



## ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА, СТАНДАРТИЗАЦИЯ\*

Сениченков Ю. Б.<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор, ✉ [senyb@dcn.icc.spbstu.ru](mailto:senyb@dcn.icc.spbstu.ru)

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
ул. Политехническая, д. 21, 194021, Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

В работе рассматриваются различные технологии создания виртуальных лабораторий, используемых для обучения по естественно-научным и техническим дисциплинам в школах и университетах. Особое внимание уделяется технологиям создания лабораторий с помощью сред визуального моделирования: Matlab-Simulink, LabView, OpenModelica, MapleSim, System Developer, AnyDynamics, SimInTech. Предлагается начать обсуждение проекта «Публичные виртуальные библиотеки» на страницах журнала «Компьютерные инструменты в образовании».

**Ключевые слова:** компьютерные модели, виртуальные лаборатории, универсальные среды визуального моделирования, электронные образовательные ресурсы.

**Цитирование:** Сениченков Ю. Б. Виртуальные лаборатории: использование, разработка, стандартизация // Компьютерные инструменты в образовании. 2022. № 3. С. 108–130. doi: 10.32603/2071-2340-2022-3-108-132

С появлением компьютеров у традиционных учебных материалов появились их электронные двойники: лабораторные установки — виртуальные лаборатории, контрольные работы — компьютерные тесты, курсы лекций — презентации, электронные конспекты, видео-лекции. Электронные материалы обычно агрегируют в сложно организованные системы, например электронные курсы. С точки зрения технологии разработки, электронные материалы имеют одно существенное преимущество перед традиционными — они создаются и поддерживаются с помощью компьютерных инструментов. Таким образом, компьютерный учебный материал — это данные (тексты, презентации, задания в «компьютерной» форме) и операции над этими данными. Чем разнообразнее набор инструментов, помогающих работать с данными, тем больше возможностей у преподавателя для создания оригинальных курсов. Помимо инструментов для разработки учебных материалов, есть инструменты для организации учебного процесса и контроля за процессом изучения материала конкретным студентом: тестирование (контроль и самоконтроль), оценка трудности и полезности учебных материалов (посещение и время работы с разделами курса на сайте), выполнение заданий (сроки

\* Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-141-41: изучение взаимосвязи концептуальных математических понятий, их цифровых представлений и смыслов как основы трансформации математического образования.

и результаты). Учебные курсы, инструменты преподавателя и системы контроля за работой студентов образуют еще один комплекс — систему поддержки курсов и контроля за процессом обучения, обычно реализованную в виде сайта.

Посещение этого сайта студентами можно контролировать и извлекать из полученной информации много полезного для усовершенствования курса. Прилежное посещение сайта и вовремя сданные задания не гарантируют успешного освоения курса, но конкретные траектории «хождения» по сайту при выполнении заданий помогают преподавателю понять насколько удачно подобраны материалы и задания, а студенту — обнаружить пробелы в своих знаниях. Электронные курсы и их инструменты, системы поддержки учебного процесса существенно облегчают удаленную работу с большими группами студентов.

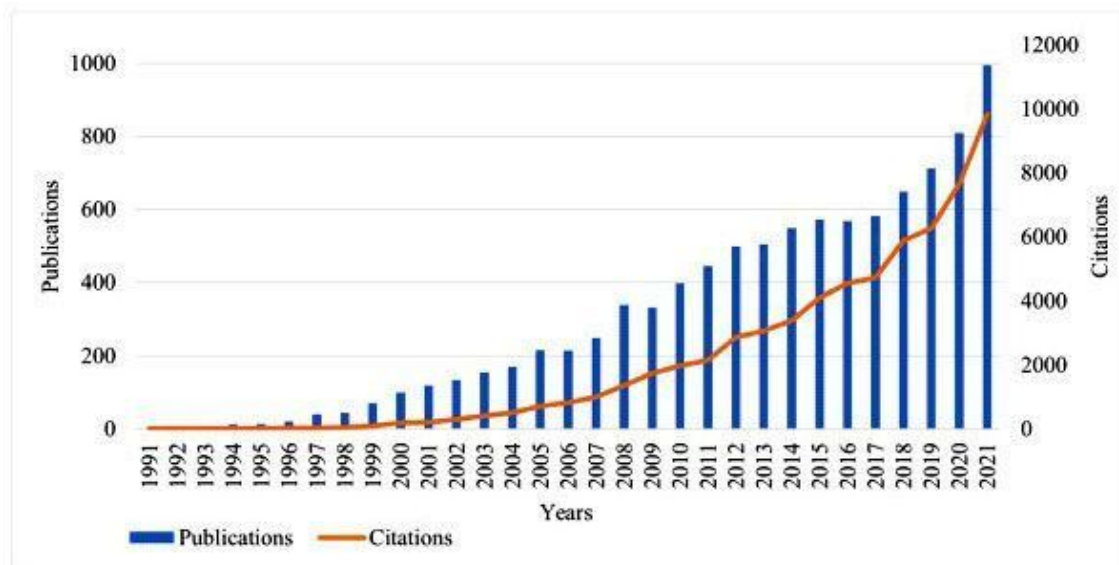
Среди компонентов электронных курсов есть компоненты, которые можно не разрабатывать самостоятельно, а позаимствовать у коллег, если коллеги не возражают (то есть если существует свод общепринятых правил использования общественных программ, и вы им следуете). Эти компоненты можно объединить в общедоступные библиотеки, как это делают, например, разработчики программных реализаций численных методов. Общедоступные библиотеки, например BLAS, LINPACK, ODEPACK, созданные профессионалами, используются и модифицируются большим числом пользователей. Думается, что такой подход можно перенести и на программное обеспечение для поддержки учебного процесса. К общим компонентам программного обеспечения для образования можно отнести: виртуальные лаборатории, тесты, презентации и конспекты лекций по конкретным темам. При появлении систематизированных и унифицированных базисных компонентов для поддержки учебного процесса станет естественным их прямое использование многими преподавателями.

