьютерных сред, и делать это проще и результативнее, если владеешь основами теории.

Ю. Б. Сениченков, Н. Б. Ампилова, Е. Л. Тимофеев

Сборник заданий по курсу «Математическое моделирование сложных динамических систем». Компьютерные инструменты исследования динамических систем

Аннотация. Современные среды визуального моделирования предоставляют уникальные возможности для построения, отладки, тестирования и визуализации поведения моделей изучаемых объектов. Выразительность языков моделирования делает процесс построения и исследования моделей творческим и увлекательным. С построенными моделями можно экспериментировать, используя средства планирования, проведения и обработки результатов компьютерного эксперимента, автоматизирующие рутинные операции, и тем самым расширять круг учебных задач, помогающих быстрее и глубже освоить изучаемый материал. Разработка инструментов исследования сложных динамических систем, создание библиотек инструментов — важная научная задача, но при определенных упрощениях она становится и интересной учебной задачей.

Предлагаемая библиотека инструментов среды визуального моделирования Rand Model Designer (RMD) может быть использована как преподавателями при подготовке к занятиям, так и студентами при изучении курса «Математическое моделирование сложных динамических систем». Представленные инструменты позволяют визуализировать поведение динамических систем с помощью традиционных временных диаграмм и фазовых портретов, диаграмм Ламерея, сечений Пуанкаре, бифуркационных диаграмм. Благодаря специальным возможностям языка моделирования, можно, например, автоматически строить матрицу Якоби, находить ее собственные числа, влиять в пределах возможного на структуру решаемой системы, использовать и сравнивать различные численные методы. Выполнение учебного задания из рутинной процедуры превращается в исследование.

Предлагаемый задачник предполагает два варианта использования: «пассивный», когда студент, выполняя задание, использует готовые инструменты, и «активный», когда нужные инструменты создаются самостоятельно.

Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков

Компонентное моделирование сложных динамических систем

Аннотация. Представление сложной системы в виде компонентов и связей между ними — традиционный инженерный подход к проектированию больших систем. Такой подход применялся давно и привел к созданию различных графических языков компонентного моделирования, таких как язык блок-схем в теории управления, язык электрических и гидравлических цепей, механических систем задолго до появления современных сред компьютерного моделирования. Проектирование новой системы в докомпьютерную эпоху сводилось к «рисованию» нового устройства на графическом языке в ви-

де структурной схемы и либо сразу же к созданию реального прототипа, либо к ручному формированию уравнений, соответствующих схеме, то есть построению математической модели устройства, ее дальнейшему изучению и уж потом к построению реального прототипа.

Эти языки стали основой графических языков моделирования современных сред моделирования многокомпонентных систем. Использование графических языков упрощает создание модели на языке моделирования. Сейчас в большинстве случаев это объектно-ориентированный язык высокого уровня, позволяющий создавать иерархические многокомпонентные модели с событийно-управляемым поведением и переменной структурой.

Полезность и эффективность объектно-ориентированного подхода при изучении и проектировании многокомпонентных сложных динамических систем уже ни у кого не вызывает сомнения. Язык Unified Modeling Language стал практическим стандартом языков моделирования не только дискретных систем.

Сейчас можно говорить и о стандартизации типов компонентов, связях между ними и способах автоматического построения итоговых систем уравнений для многокомпонентных систем различного типа. Это либо компоненты с «входами-выходами», «контактами-потоками» или независимые компоненты-«агенты», обменивающиеся информацией по специальным «каналам» связей.

Все чаще ставится вопрос о создании языков проведения и обработки результатов вычислительного эксперимента. Таким образом, можно уже говорить о теоретических основах компонентного моделирования и способах практической реализации общих идей и методов в конкретных средах моделирования.

Авторы надеются, что книга будет полезна как практикам, строящим и использующим компьютерные модели, так и разработчикам, заинтересованным в стандартизации моделирования.

Книга сопровождается практикумом, ориентированным на решение общих задач с помощью различных сред компонентного моделирования.

