

**О ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРОВ В ОБЛАСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.
ПРОЕКТ INMOTION.**

**Ю.Б. Сениченков, В.А. Рыжов, Соколов Б.В. (Санкт-Петербург),
Шорников Ю.В., (Новосибирск).**

Компьютеры и образование уже давно неразрывно связаны, однако сейчас для любого компонента реального учебного процесса можно найти его компьютерные прототипы: натуральный эксперимент – вычислительный эксперимент, лабораторная работа с реальным оборудованием – лабораторная работа с виртуальной моделью реального объекта, традиционный учебник – его электронный вариант, лекции и семинары в аудитории – живые или записанные лекции в различных сетях, компьютерные видео-конференции. Они прекрасно сосуществуют, их достоинства и недостатки широко обсуждаются. То же самое можно сказать и о компьютерной поддержке процесса обучения – составлении расписания, формирования учебных планов, форм проведения экзаменов, тестирования. Появилась своя, особая разновидность программного обеспечения для поддержки учебного процесса, и все его участники должны обладать специальными знаниями, чтобы уметь им пользоваться и эффективно применять.

Проект InMotion (<http://www.inmotion-project.net/index.php/ru/>) 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. Участники проекта также сотрудничают с Европейской Федерацией 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 языкам и технологиям моделирования для инженеров. Если для таких курсов разработать задачками 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.

Проект InMotion ставил своей целью:

- 1) предложить новые учебные планы подготовки инженеров в области компьютерного моделирования;
- 2) создать новые учебники и задачки, как в традиционном, так и электронном виде;
- 3) научиться эффективно использовать электронные версии учебников, виртуальные лаборатории, видео-уроки, системы поддержки курсов для традиционных учебных курсов;
- 4) разработать электронные версии курсов для заочного изучения визуальных сред моделирования и различных технологий моделирования.

Работа над проектом началась с выбора сред визуального моделирования, которые рекомендуется использовать в учебном процессе в качестве базовых. В идеале хотелось бы выбрать одну среду для бакалавров, углубленно изучать любые другие среды, нужные для прикладных областей, в магистратуре, и учить модифицировать и разрабатывать новые среды и прикладные библиотеки аспирантов. На сегодняшний день нашему коллективу выбрать такую базовую среду не удалось. В университете Любляны изучают Matlab-Simulink [6-7], в Мадриде – среды OpenModelica и Dymola [4-5], использующие язык Modelica, в политехническом университете Санкт-Петербурга – среду Rand Model Designer, с языком моделирования чрезвычайно близким к языку Modelica [8-11], в Новосибирске разработана своя среда моделирования ISMA [12], а в Морском Техническом университете Санкт-Петербурга учат и используют среду Wolfram SystemModeler, также основанную на языке Modelica [1-3]. Даже этот список показывает, что студенты должны быть знакомы с объектно-ориентированным подходом как в программировании, так и в моделировании, желательно знакомство с языком UML и конечными автоматами, если он хотят научиться применять такие языки моделирования, как Modelica. С точки зрения математики и численного анализа, требуется знание методов решения линейных и нелинейных алгебраических уравнений, систем обыкновенных дифференциальных и разностных уравнений, систем алгебро-дифференциальных уравнений, знакомство с алгоритмами на графах и основами символьных вычислений.

Согласование разделов курсов, поддерживающих компьютерное моделирование, процесс сложный, определяется многими факторами, в том числе и субъективными, но на счастье российских участников проекта - математика, численный анализ, информатика, теория алгоритмов и автоматов читаются у них на одном уровне. Следует заметить, что это счастливое совпадение скорее всего определялось российской системой образования. Во время работы над проектом InMotion, в Санкт-Петербургском политехническом университете, для иностранных студентов (бакалавров и магистров) проводились Летние школы, где апробировались новые подходы. Заключительные опросы студентов с одной стороны показали, что студентам (Испания, Словения, Германия, Китай) интересно изучать компьютерное моделирование, но их базовая подготовка очень сильно различается. Этого следует ожидать и для других российских университетов, отличных от «политеха», «корабелки», и новосибирского политехнического университета.

В качестве базового учебника по математическому моделированию была предложена книга Ю.Б. Колесова и Ю.Б. Сениченкова [10].