При создании электронных курсов, учитывая, что они могут потом использоваться в различных системах поддержки курсов, целесообразно начинать с создания прототипа в традиционной форме — файловой системы в виде дерева, содержащего файлы, с которыми могут работать традиционные инструменты (MS Office, Adobe Systems). Именно этот прототип и представляет наибольший интерес для повторного использования, но он редко доступен. Далее приходится выбирать систему поддержки курсов (Sakai, Moodle, Openedu, Coursera) и, используя имеющийся прототип, создавать курс в соответствии с требованиями платформы. Сейчас каждый электронный курс уникален, защищен авторскими правами, и использование его удачных компонентов другими преподавателями практически невозможно. В то же время компоненты любого курса — это кубики, которые допускают повторное использование, если они унифицированы. Библиотеки курсов (Coursera, OpenEdu) существуют, библиотек общедоступных компонентов курсов нет.

В этой статье речь пойдет о попытке создания общественных библиотек компонентов для курсов, в которых используются компьютерные модели сложных динамических систем. Востребованы как сами модели, так и виртуальные лаборатории, позволяющие экспериментировать с ними.

## 1. ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ

Виртуальные лаборатории используются давно, в разных формах. В статье [1], приведен график (рис. 1), показывающий рост числа публикаций и цитирований, посвященных использованию виртуальных лабораторий в мире. К сожалению, наша страна и наши университеты в ней упоминаются крайне редко.



**Рис. 1.** Число публикаций и число цитирований статей, посвященных виртуальным лабораториям, с годами только возрастает [1]

На сайте Казанского национального исследовательского технического университета в разделе «Терминология e-Learning» (<https://m\T2A\cyryuoodle.kai.ru/mod/data/view.php?d=14&page=3&lang=ru>) приводится широко цитируемое определение виртуальной лаборатории:

«Виртуальная лаборатория представляет собой программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить опыты без непосредственного контакта с реальной установкой или при полном отсутствии таковой. В первом случае мы имеем дело с так называемой лабораторной установкой с удаленным доступом, в состав которой входит реальная лаборатория, программно-аппаратное обеспечение для управления установкой и оцифровки полученных данных, а также средства коммуникации. Во втором случае все процессы моделируются при помощи компьютера» [2].

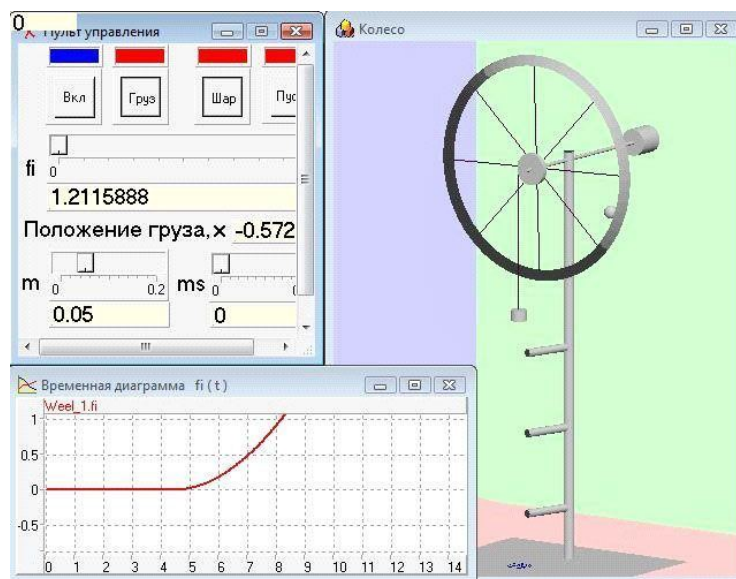
Таким образом, виртуальные лаборатории могут быть программными (рис. 2) или программно-аппаратными (рис. 3).

Программная виртуальная лаборатория — это компьютерная реализация математической модели изучаемого явления или устройства, виртуальные инструменты для задания параметров и визуализации значений измеряемых величин, средства планирования эксперимента, сбора и обработки полученных результатов. Иными словами, Виртуальная лаборатория = Модель и ее программная реализация, Приборы, Вычислительный эксперимент, Данные (исходные, получаемые), Инструменты для обработки результатов экспериментов.

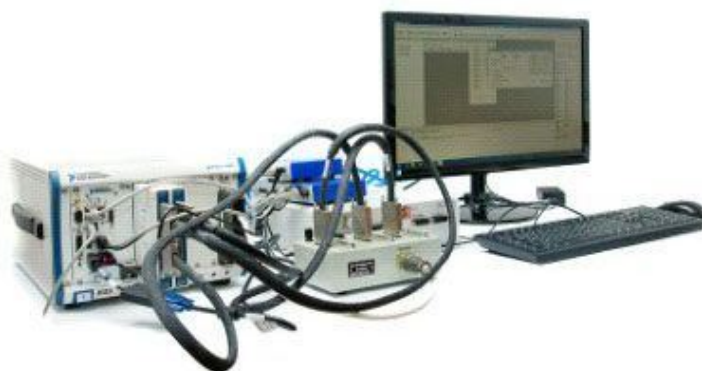
Часть компонентов в конкретной виртуальной лаборатории может отсутствовать. Например, есть только графический образ объекта, который можно использовать для

- первичного ознакомления со сложным устройством — виртуальная экскурсия по заводскому цеху;
- выбора правильной последовательности действий оператора при включении, выключении оборудования, возникновении аварийной ситуации — обучения оператора;

— сборки и разборки на составляющие — виртуальный ремонт многокомпонентного устройства.



**Рис. 2.** Программная виртуальная лаборатория [3, 4]: программная реализация модели, динамический графический образ устройства, приборы и графики



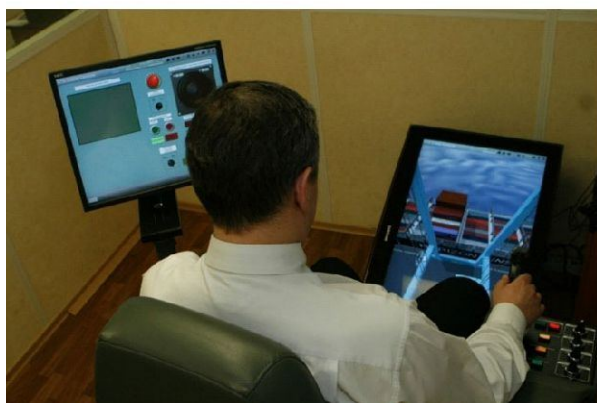
**Рис. 3.** Виртуальная лаборатория с реальными компонентами (<https://www.irz.ru/products/kpa/394.htm>)

Виртуальная лаборатория с аппаратными компонентами использует реальные компоненты наряду с программными — можно реализовать удаленный доступ к оборудованию, использовать реальные устройства управления виртуальными объектами, реальные приборы (источники внешних сигналов и измерительные приборы).