Ю. Б. Сениченков

Компонентное моделирование сложных динамических систем. Задачник

Аннотация. Представление моделей больших систем в виде компонентов и связей между ними — это один из способов справиться с возрастающей сложностью моделей.

При создании компьютерной модели компоненты естественным образом представляются классами и их экземплярами. Унифицированный язык моделирования (Unified Modeling Language-UML) предлагает правила, позволяющие единообразно создавать и использовать классы и их экземпляры, применять механизмы наследования и полиморфизма при разработке новых моделей и модификации существующих.

Многие современные среды моделирования, например Rand Model Designer (RMD), опираются на UML как на стандарт. Разбивать исходный объект на компоненты и связывать компоненты между собой можно различными способами, используя «направленные» или «ненаправленные» связи или рассматривая компоненты как независимые «агенты», обменивающиеся между собой сообщениями.

В задачнике собраны учебные проекты, позволяющие

- 1) познакомиться с принципами объектно-ориентированного моделирования (ООМ),
- 2) научиться разрабатывать модели, состоящие из

- компонентов с «входами-выходами» (направленные или ориентированные связи), применяемых, например, в теории управления,
- компонентов с «контактами-потоками» (ненаправленные или неориентированные связи), используемых для «физического» моделирования,
- компонентов-агентов, хорошо подходящих, например, для задач массового обслуживания. Использование среды моделирования RMD при обучении технологиям моделирования позволяет не только получить навыки работы с ее собственными технологиями, но и познакомиться с технологией создания моделей в
 - пакете Matlab — RMD, который использует векторно-матричную форму представления уравнений, умеет решать линейные и нелинейные алгебраические уравнения, дифференциальные и алгебро-дифференциальные уравнения,
 - пакете SIMULINK, где существует специальная библиотека, имитирующая блоки пакета Simulink,
 - среде OpenModelica — RMD, которая заимствует и расширяет технологию «физического» моделирования языка Modelica.

В задачник включено приложение, в котором приведены подробные решения задач по всем разделам с использованием среды RMD.

Данная версия задачника ориентирована на применение среды визуального моделирования Rand Model Designer (www.mvstudium.com). Однако проект InMotion (<http://www.inmotion-project.net/index.php/ru/>) предполагает создание версий с использованием сред Simulink и OpenModelica.

2.2. Новосибирский государственный технический университет

Д. Н. Достовалов, Ю. В. Шорников

Основы моделирования событийно-непрерывных систем

Аннотация. Эффективными моделями для физических систем, взаимодействующих с программным обеспечением, или событийно-непрерывных систем являются неоднородные системы, включающие в себя непрерывные по времени подсистемы, взаимодействующие с дискретными событиями. Изначально сложилась терминология дискретно-непрерывных систем с хорошо развитым математическим аппаратом, но существенным ограничением на размерность при использованном аналоговом подходе. Обычно непрерывные части моделируются дифференциальными уравнениями, а дискретные события — с помощью конечных автоматов. Наиболее важный теоретический и практический вклад в событийно-непрерывные системы был внесен при создании теории систем, теории управления, инструментов анализа и др. Для того чтобы облегчить применение различных аналитических методов, разработан ряд программных продуктов (Charon, HyVisual, HyTech и т. д.) и инструментарий для эффективного цифрового анализа и обработки данных. Важные особенности реализации новых систем рассмотрены в работах Эспозито (J. М. Esposito). Именно профессору Эспозито удалось ввести новые парадигмы, такие как событийные функции. Они открыли новые цифровые методики анализа дискретно-непрерывных процессов. Появляется новая методология исследования событийно-непрерывных или комплексных систем.