Математическое моделирование сложных динамических систем.

Введение.

Глава 1. Математическое моделирование как инструмент познания и проектирования.

Математические модели. Модели на основе обыкновенных дифференциальных и разностных уравнений. Математические модели на основе уравнений в частных производных. Вычислительный эксперимент.

Глава 2. Динамические системы.

Дискретные и непрерывные динамические системы. Динамические системы на прямой и на плоскости, качественный анализ. Линейные системы и их классификация на основе собственных чисел. Нелинейные системы.

Глава 3. Устойчивость.

Устойчивость динамических систем. Теоремы Ляпунова об устойчивости. Устойчивость на основе линеаризации.

Глава 4. Гибридные системы.

Гибридное время. Гибридные автоматы. Особые режимы работы гибридных систем: эффект Зенона, режим скольжения.

Глава 5. Введение в теорию колебаний

Предельные циклы. Сечения Пуанкаре

Глава 6. Бифуркации

Дискретные и непрерывные системы. Бифуркационные диаграммы. Диаграммы Ламерея. Странные аттракторы.

Глава 7. Марковские цепи.

Непрерывные и дискретные цепи. Уравнения Марковских цепей.

Глава 8. Проведение вычислительного эксперимента.

Примеры вычислительных экспериментов в Rand Model Designer.

Литература.

Книга Шорникова Ю. В., Достовалова Д. Н. «Основы моделирования событийно-управляемых систем» [12] более углубленно представляет студентам событийно-управляемые системы, особый класс дискретно-непрерывных систем, рассказывает о новых методах локализации событий, знакомит с численными методами, предложенных профессором Е. А. Новиковым, и может рассматриваться как дополнительные главы учебника по математическому моделированию, например, для магистров и аспирантов.

Таким же дополнением основного курса по математическому моделированию может служить и книга Майи Атанасиевич-Кунц, Сашо Блажича, Гашпера Мушича, и Борута Запанича [6], особенно, если программа обучения в конкретном университете не предусматривает курса по теории управления.

«Компьютерное моделирование в теории автоматического управления: методы и средства».

Введение.

Представление моделей.

Вычислительный эксперимент.

Моделирование в теории управления.

Теоретическое моделирование и идентификация систем: теоретическое моделирование, идентификация, сравнение теоретического моделирования и идентификации, этапы процесса идентификации.

Идентификационные модели.

Идентификация параметров модели методом Strejc: идентификация статических процессов, идентификация астатических процессов.

Методы подгонки моделей.

Оценка параметров с помощью метода наименьших квадратов: скалярная задача, векторная задача, оценка параметров систем с дискретным временем.

Основные понятия теории управления.

Разомкнутая система математического управления.

Замкнутая система управления.

Система автоматического управления в рабочей точке.

Режим слежения за входом.

Управление по возмущению.

Статический режим системы управления.

Устойчивость системы автоматического управления.

Промышленные алгоритмы управления.

Типы промышленных регуляторов.

Непрерывные регуляторы: пропорциональные, пропорционально-интегрирующие, регуляторы с дифференцирующим звеном.

Проектирование непрерывных ПИД-регуляторов: правила настройки, компьютерная оптимизация.

Реализация ПИД-Регуляторов.

Дискретно-событийное моделирование.

Дискретно-событийные системы: события и случайные величины, случайные процессы.

Методы проведения вычислительного эксперимента с дискретно-событийной моделью: схема событийного перехода, схема сканирования активностей, схема процессно-ориентированного подхода.

Системы массового обслуживания и Simulink-SimEvents: очереди и обслуживающие приборы, генерация событий и сущностей, показатели качества.

Литература.

Предлагаемые разделы курсов и отдельные темы являются только примером, и требуют обсуждения. Они позволяют сформировать список дисциплин по выбору, а часть вопросов целесообразно спустить на уровень ниже, и перенести их в соответствующие разделы математики, информатики, теории алгоритмов.

Вторая группа книг посвящена собственно компьютерным технологиям моделирования и конкретным средам моделирования.

В качестве базового учебника по технологиям компьютерного моделирования была предложена книга Ю.Б. Колесова и Ю.Б. Сениченкова [11].