К особому виду виртуальных лабораторий можно отнести тренажеры (рис. 4). Основное отличие тренажеров от виртуальных лабораторий — в их назначении: обучение персонала в условиях, максимально приближенных к реальным, гарантирующее безопасность обучаемых и сохранность оборудования. Тренажеры, как и виртуальные лаборатории, могут быть программными (рис. 4а) и программно-аппаратными (рис. 4б), и им сейчас уделяется большое внимание [18, 19]. Частным типом тренажеров можно признать цифровые двойники объектов (digital twin) [10–16].



(а) Виртуальное устройство, которое можно собирать и разбирать ([https://www.vrnlab.ru/catalog\\_item/virtualnaya-santehnika/](https://www.vrnlab.ru/catalog_item/virtualnaya-santehnika/))



(б) Оператор с помощью реальных устройств управляет виртуальным объектом — портовым краном (<http://transas.ru/>)

**Рис. 4.** Тренажеры: программные (а) и аппаратно-программные (б)

Виртуальные лаборатории также можно разделить на группы, в зависимости от технологии их изготовления (табл. 1).

**Таблица 1.** Виртуальные лаборатории по технологиям изготовления

1	Уникальные разработки	Пользователь имеет дело с конечным продуктом — лабораторией. Технология изготовления не важна пользователю. Пользовательская модификация существующих лабораторий практически невозможна
2	Уникальные технологии разработки лабораторий	Пользователю предлагается технология, позволяющая самостоятельно создавать лаборатории из компонентов. Можно использовать и модифицировать существующие лаборатории. В рамках конкретного подхода компоненты унифицируются, и их можно использовать повторно в разных лабораториях
3	Технологии на базе сред моделирования	Библиотеки лабораторий как конечный продукт создаются с помощью сред моделирования (Matlab+Simulink, OpenModelica, см. таблица ??). Пользователи могут, имея исходные тексты и навыки работы со средами моделирования, модифицировать лаборатории.



Виртуальные лаборатории объединяются в библиотеки, как платные, так и свободно распространяемые (ссылки на библиотеки можно найти, например, на сайте Отдел электронных технологий в образовании ([kai.ru](http://kai.ru))).

Наиболее привлекательными для создания общественных библиотек, как мне кажется, являются библиотеки, созданные с помощью сред моделирования. Среды моделирования: Matlab+Simulink, LabView, OpenModelica, MapleSim, System Modeler, AnyLogic, SimInTech, AnyDynamics — широко известны, с их помощью созданы обширные библиотеки моделей, они оснащены инструментами для проведения вычислительного эксперимента, таким образом, в них есть все необходимое для разработки виртуальных лабораторий. Во многих средах уже созданы библиотеки виртуальных лабораторий, и актуальной становится проблема унификации библиотек, создания учебных заданий, тестов, инструментов работы преподавателей с лабораториями. Начать нужно с создания каталога существующих библиотек и формирования общественной (свободной, бесплатной) библиотеки лабораторий. Но для преподавателя важны и библиотеки, и учебные материалы, помогающие использовать эти библиотеки в учебном процессе, плюс инструменты поддержки учебного процесса. Сейчас найти нужную библиотеку достаточно сложно, а еще сложнее внедрить ее в учебный процесс.

Журнал «Компьютерные инструменты в образовании» предлагает начать создавать общественную библиотеку виртуальных лабораторий. Журнал с первого года своего существования уделял внимание вопросам создания и применения виртуальных лабораторий. Уже в первом номере журнала (<http://ipo.spb.ru/journal/index.php?magazines/1998/>) были опубликованы статьи Г. М. Водопьяна и А. Ф. Кавтрева.

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ПРЕДМЕТОВ  
ЕСТЕСТВЕННО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЦИКЛА**  
**Водопьян Г. М.**

Открыто

В статье автор указывает на возможность применения компьютера при проведении лабораторных работ по физике, химии или биологии. Также автор рассказывает о технических возможностях и путях применения компьютерной лаборатории фирмы Philip Harris (Великобритания) для предметов естественнонаучного цикла в средней школе.

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ СРЕДНЕЙ  
ШКОЛЫ**  
**Кавтрёв А. Ф.**

Закрето

Статья - скорее не рассказ о возможном применении компьютера для преподавания физики, а классификация тех многочисленных программ, что уже существуют, описание принципов их взаимодействия с учеником, рекомендации по использованию. В приложении к статье приведен перечень компьютерных программ по физике для IBM-совместимых компьютеров, содержащий более 50 позиций.

Как видно из аннотации второй статьи, еще 25 лет назад учителей знакомили с виртуальными лабораториями по физике, публиковались статьи о созданных лабораториях, технологиях создания лабораторий. Приведем примеры лабораторий различного типа, в основном используются публикации журнала КИО.

## 2. ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ КАК УНИКАЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ

В качестве примера приведем набор лабораторных работ («пакетов»), созданный профессором Бутиковым Е. И. (<http://butikov.faculty.ifmo.ru/indexR.html>), [20–22]. Набор включает программный комплекс (рис. 5), цикл статей в журнале «Компьютерные инструменты в образовании». О качестве пакета говорит приведенная ниже цитата.