При этом возникает потребность в разработке новых событийно-управляемых архитектур многоцелевого назначения, когда в одном режиме может одновременно произой-

ти несколько событий, и приходится решать нетривиальные задачи моделирования. Новая методология позволила снять «груз размерности», но добавились режимы с жесткостью. И здесь, кстати, профессор Е. А. Новиков получил важные научные результаты, рассматривая совершенно другие фундаментальные задачи. И если в работах Эспозито шаг интегрирования событийно-непрерывных систем традиционно управляется точностью и односторонностью событий, то в наших работах добавлены критерии устойчивости вычислений с учетом жесткости, а также учтена динамика событийной функции, что ускоряет алгоритм детекции. Следует отметить, что событийно-управляемые системы находят все большее практическое использование в разных совершенно не связанных областях. Это гетерогенное моделирование в живых системах, крупных энергосистемах и машиностроении, системах химической кинетики, химико-технологических системах и многих других приложениях. Книга написана в простой и доступной форме, поддержана необходимым теоретическим и практическим материалом и может принести несомненную помощь в изучении сложных событийно-непрерывных процессов.

2.3. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

К. В. Рождественский, В. А. Рыжов, Т. А. Федорова, К. С. Сафронов, Н. В. Тряскин
Компьютерное моделирование динамических систем с использованием пакета Wolfram SystemModeler

Введение. Учебное пособие посвящено введению в теорию динамических систем с использованием пакета Wolfram SystemModeler. Учебное пособие имеет практическую ориентацию и снабжено разбором решения большого числа задач механики и гидравлики. Оно предназначено для студентов старших курсов бакалавриата инженерных специальностей, интересующихся виртуальным моделированием. Предполагается, что студенты знакомы с теорией обыкновенных дифференциальных уравнений, основами численных методов и базовым курсом физики.

Основным объектом исследования в данном пособии являются непрерывные, гибридные и компонентные механические системы. На сравнительно простых примерах показано, что пакет SystemModeler предоставляет будущим инженерам и проектировщикам мощные средства для моделирования физических систем как на языке Modelica, так и с помощью обширной библиотеки готовых физических и логических компонентов.

Первая — теоретическая часть учебного пособия по теории моделирования динамических систем представлена в минимальном объеме и призвана познакомить читателя с теорией моделирования динамических систем. В данной части рассматриваются основные понятия моделирования, приводятся преимущества компьютерного моделирования и вычислительного эксперимента для решения инженерных задач. Также подробно разбирается классификация динамических систем, на конкретных физических задачах рассматриваются подходы при моделировании непрерывных, дискретных и гибридных систем и демонстрируются достоинства компонентного подхода как наиболее актуального в настоящее время.

Для более детального изучения теории моделирования динамических систем учебное пособие отсылает читателя к классическим учебникам и монографиям, количество которых весьма велико. В первой части учебного пособия рассматриваются общие вопросы математического моделирования различных процессов и систем, при этом особое внимание уделяется теории моделирования динамических систем.

В этой части представлены следующие разделы:

1. Основные понятия моделирования.
2. Классификация математических моделей.
3. Свойства математических/компьютерных моделей.
4. Вычислительный эксперимент (компьютерное моделирование).
5. Моделирование динамических систем: классификация моделей динамических систем; непрерывные, дискретные и гибридные системы.
6. Компонентный подход в моделировании динамических систем.

Вторая часть учебного пособия посвящена языку Modelica, на котором базируется пакет Wolfram SystemModeler. Язык Modelica — это объектно-ориентированный язык моделирования с открытым стандартом, служащий для построения сложных компонентных моделей. Modelica является мультидоменным языком, то есть позволяет создавать модели для любой предметной области. В данном учебном пособии рассматриваются возможности применения языка Modelica для инженерных задач.

Сначала читатель познакомится с принципами Modelica на сравнительно простых примерах построения динамических моделей как с непрерывным, так и с гибридным (дискретно-непрерывным) поведением. На данном этапе важным является наглядно продемонстрировать, какой тип модели подходит для конкретной физической задачи. Также делается акцент на понятие события, которое является одним из основополагающих в языке Modelica. Следующим шагом будет знакомство с иерархическим (компонентным) моделированием. Оно применяется для достаточно сложных моделей, которые требуется предварительно разбивать на более простые компоненты и далее описывать связи между компонентами. На примерах подобных моделей показаны преимущества интуитивно понятного интерфейса (drag-and-drop) SystemModeler, который существенно облегчает процесс создания модели.