Компонентное моделирование сложных динамических систем.

Введение.

Глава 1. Объектно-ориентированное моделирование динамических систем.

Активный динамический объект. Наследование классов. Пакеты и модель. Пример вычислительного эксперимента.

Глава 2. Математические модели компонентной системы.

Алгебраические уравнения. Дифференциальные уравнения. Алгебро-дифференциальные уравнения. Канонические формы. Системы нелинейных алгебро-дифференциальных уравнений. Понятие индекса. Понижение индекса.

Глава 3. Моделирование многокомпонентных систем. Компоненты с входами-выходами

Декомпозиция на блоки. Пакет «Управление».

Глава 4. Моделирование многокомпонентных систем. Компоненты с контактами-потоками «Физическое» моделирование в RMD. Модель системы регулирования скорости вращения вентилятора. Модель простой гидравлической системы. Электрические цепи.

Глава 5. Системы переменной структуры

Моделирование систем массового обслуживания в RMD. Как работают стандартные классы. Модель банковского офиса.

Глава 6. Вычислительный эксперимент.

Управление вычислительным экспериментом. Получение параметрической зависимости. Параметрическая оптимизация. Стохастический эксперимент.

Литература.

Книга А. Уркия, Карла Мартин Вилльяба. «Компьютерное моделирование на языке Modelica для инженеров» [4] служит введением в объектно-ориентированное моделирование на языке Modelica.

Введение

Непрерывные модели: методология моделирования и среды моделирования, изолированная непрерывная система, библиотеки моделей.

Моделирование непрерывных систем: вычислительная схема модели, индекс и инициализация АДУ, численные методы.

Моделирование гибридных систем: описание гибридных систем, локализация и обработка событий, практика моделирования гибридных систем.

Литература.

Как видно из оглавления, две трети книги посвящены введению в алгебро-дифференциальные уравнения и численные методы, а также гибридным системам. Работа над проектом шла параллельно, и избежать дублирования было практически не реально – часть материала, относящаяся к математическому моделированию и численным методам, также рассматривается и в других книгах проекта, но это еще раз подтверждает, что научить сегодня инженера эффективно использовать современные среды моделирования невозможно без пересмотра учебных планов и модификации базовых инженерных курсов.

Книга Майи Атанасиевич-Кунц, Сашо Блажича, Гашпера Мушича, и Борута Запанича «Моделирование в средах Matlab и Simulink [8], опираясь на книгу [7], учит студентов решать практические задачи в указанных средах.

Особо следует отметить серию книг [1-3], преподавателей морского университета СПбГМТУ. Инженерам хорошо известны математические пакеты Maple и Mathematica, и то, что их разработчики практически одновременно создали свои среды моделирования MapleSim (<https://www.maplesoft.com/products/maplesim/>) и SystemModeler (<https://www.wolfram.com/system-modeler/>), говорит о многом. Мощная компьютерная математика в сочетании с графическими языками для моделирования многокомпонентных систем открывает большие перспективы. Авторы учебника пишут:

«В учебнике в качестве инструмента, позволяющего провести компьютерное моделирование, рассматривается программная среда Wolfram SystemModeler. Сделан обзор функциональности пакета, приводятся его отличительные особенности по сравнению с другими пакетами компьютерной математики, рассматриваются возможности пакета применительно к решению инженерных задач механики.

Wolfram SystemModeler – это интерактивная графическая среда, предназначенная для математического и компьютерного моделирования многомерных систем с использованием языка Modelica.

Wolfram SystemModeler позволяет пользователю создавать модели систем как самостоятельно, так и с помощью обширной библиотеки физических и логических компонентов. Возможность интеграции с пакетом Mathematica [49] позволяет улучшать визуализацию процессов при решении сложных инженерных задач, а также подкреплять виртуальное моделирование дополнительными математическими расчетами.