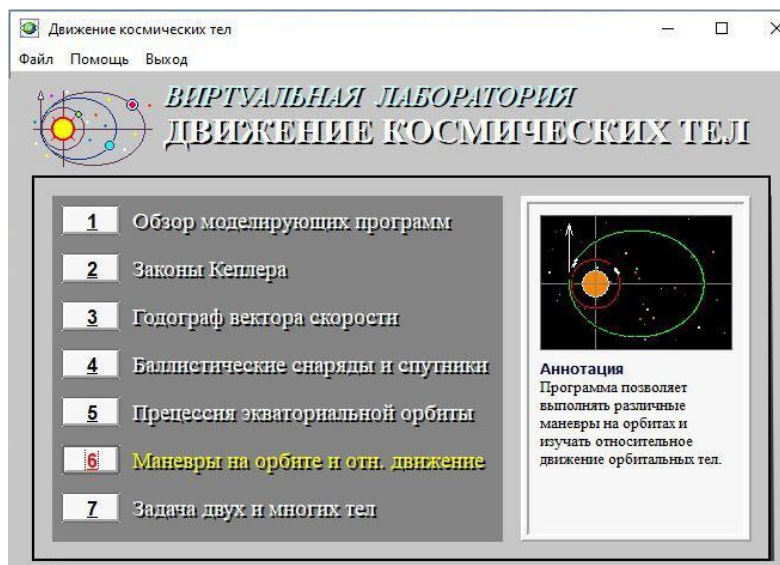


Рис. 5. Виртуальная лаборатория «Движение космических тел»

«Англоязычные версии этих пакетов “Physics of Oscillations” и “Planets and Satellites” опубликованы в США издательством Physics Academic Software и распространяются Американским Институтом Физики (American Institute of Physics). Пакет программ “Physics of Oscillations” стал победителем Европейского конкурса на лучшую образовательную компьютерную программу в 1996 году (European Academic Software Award — EASA’96), пакет “Planets and Satellites” стал победителем того же конкурса в 2004 году (EASA’2004). Программы стали также лауреатами ежегодных конкурсов журналов Computers in Physics (1998) и Computing in Science and Engineering (1999)» (<http://butikov.faculty.ifmo.ru/indexR.html>).

Русскоязычные версии этих пакетов распространяются компанией «ФИЗИКОН». «Издательство цифрового контента «ФИЗИКОН» — старейший российский разработчик электронных образовательных ресурсов для школ, колледжей и вузов. Компания основана в 1993 году выпускниками Московского физико-технического института и имеет многолетний опыт разработки интерактивных курсов и интеграции их в цифровую образовательную среду (<https://physicon.ru/>)».

Лаборатории, интересные пользователям и разработчикам как конечный продукт, создаются и будут создаваться, даже если появятся промышленные коллекции лабораторных работ. Каталог помог бы сократить время поиска нужных лабораторий и способствовал бы их распространению среди заинтересованных педагогов. Обсуждаемые лаборатории интересны и набором материалов, сопровождающих лаборатории — статьями в журнале КИО. Каталог помог бы и здесь, сейчас такие статьи нужно разыскивать. Лаборатории погружены в оболочку (рис. 5), которая может быть отделена от конкретных лабораторий, унифицирована и может использоваться как шаблон, который нужно только заполнять, а не разрабатывать заново для новой лаборатории.

### 3. УНИКАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Разработчикам важны технологии создания лабораторий. Если технология интуитивно понятна, ею могут воспользоваться и преподаватели для создания своих, уникальных лабораторий.

Авторы [23–25] предложили уникальную технологию разработки «физлетов» (в основе лежат апплеты языка Java), способных работать на различных компьютерных платформах, для создания библиотек по общей физике. В книге [24] приведены примеры лабораторий, подробно обсуждается технология их создания. В статье [25] можно найти краткое описание технологии создания и обсуждение педагогических проблем, связанных с использованием виртуальных лабораторий.

Процитируем авторов [25]: «Набор апплетов, которые мы называем физлетами, обладает свойствами, делающими их чрезвычайно полезными для реализации творческих инициатив преподавателя:

- физлеты просты,
- физлеты наглядны и интерактивны,
- физлеты — гибкий инструмент,
- физлеты основаны на Web-технологиях,
- физлеты распространяются свободно для некоммерческого использования <http://physics.bu.edu/~duffy/semester2/semester2.html>.

Физлеты содержат три компонента: «модель» (обрабатывает данные и предоставляет пользователю методы, позволяющие их менять), «управление» (обеспечивает взаимодействие пользователя с моделью с помощью клавиатуры или мыши), «визуализация» (обеспечивает наглядное представление данных).

Цитируемая статья, как и книги о физлетах, интересны не только разработчикам виртуальных лабораторий, интересующимся методами их создания, но и, прежде всего, современным педагогам — обсуждаемые (с 2003 г.) педагогические технологии используются и поныне.

В статье [28] описывается технология использования 3D-графики для создания виртуальных лабораторий. Процитируем авторов: «Технологической основой представления является графический инструмент для разработки трёхмерных приложений Unity3D. Unity3D — это кроссплатформенный движок для разработки интерактивных приложений с графикой, воспроизводимой в реальном времени. Этот графический движок наиболее распространён среди разработчиков трёхмерных крупномасштабных игр. Движок имеет собственный редактор, разработка продуктов ведётся с помощью языка C#, что позволяет создавать приложения, описывающие сложные физические процессы. Также этому способствует высокий уровень абстракции программного интерфейса. Процесс разработки трёхмерных сред является объектно-ориентированным, то есть построение среды разделяется на объекты с поведением. Unity3D поддерживает большое количество аппаратных платформ. Движок создан на основе языка C++, что делает его быстрым и производительным» [28].

Описание различных уникальных, технологий, используемых для разработки виртуальных лабораторий можно также найти в работах [29, 30].

Обзорных статей, посвящённых существующим технологиям и их сравнительному анализу, я не нашёл. Уникальные технологии достаточны трудны для использования их преподавателями в учебном процессе — недостаточно знаний и умений, а их приобретение требует времени, которого всегда не хватает.

#### 4. БИБЛИОТЕКИ

В журнале «Мир науки, культуры, образования» в 2022 году опубликована статья [27], в которой приведены примеры существующих библиотек виртуальных лабораторий (рис. 6) и приводится их краткое описание.



Примеры виртуальных лабораторных практикумов

Разработчик/Название (при наличии)	Доступ	Автономность	Требования к ПО
mediadidaktika.ru	свободный	Требуется сеть Интернет	Adobe Flash Player*
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого	свободный	Локальный компьютер	LabView Runtime Engine
СПбГУ/ Интернет-олимпиада по физике	коммерческий	Локальный	Internet Explorer одной из последних версий
Цифровой элемент/Виртуальные лаборатории	коммерческий	Локальный	Отдельное ПО не требуется
Новосибирский государственный технический университет	свободный	Локальный	Отдельное ПО не требуется
Уральский федеральный университет и РНМЦ «Современный физический практикум»	коммерческий	Локальный	Adobe Flash и NI LabVIEW
Sunspire/Виртуальная лаборатория общей физики	коммерческий	Локальный	Отдельное ПО не требуется

Рис. 6. Примеры библиотек виртуальных лабораторий по физике [27]

Коллекцию виртуальных работ по физике для школьников можно найти по ссылке <https://vr-labs.ru/laboratories/> (рис. 7).