Подробно показан процесс выполнения численного эксперимента с возможностью изменения параметров в реальном времени.

Третья часть учебного пособия дает представления о возможностях пакета Wolfram SystemModeler при использовании готовых библиотек компонентов, а также рассматривается создание собственных библиотек. В частности, ознакомившись с данным разделом, читатель легко научится использовать готовые библиотеки для различных предметных областей: механика, электричество, магнетизм, теплообмен, течение жидкостей, биохимические реакции.

Также на основе знаний, полученных во второй части данного учебного пособия, рассмотрены принципы построения пользовательских библиотек, при этом разбираются такие понятия объектно-ориентированного программирования, как наследование и инкапсуляция. На сравнительно простых примерах показано, что пакет SystemModeler предоставляет будущим инженерам и проектировщикам мощные средства для моделирования сложных систем как на языке Modelica, так и с помощью обширной библиотеки готовых физических и логических компонентов. Возможность создания пользовательских компонентов и библиотек, а также использование библиотек Modelica повышает эффективность работы.

Из дополнительных функций пакета Wolfram SystemModeler в пособии рассказывается, как осуществить визуализацию модели, включая трехмерную анимацию механических компонент. А возможность интеграции с Wolfram Mathematica обеспечивает тесную связь между фазами моделирования и инженерными расчетами по проекту.

Четвертая часть учебного пособия имеет практическую направленность и содержит большое число примеров по моделированию динамических задач механики и гидравлики в среде WSM.

Особое внимание в пособии уделяется моделированию гибридных, дискретно-непрерывных систем. Показано, что численные решатели SystemModeler определяют и обрабатывают разрывные данные в гибридных системах, поэтому симуляция переключателей, столкновений, переходных состояний происходит корректно. В добавлении к статическому моделированию систем пакет SystemModeler поддерживает динамическую симуляцию систем с возможностью пошаговой визуализации. К выгодным отличиям SystemModeler относится возможность охвата сразу нескольких разделов физики или других предметных областей. SystemModeler обеспечивает полностью символьное представление всех составляющих имитационного моделирования. Символьное описание позволяет создавать максимально гибкие модели. Эти возможности показаны в разделе, посвященном компонентному моделированию. Подробно разобраны примеры гидравлических систем с изменяющимся температурным режимом. Показано, что иерархические компонентно-ориентированные модели лучше отражают топологию реальных систем, проще для понимания и разработки, чем традиционные блок-схемы.

При разборе решения задач прослеживается последовательность:

1. Описание физического процесса или системы.
2. Построение математической модели процесса.
3. Пример постановки конкретной задачи с перечнем требуемых результатов.
4. Указания к построению компьютерной модели в пакете WSM.
5. Результаты численного эксперимента и их анализ.
6. Рассмотрение особенностей решения задачи в пакете WSM (если таковые есть).
7. Сравнение результатов компьютерного моделирования с аналитическими решениями (если возможно).
8. Выводы по выполнению компьютерного моделирования физического процесса или поведения технической системы.

3. ПЕРЕВОДНЫЕ КНИГИ

3.1. Национальный университет дистанционного образования

Alfonso Urquía Moraleda, Carla Martín Villalba
Modeling and Simulation in Engineering using Modelica

Альфонсо Уркиа, Карла Мартин-Вильяба
Моделирование на языке Modelica для инженеров

Книга была издана издательством Национального университета дистанционного образования в 2018 на английском языке для проекта InMotion. Распространяется бесплатно для студентов этого университета. С согласия авторов была переведена на русский язык проф. Ю. Б. Сениченковым. Книга используется студентами политехнического университета Петра Великого и Новосибирского государственного технического университете (обсуждается на семинарах, задачи из книги решаются в средах Dymola, OpenModelica на практических занятиях — есть отчеты студентов о выполненных лабораторных работах).