Говоря о функциональных возможностях SystemModeler можно отметить следующие:

- подход drag-and-drop при моделировании сложных систем;
- использование в основе моделирования объектно-ориентированного языка Modelica;
- управление вычислительными экспериментами в интерактивной среде Simulation Center, использующей язык Wolfram Language;
- легко реализуемая анимация;
- текстовый пользовательский интерфейс для моделирования динамических систем и их анализа на основе дифференциальных и алгебро-дифференциальных уравнений;
- неказуальное (компонентно-ориентированное) и казуальное (блочно-ориентированное) моделирование;
- 3D моделирование, включающее в себя: 2D и 3D моделирование механических систем, электрических процессов, гидравлических систем, термодинамических процессов, энергетических компонент, компонент систем управления и др.;
- частотный анализ, анализ чувствительности, анализ надежности созданной системы;
- интеграция с пакетом Mathematica для анализа и хранения созданных моделей.

При создании моделей в среде Wolfram SystemModeler используется Modelica – свободно распространяемый объектно-ориентированный, декларативный, мультидоменный язык для компонентно-ориентированного моделирования сложных систем.

Modelica основывается на записи дифференциальных, алгебраических и дискретных уравнений, вместо использования операций присваивания. Такой способ моделирования не задает заранее определенную причинно-следственную связь вычисления входных переменных.

Компилятор языка Modelica самостоятельно манипулирует уравнениями в символьном виде, определяя порядок их исполнения и то, какие компоненты в уравнении будут определять входы и выходы. Тем самым программа в Modelica представляет собой систему уравнений.

Часто Modelica сравнивают с объектно-ориентированными языками программирования, такими как C++ или Java, но на деле она от них существенно отличается. Первое и самое очевидное отличие – это то, что Modelica является языком моделирования, а не программирования. Классы этого языка не компилируются в обычном смысле, а преобразуются в объекты, которые в последующем используются специализированным процессом. Вторым отличием, о котором уже упоминалось в тексте, является то, что классы могут содержать алгоритмические компоненты, которые аналогичных операторам и блокам в языках программирования. Языком Modelica декларируется, что классом является любое определение, в том числе и алгоритмическая функция. Этот язык подходит и используется для программно-аппаратного моделирования и для моделирования встроенных систем управления».

Заканчивая обзор разработанных учебников, следует сказать и о задачниках [2,3,5,7,8,9]. Важно отметить, что учебники по технологиям моделирования немыслимы без задачников. Особенностью этих задачников является использование конкретных языков моделирования, так как, наряду с обычным математическим описанием обсуждаемых моделей, всегда приводится описание моделей на языке моделирования, а сами компьютерные модели размещаются на сайтах и доступны студентам.

Создаваемые и изучаемые компьютерные учебные модели под управлением сред визуального моделирования становятся своеобразными виртуальными лабораториями, оснащенными наборами инструментов для измерения и анализа результатов эксперимента, планирования и автоматического проведения экспериментов. Более того, благодаря объектно-ориентированному подходу можно легко организовать сравнительное изучение свойств различных экземпляров моделей.

Участники проекта в рамках одной из летних школ провели международный конкурс «Виртуальные лаборатории» и проверили правильность предлагаемого подхода к преподаванию моделирования. Участники конкурса сформировали рабочие группы, в которые могли входить студенты различных стран. Группы получили задания, выбрали среду моделирования и учебники, распределили работу, и попытались построить и изучить модели до начала летней школы. Во время летней школы они имели возможность непосредственно общаться и подготовить итоговое выступление. Оказалось, что такое заочное и «распределенное» моделирование осуществимо, если предоставлять материалы разработанных учебников и задачников.

Самым дискуссионным оказалась разработка электронных курсов. Электронные версии курсов мы разделили на две группы: электронные материалы для поддержки традиционных курсов в аудиториях и дисплейных классах, и электронные курсы для заочного изучения (МООС).

Первая группа предполагает непосредственное общение студента и преподавателя на лекциях, во время лабораторных работ, и традиционной формы экзамена. Здесь электронные материалы играют вспомогательную роль, если студент регулярно посещает занятия. В тоже время, как показали опросы, дополнительные материалы: презентации лекций, комментарии к лекциям, методические указания к лабораторным работам, упрощенные варианты моделей для лабораторных работ, видео-уроки, иллюстрирующие приемы разработки моделей, помогают студентам, особенно в случаях, если они по тем или иным причинам пропускают занятия. Отсутствие программного обеспечения, поддерживающего создание дополнительных материалов, аналога Office, например, делает эту работу чрезвычайно трудоемкой для преподавателя.