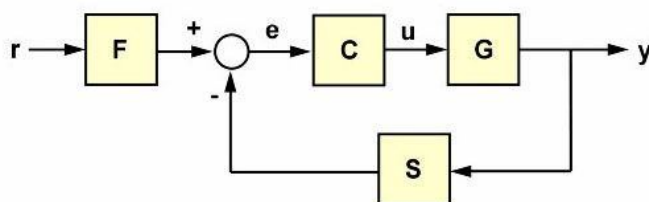
Рис. 7. Физика для школьников

Число библиотек стремительно растет. При всей мощности поисковых машин искать сложно, долго, а значит, есть шанс не найти нужную для себя или создать аналогичную уже существующей библиотеку. И в этом случае каталог мог бы принести пользу. Списки и описание различных библиотек можно найти по ссылке: <https://edtechreview.in/e-learning/5255-top-online-tools-and-virtual-labs-for-fun-experiments-teachers-must-know> (дата обращения 23.09.2022).

По ссылке [62] можно найти описание библиотек, разработанных в Томском политехническом университете, а по ссылке [63], библиотек, созданных в ИТМО.

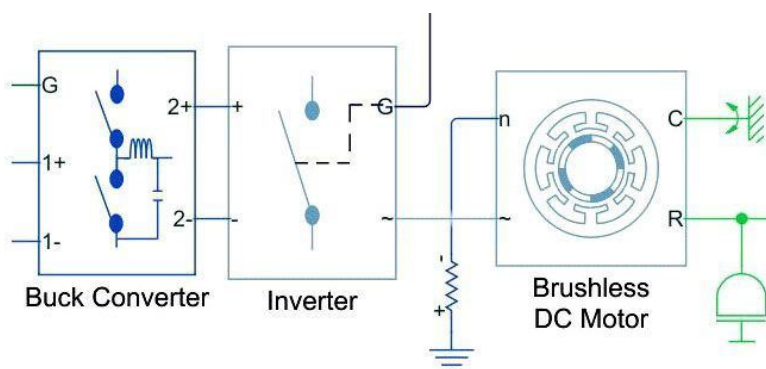
## 5. ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ЛАБОРАТОРИЙ НА ОСНОВЕ СРЕД МОДЕЛИРОВАНИЯ

В основе любой виртуальной лаборатории лежит модель изучаемого объекта, и если это математическая модель, то естественно воспользоваться средами моделирования, позволяющими автоматически построить программную реализацию модели, используя исходную математическую модель и язык моделирования среды. Простота языка моделирования и возможность использования его в графической форме — привлекательная черта для пользователей. Успех среды Simulink во многом определялся использованием графического языка структурных схем с направленными связями, хорошо известного инженерам. Схемы собирались из блоков — образов существующих устройств, а блоки соединялись связями вход-выход в единую схему нового устройства (рис. 8).



**Рис. 8.** Схема с направленными связями (<https://www.mathworks.com/help/control/ug/connecting-models.html>)

Аналогичные схемы с ненаправленными связями также оказались востребованы в графических версиях языков моделирования (рис. 9). Их используют для моделирования «физических» систем чаще, чем графы связи (bond graphs) [30].



**Рис. 9.** Схема с ненаправленными связями (<https://www.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>)

Для разработки виртуальных лабораторий с помощью универсальных сред моделирования необходимо иметь удобные средства управления вычислительным экспериментом, обработки полученных данных и визуализации лабораторной установки, а также язык, простой и интуитивно понятный пользователю, на котором можно описать виртуальную лабораторию: модель, данные и эксперименты. Создать лабораторию можно на языке моделирования, но это сложно и под силу не каждому преподавателю. Универсальные среды условно можно разделить на две группы: имеющие специальные языки «высокого» уровня для создания экспериментальных установок и виртуальных лабораторий и не имеющие — в последнем случае используется непосредственно язык моделирования. LabView (<https://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html>).

Большое число публикаций и примеров учебных лабораторий, созданных пользователями, в среде LabView появилось благодаря интуитивно понятной технологии создания лабораторий: создай панель управления прибором (рис. 10), используя графические образы устройств и приборов, выбери графические формы визуализации поведения и результатов эксперимента, напиши код управления прибором, используя понятный всем язык блок-схем, язык моделирования среды (рис. 11).

Еще одним неоспоримым преимуществом среды является возможность создавать программно-аппаратные виртуальные лаборатории (включать в состав лаборатории реальные устройства и проводить эксперименты с реальными лабораторными установками удаленно) и размещать созданные лаборатории в сети [40–43].