Предисловие авторов. Книга была написана в рамках международной деятельности Erasmus+ «InMotion»: «Новые стратегии обучения инженеров с использованием сред визуального моделирования и открытых учебных платформ», получившей финансовую поддержку Европейской комиссии, проект № 573751-ERP-1-2016-1-DE-ERPKA2-SVNE-JP, и предназначена бакалаврам и магистрам инженерных направлений, интересующимся компьютерным моделированием, физикой и численными методами. Методология моделирования, особенности языка Modelica, использование среды моделирования объясняются на примерах. Такой стиль позволяет использовать эту книгу для самостоятельного изучения студентами, которые сами формулируют для себя цели и задачи обучения, сами создают и реализуют проекты. Мы рекомендуем всем читателям установить среду моделирования на базе языка Modelica и самостоятельно воспроизвести с ее помощью модели, обсуждаемые в этой книге.

Книга разделена на три части: создание непрерывных моделей; компьютерные эксперименты с непрерывными моделями; создание и исследование гибридных моделей.

Методология и особенности языка Modelica для создания моделей с непрерывным временем представлены в первой части книги. Первый урок посвящен методологии моделирования, называемой объектно-ориентированным моделированием и поддерживаемой языком Modelica. Язык Modelica для описания моделей с непрерывным временем использует событийно-управляемые (гибридные) алгебро-дифференциальные уравнения. Им также посвящена часть первого урока, как и вводному описанию сред моделирования Dymola и OpenModelica. На уроках 2 и 3 обсуждаются основные типы моделей и библиотеки моделей, используемые в языке Modelica.

Математическая строгость не столь важна для нас по сравнению с простотой, ясностью и понятностью изложения. Наша цель — снабдить пользователя минимально необходимыми знаниями для понимания сути сообщений, появляющихся при трансляции и исполнении моделей в среде моделирования (а именно, в средах Dymola and OpenModelica).

Обсуждается широкий спектр вопросов: создание вычислительно корректной модели, понижение индекса алгебро-дифференциальных уравнений, выбор начальных условий для алгебро-дифференциальных уравнений, выбор переменных состояния, численные методы решения алгебро-дифференциальных уравнений. Среды визуального моделирования, основанные на языке Modelica, анализируют уравнения, производят их символичные преобразования — это обсуждается на уроках 4 и 5. Численным методам посвящен урок 6.

Третья часть книги посвящена моделированию событийно-управляемых (гибридных) систем с помощью языка Modelica. Особенности языка, связанные с различными типами событий: событиями, привязанными к конкретному моменту времени или к конкретным значениям переменных состояния, приводящим к изменению уравнений модели по ходу исполнения, — продемонстрированы на примерах. Обсуждаются численные методы, позволяющие локализовать точки переключения уравнений моделей. И здесь отдается предпочтение ясности и простоте, а не математической строгости изложения. Мы хотим дать пользователю минимально необходимые сведения, связанные с описанием событий, приводящих к смене поведения. Наша цель — не объяснить, как устроена и работает среда моделирования, а объяснить, как разрабатывать и использовать модели, чтобы моделирование было эффективным и не приводило к ошибкам.

Книга сопровождается задачиком (переводится).

Alfonso Urquía Moraleda, Carla Martín Villalba, Miguel Angel Rubio González, Victorino Sanz Prat

Simulation practice with Modelica

Альфонсо Уркия, Карла Мартин-Вильяба, Мигель Анжел Рубио Гонзалес, Викторино Санз Прад

Практика моделирования на языке Modelica

Предисловие. Построение компьютерных моделей динамических систем и их численное исследование находит широкое применение в инженерном деле, играя важнейшую роль в проектировании, анализе, управлении и оптимизации технических систем. Компьютерное моделирование, в основе которого лежат математические модели, часто применяется в системах поддержки принятия решений и компьютерных тренажерах.

Так как компьютерные модели становятся все больше и сложнее, то и влияние методологий и сред моделирования на стоимость проекта становится все более очевидным. Сложные компьютерные проекты обычно требуют коллективного труда. Отсюда вытекает, что технологии и среды моделирования должны позволять распределять работу между членами коллектива так, чтобы они могли работать независимо. Объектно-ориентированная технология моделирования удовлетворяет этому требованию.