Вторая группа материалов или массовые открытые онлайн курсы (MOOC), имеют свои стандарты и сайты (<https://ru.coursera.org/>), что упрощает разработку курсов, с одной стороны, но при этом естественным результатом изучения таких курсов является получение сертификата, и включение этого курса в список курсов, прослушанных студентом за время обучения. Для российских университетов пока эта проблема не решена.

Подводя итоги, можно высказать ряд пожеланий:

Желательно провести обсуждение содержания курсов математическое «моделирование для инженеров» и «технологии компьютерного моделирования» с представителями университетов и работодателями. Было бы полезно сформировать список специальностей, для которых необходимы перечисленные курсы и модификация учебного плана.

Важно сформировать список современных, перспективных направлений моделирования, которые сейчас используются промышленностью, и для которых целесообразно разрабатывать востребованные элективные курсы.

Необходимость создания MOOK определяется не только интересом к ним студентов, но возможностью использовать их при обучении современным технологиям моделирования сотрудников предприятий.

Благие пожелания чаще всего остаются пожеланиями, если не существует конструктивного механизма их воплощения. Реальным шагом в решении обсуждаемых задач могло быть стать создание рабочей группы в НОИМ из преподавателей (исполнители) и представителей промышленности (заказчики), а первым результатом - проведение конференции - ярмарки, где бы заказчики могли бы сформулировать свои требования к выпускникам университетов в области моделирования, а студенты оценить потребности промышленности в области моделирования и предлагаемые условия работы и карьерного роста.

Литература

1. Рождественский К.В., Рыжов В.А., Фёдорова Т.А., Сафронов К.С, Тряскин Н.В. Компьютерное моделирование динамических систем с использованием среды Wolfram SystemModeler: - учебник. СПбГМТУ. – СПб., 2019 (рукопись в издательстве).
2. Рождественский К.В., Рыжов В.А., Фёдорова Т.А., Сафронов К.С, Тряскин Н.В.
3. Виртуальные лабораторные работы в среде Wolfram System Modeler: - учебное пособие. СПбГМТУ. – СПб., 2019 (рукопись в издательстве).
4. Рыжов В.А., Фёдорова Т.А., Тряскин Н.В., Сафронов К.С. Рекомендации по выполнению виртуальных лабораторных работ в среде Wolfram System Modeler: -методические указания. СПбГМТУ. – СПб., 2019 (рукопись в издательстве).
5. Alfonso Urquia Moraleda, Karla Martin Villalba. Modeling and simulation in engineering using Modelica. ISBN: 978-84-362-7356-6, UNED, Free [e-book](#), Spain, 2018 (есть русский перевод)
- A. Urquia; C. Martin-Villalba; M.A. Rubio; V. Sanz: *Simulation practice with Modelica*. ISBN: 978-84-362-7403-5-6 Editorial UNED, Free [e-book](#), Spain, 2018.
6. Maja Atansijevic-Kunc, Saso Blazic, Gasper Music, Borut Zupancic. Control – Oriented modelling and simulation: methods and tools. Free [e-book](#), Ljubljna, Slovenia, 2017 (есть русский перевод).
7. Maja Atansijevic-Kunc, Saso Blazic, Gasper Music, Borut Zupancic. Modeling and simulation practice with Matlab and Simulink. Free [e-book](#), Ljubljna, Slovenia, 2018 (есть русский перевод).
8. Сениченков Ю.Б. Компонентное моделирование сложных динамических систем : сборник заданий. ISBN 978-5-7422-6328-9 - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019.-122 с.
9. Сениченков Ю.Б., Ампилова Н.Б., Тимофеев Е.Л. Математическое моделирование сложных динамических систем: сборник заданий. ISBN 978-5-7422-5960-2 - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018.-108 с.
10. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Компонентное моделирование сложных динамических систем : учебное пособие. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019 (рукопись в издательстве).
11. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Математическое моделирование сложных динамических систем : учебное пособие. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019 (рукопись в издательстве).
12. Shornikov Yu.V., Dostovalov D.N. Fundamentals of continuous system simulation theory. NSTU, Free [e-book](#), Russia, 2018.