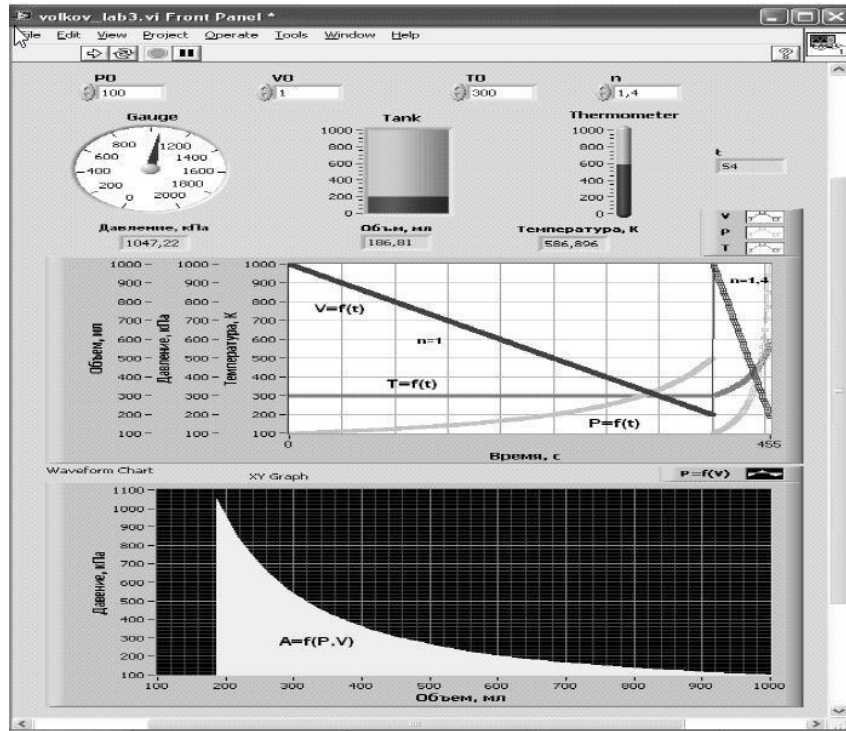


Рис. 10. Пример лицевой панели прибора [42], созданной с помощью LabView

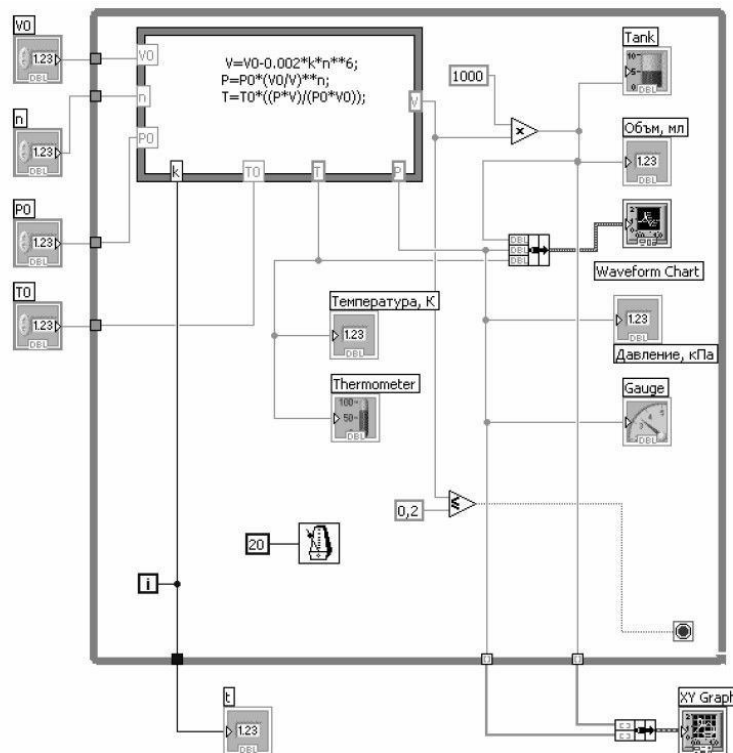


Рис. 11. Блок-схема управления прибором [42]

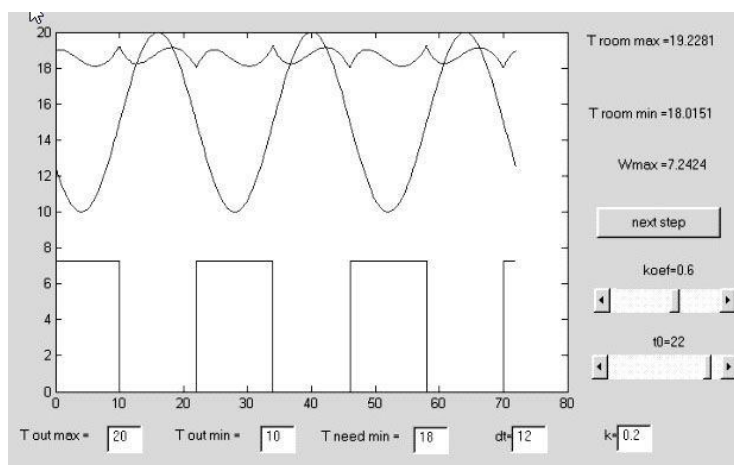
Простота и интуитивная понятность языка блок-схем LabView — большое преимущество для структурно простых установок и простых экспериментов. Во многих статьях, в частности, статьях на русском языке, можно найти примеры использования среды LabView для создания виртуальных лабораторий, например [37? –39]. Существуют пособия для разработки даже школьных виртуальных лабораторий [40]. Обратимся к линейке продуктов компании MathWorks.

## 6. MathWorks (<https://www.mathworks.com/>)

Языки моделирования продуктов этой компании достаточно сложны, поэтому возникает желание помочь пользователю описать вычислительный эксперимент, используя максимально простые описания используемых устройств с дружественным интерфейсом, предложить интуитивно понятный выбор воздействий на устройство и графические формы представления результатов.

### 6.1. Graphical User Interface

В работе [3] используется графический пользовательский интерфейс Graphical User Interface (<https://www.section.io/engineering-education/matlab-graphical-user-interface/>) для создания виртуальных лабораторий (рис. 12).



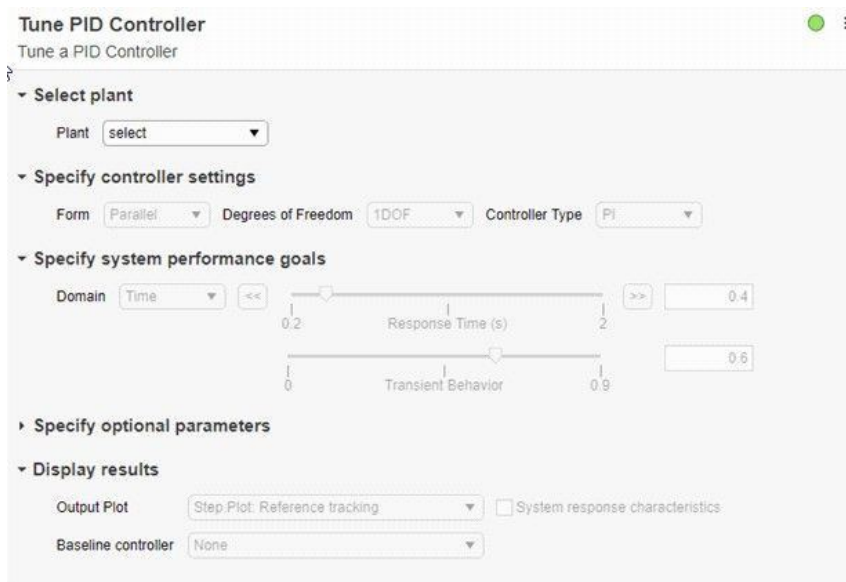
**Рис. 12.** Панель для исследования системы отопления дачных домиков. Отклик системы отопления на прямоугольные импульсы [3]

С помощью графического пользовательского интерфейса можно управлять экспериментом, создавая событийно-управляемый код. Интерфейс содержит графические управляющие компоненты (Push Button, Slider, Radio Button, ..., Edit Text, Static Text, Pop-up Menu, ..., Panel, Button Group), с помощью которых исполняемой программе передается нужная информация, а та, в свою очередь, возвращает пользователю результаты выполнения.