Язык Modelica — это язык моделирования, созданный для поддержки объектно-ориентированного моделирования кибер-физических систем, компоненты которых имеют различную физическую природу (электрические, механические, тепловые, химические компоненты, элементы систем управления). Для компонентной модели строится итоговая система уравнений (ее называют гибридной системой алгебро-дифференциальных уравнений), состоящая из дифференциальных и алгебраических уравнений, меняющихся под воздействием событий.

Язык Modelica — это свободно распространяемый язык моделирования, созданный некоммерческой ассоциацией Modelica, позволяющий обмениваться моделями между разработчиками и использовать различные среды для моделирования. На сайте ассоциации www.modelica.org, хранятся документы, посвященные языку (статьи, руководства пользователей, книги и многое другое), а также ссылки на свободные и коммерческие библиотеки моделей. Мы приглашаем читателей этой книги посетить сайт Modelica и узнать много интересного.

Как видно из названия книги, наша цель познакомить читателя с практическими аспектами моделирования на языке Modelica. Мы предлагаем читателям выполнить самостоятельно набор независимых постепенно усложняющихся задач.

Каждое задание содержит описание системы и математическую модель, воспроизводящую ее поведение. Чаще всего предлагается только записать эту модель на языке Modelica и построить численное решение. Часть заданий предусматривает построение только уравнений модели, без учета ее компонентной структуры. Другие предполагают использование библиотеки компонентов для построения модели.

Тринадцать заданий этой книги имеют единую структуру: описание системы, текст задания и решение. Читателю предлагается сначала построить модель самому с помощью среды, понимающей язык Modelica, а затем сравнить свое решение с приведенным в книге. Перед выполнением задания мы предлагаем прочесть книгу «Моделирование для инженеров с помощью языка Modelica» Альфонсо Уркия и Карлы Мартин, изданную университетом UNED в 2018 году. Эта книга посвящена теории моделирования и содержит все необходимые сведения для выполнения предлагаемых заданий.

3.2. Университет города Любляны

Maja Atansijević-Kunc, Săso Blăzič, Gašper Mušič, Borut Zupančič

Control – Oriented Modelling and simulation: methods and tools

Майя Атанасиевич-Кунц, Сашо Блажич, Гашпер Мушич, Борут Зупанич

Компьютерное моделирование в теории автоматического управления: методы и средства

Введение. Моделирование и вычислительный эксперимент давно применяются в теории автоматического управления (ТАУ). При проектировании сложной системы управления разработка соответствующей математической модели и проведение с ней вычислительных экспериментов на компьютере приносит ощутимую пользу и является причиной высокой добавленной стоимости конечного продукта. Кроме того, моделирование и вычислительный эксперимент также могут эффективно применяться в процессе проектирования и оценки корректности алгоритмов управления. Хотя существует множество сложных методов проектирования, опирающихся на строгую теорию, большинство инженерных подходов всегда были основаны на вычислительных экспериментах с моделями. Кроме вышеупомянутых областей, моделирование и вычислительный эксперимент могут эффективно применяться в некоторых других областях, прямо не относящихся к проектированию систем автоматического управления: для безопасного запуска и остановки технологических процессов на промышленных предприятиях, для обучения и поддержки принятия решений операторами и во многих других случаях. Широкая информатизация систем создаёт новые трудно решаемые проблемы, связанные с анализом и проектированием систем, характеризующихся, в частности, дискретно-событийным поведением. Моделирование и вычислительный эксперимент могут быть использованы для решения этих задач. Как мы не можем представить себе проектирование систем автоматического управления без моделирования и вычислительных экспериментов, так мы не можем представить себе моделирование и проведение вычислительного эксперимента без мощных программных средств. Хорошо известно, что Matlab вместе с Simulink — набором инструментов для проведения вычислительного эксперимента — и многими другими наборами инструментов является наиболее используемой средой моделирования, особенно в академической сфере. Также это программное средство находит всё большее и большее применение и в промышленных компаниях.

Поэтому основная цель книги заключается в знакомстве читателя с некоторыми интересными и важными областями теории управления (автоматизации), которые неизбежно связаны с компьютерным моделированием и вычислительным экспериментом (КМВЭ), а также в ознакомлении читателя с методологией решения задач с использованием Matlab и Simulink на множественных примерах. В первой главе вводятся наиболее часто используемые типы моделей. Сначала даются два обобщённых класса моделей, а именно параметрические и непараметрические модели. Основное внимание уделено описаниям, которые обычно применяются при анализе и проектировании систем управления — дифференциальным уравнениям, передаточным функциям и описанию в пространстве состояний.

Вторая часть главы посвящена расширению Control System Toolbox, практически незаменимому при описании математических моделей в среде Matlab, во время анализа, а также при проектировании систем управления для динамических систем. Вторая глава посвящена вычислительному эксперименту. Представлены базовые подходы к

преобразованию математических моделей в расчётные модели (программы, схемы, диаграммы). Кратко вводится понятие цифрового моделирования: преобразование параллельных структур в последовательные, численное интегрирование и сортировка уравнений модели. В этой главе осуществляется введение в Simulink, инструментальный набор Matlab для проведения вычислительных экспериментов, который может значительно облегчить жизнь пользователю при работе с математическими моделями динамических систем. Три важных типа вычислительного эксперимента с моделью — параметрическое исследование, оптимизация и линеаризация — проиллюстрированы несколькими примерами. Эксперименты этих типов очень часто применяются во время разработки модели, а также при проектировании систем управления.

В третьей главе особое внимание уделяется применению моделирования при управлении динамическими системами, или, точнее, при экспериментальном моделировании, которое также называется идентификацией систем. Целью идентификации является определение модели системы на основе имеющихся данных измерений. В книге рассматриваются только методы параметрической идентификации линейных стационарных систем. Метод Strejc основан на возмущении системы тестовыми ступенчатыми сигналами. Он очень прост, но и подходит только для относительно узкого класса объектов управления. Методы подгонки моделей основаны на оптимизационных процедурах. Основная часть главы посвящена идентификации систем на основе линейной регрессии. Основная идея в этом случае аналогична методам подгонки моделей, но не включает в себя применение методов оптимизации и связанных с этим сложностей. Оценки параметров получают аналитическим решением систем линейных уравнений. Из-за своей простоты и гибкости этот подход очень часто применяется на практике.

Четвёртая глава представляет собой вводную главу в системы автоматического управления. В ней рассматриваются базовые понятия теории автоматического управления: вводятся разомкнутые и замкнутые системы автоматического управления, управление в рабочей точке, режим слежения за входом и управление по возмущению, установившийся режим и устойчивость систем автоматического управления.

В пятой главе кратко описываются наиболее используемые промышленные алгоритмы управления. Сначала даётся расширенная структурная схема системы автоматического управления. Затем вводятся типы промышленных регуляторов. Особое внимание уделяется непрерывным пропорционально интегрально-дифференцирующим (ПИД-) регуляторам. Роль всех звеньев объясняется и иллюстрируется на множественных примерах в средах MatlabSimulink и Dymola-Modelica. Обсуждаются сложности, связанные с реализацией дифференцирующего звена. В качестве методов конструирования (настройки) регуляторов представлены и проиллюстрированы несколькими примерами правила настройки (метод настройки Ziegler-Nichols по разомкнутой системе, метод настройки Ziegler-Nichols по замкнутой системе, также известный как метод колебаний, метод Chien-Hrones-Reswick) и средства компьютерной оптимизации. Глава завершается демонстрацией того, как можно эффективно реализовать ПИД-регулятор с помощью цифрового алгоритма. На двух примерах показана эффективность сред Matlab-Simulink и DymolaModelica при реализации дискретного ПИ-управления угловой скоростью электродвигателя.