### 6.2. Matlab Live Editor

Редактор Matlab Live Editor ([https://www.mathworks.com/products/matlab/live-editor.html?s\\_tid=srchtitle\\_live\\_1](https://www.mathworks.com/products/matlab/live-editor.html?s_tid=srchtitle_live_1)) объединяет в единое целое: код (модель), полученные ре-

результаты эксперимента и текст. Для удобства преподавателей для создания моделей можно использовать бесплатные продукты Matlab Online и Simulink Online. Описание лаборатории формируется на языке Live Script. Например, если требуется построить виртуальную лабораторию для изучения ПИД-контроллера ([https://www.mathworks.com/help/control/ug/pid-controller-design-in-the-live-editor.html?searchHighlight=%26quot%3Blive%20editor%26quot%3B&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/control/ug/pid-controller-design-in-the-live-editor.html?searchHighlight=%26quot%3Blive%20editor%26quot%3B&s_tid=doc_srchtile)), — сначала выбираем модель устройства, затем формируем входные воздействия (рис. 13) и получаем результаты в виде графиков.



**Рис. 13.** Пример использования Live Script для описания виртуальной лаборатории и экспериментов

На сайте Exponenta.ru ([https://docs.exponenta.ru/matlab/matlab\\_prog/live-editor-introduction.html](https://docs.exponenta.ru/matlab/matlab_prog/live-editor-introduction.html)) можно найти руководство по использованию Matlab Live Editor на русском языке.

### 6.3. App Designer

Еще одним компонентом, помогающим строить лаборатории и управлять экспериментом, является App Designer. (<https://www.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>). Компонент автоматически генерирует объектно-ориентированный код, позволяющий управлять экспериментом. Можно создавать независимые приложения или интернет-приложения, но требуется MATLAB Compiler™ and Simulink Compiler™. Для создания событийно-управляемых сценариев можно использовать машины состояний (Stateflow® chart).

На рис. 14 приведено пользовательское окно виртуальной лаборатории для изучения колебаний маятника на пружинке при наличии трения при различных внешних воздействиях [36].

Следующей группой сред моделирования, с помощью которых создано много виртуальных лабораторий и библиотек, являются среды на базе языка Modelica (<https://modelica.org/modelicalanguage.html>). Ограничимся рассмотрением среды OpenModelica — бесплатной, широко распространенной, имеющей обширные библиотеки, и, как мне кажется,



### Build Your Own Lab Interfaces

MATLAB and Simulink support the construction of user interfaces to customize virtualized lab environments. Use existing apps inside MATLAB and Simulink as the basis for a virtual laboratory or create your own using App Designer.

MATLAB apps allow your students to experiment and learn engineering concepts without focusing on the code or software-specific skills. Students interact with apps within MATLAB or MATLAB Online. Apps can be shared in a browser with MATLAB Web App Server.

Watch video: MATLAB Apps (3:35)

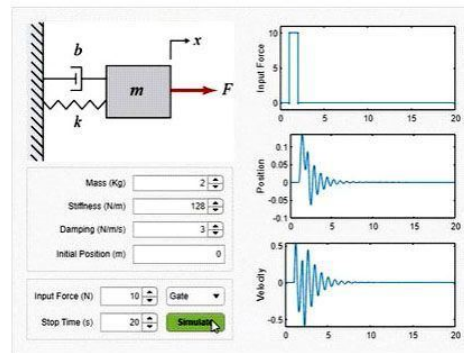


Рис. 14. Пример лабораторной установки, разработанной в Matlab+Simulink («физическое» моделирование») [36]

весьма перспективных сред MapleSim, System Modeler, так как в них широко используются символьные вычисления.

## 7. OpenModelica (<https://www.openmodelica.org/>)

Компонент OMEdit применяется для создания моделей, позволяя либо писать код на языке Modelica, либо строить модель в виде структурной схемы из доступных компонентов (рис. ??). Выполняемая модель компилируется, выполняется, а результаты моделирования отображаются на графиках. Пользователь видит традиционную реализацию — Редактор моделей (рис. 15) + Визуализатор поведения.

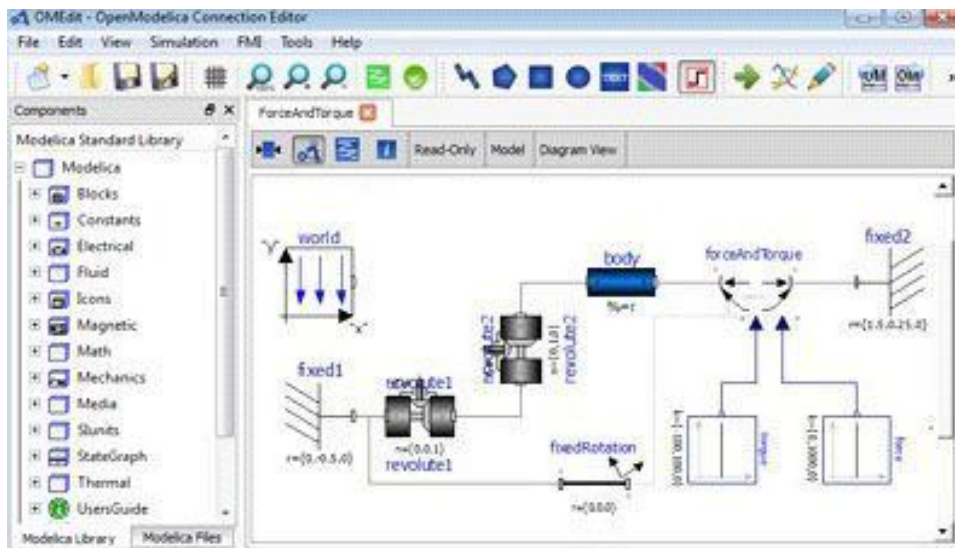


Рис. 15. Редактор моделей: библиотека компонентов и структурная схема

OpenModelica также дает возможность использовать записную книжку OM Notebook для создания лабораторий и электронных учебников. Редактор моделей построен по тому же принципу, что и редакторы моделей пакета Mathematica, доступные в компоненте MathModelica, используется для создания электронных учебников.