Шестая глава включает введение в дискретно-событийные системы и методы их моделирования. В отличие от по большей части непрерывных систем, описанных в предыдущих главах, многие созданные человеком системы, включая системы автоматического управления, демонстрируют поведение, заключающееся в мгновенных

изменениях значений переменных (наличие разрывов), связанных с возникновением некоторых событий. Примерами таких систем являются производственные и сборочные линии в промышленных учреждениях, наземные, водные и воздушные транспортные системы, военные системы принятия решений и управления войсками, а также компьютерные системы и цифровые коммуникационные сети. При всеобщей информатизации важность этих систем возрастает, а поэтому и возрастает необходимость в подходящих инструментальных средствах для анализа и проектирования. Инструментальные средства для дискретно-событийного моделирования могут использоваться на многих стадиях анализа и проектирования систем, улучшая понимание функционирования дискретно-событийных систем и упрощая их построение, оптимизацию и управление ими. Глава включает введение в дискретно-событийные системы и связанные с ними разделы теории вероятностей, а также представляет различные подходы к проведению вычислительного эксперимента с дискретно-событийными системами (планирование событий, сканирование на предмет событий, процессно-ориентированный подход). В последней части главы рассматриваются системы массового обслуживания и осуществляется знакомство с библиотекой SimEvents системы Matlab, а также приведены соответствующие эксперименты с моделями.

Поступила в редакцию 17.08.2018, окончательный вариант — 20.09.2018.

Computer tools in education, 2018

№ 5: 52–68

<http://ipo.spb.ru/journal>

doi:10.32603/2071-2340-2018-5-52-68

BOOKS OF THE INMOTION PROJECT

InMotion: “New Engineer Learning Strategies Using Visual Modeling Environments and Open Learning Platforms ”

Senichenkov Yu. B.¹, Zupančič B.¹, Urquía A.³

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

²University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia

³Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid, Spain

Abstract

The InMotion project sets as one of its goals the creation of new training courses for future engineers in mathematical modeling and computer technologies for modeling complex dynamic systems. New courses are based on textbooks and books of problems developed by project participants. In the future, books will be freely available to students in both English and Russian. This article provides a brief description of the project and presents the original introductions to the books. In addition to textbooks, eLearning courses have already been developed, which at the end of the project will be freely distributed on the Internet. Details on the project itself and the first impressions of the new courses developed will be presented in a future article.

Keywords: *mathematical and computer modeling, object-oriented modeling, modeling of complex dynamical systems, Simulink, OpenModelica, SystemModeler, Rand Model Designer, ISMA.*

Citation: Yu. B. Senichenkov, B. Zupančič, and Urquía A., "Books of the InMotion Project InMotion: "New Engineer Learning Strategies using visual modeling environments and open learning platforms", *Computer tools in education*, no. 5, pp. 52–68, 2018 (in Russian). doi:10.32603/2071-2340-2018-5-52-68

Received 17.08.2018, the final version — 20.09.2018.

Yuriy B. Senichenkov, St. Petersburg Peter the Great Polytechnic University, Institute of Computer Science and Technology, Professor, doctor of science; 194021 Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya st., 21, ICST, senyb@dcn.icc.spbstu.ru

Borut Zupančič, PhD, professor at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, borut.zupancic@fe.uni-lj.si

Alfonso Urquía, Departamento de Informática y Automática, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Juan del Rosal 16, 28040 Madrid, Spain aurquia@dia.uned.es

Сениченков Юрий Борисович,
доктор технических наук, профессор
высшей школы «Программная инженерия»
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого;
194021 Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д. 21, ВШ ИКНИТ,
senyb@dcn.icc.spbstu.ru

Зупанчич Борут,
профессор электротехнического
факультета Люблянского университета,
borut.zupancic@fe.uni-lj.si

Уркиа Альфонсо,
Факультет информатики и автоматике,
Национальный университет
дистанционного обучения, Мадрид,
Испания,
aurquia@dia.uned.es

© Наши авторы, 2018.
Our authors, 2018.