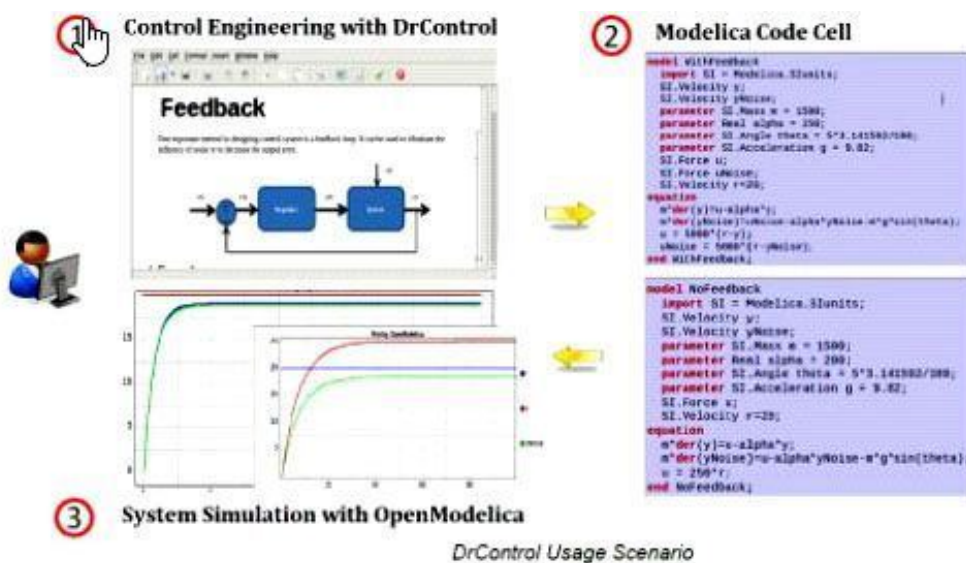


Рис. 16. Курс DrControl, созданный с помощью редактора OMNotebook

Примером интерактивного курса, созданного с помощью перечисленных компонентов является DrControl (рис. 16), в основе которого лежит электронная книга OMNotebook: текст дополняется упражнениями и выполняемыми моделями. Компонент **OMEdit** интегрирован с электронными записными книжками, что позволяет экспериментировать с моделями в реальном времени.

Группа испанских преподавателей [44–53] также создает инструменты для создания лабораторий на базе языка Modelica (рис. 17).

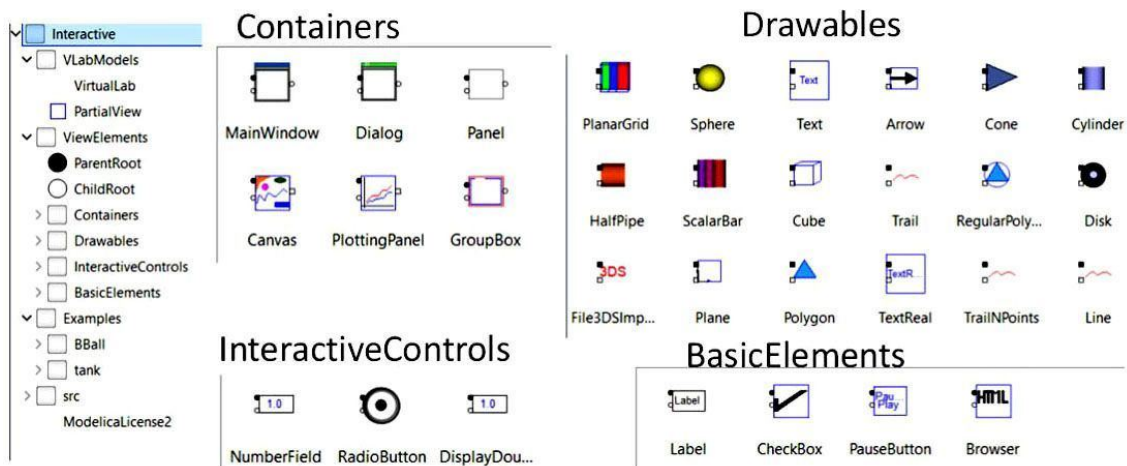


Рис. 17. Библиотека для создания виртуальных лабораторий в среде OpenModelica

Эта библиотека использует только среду OpenModelica и бесплатное программное обеспечение для создания виртуальных лабораторий студенческим коллективом. Для этого был разработан специальный протокол, алгоритм синхронизации и разработана библиотека классов на языке Modelica. Созданная библиотека распространяется свободно (<http://www.euclides.dia.uned.es/Interactive>).

## 8. MapleSim (<https://www.maplesoft.com/products/maplesim>; [https://www.basisoft.ru/map\\_product\\_sim.html](https://www.basisoft.ru/map_product_sim.html))

Создатели среды MapleSim на базе языка Modelica уделяют большое внимание ее внедрению в учебный процесс. По ссылке <https://www.maplesoft.com/products/maplesim/academic/> можно найти материалы для преподавателей (рис. 18–19).

**MapleSim for Educators and Students**  
The Modern Approach to Modeling and Simulation

With MapleSim, educators have an industry-proven tool to help bridge the gap between theory and practice. Built on the world-leading Maple mathematics engine and the open-standard Modelica modeling language, MapleSim gives you the ability to engage your students with complex, real-world examples and prepare them for the challenges they will face in industry.

- **Multiple domains, one environment.** The MapleSim modeling environment combines components from different engineering domains so that students in all engineering streams can build and explore realistic designs and study the system-level interactions.
- **Model systems, not equations.** Systems that would take hours or days to construct from first-principle equations can be created in a fraction of the time using MapleSim, so you can incorporate significantly more complex examples into your courses.
- **Connect the concepts.** With system-level equations available for demonstrating concepts like parameter optimization and sensitivity analysis, and the ability to define new components from first

**MapleSim Student Edition**  
Professional physical modeling at a

Рис. 18. Среда MapleSim в образовании (<https://www.maplesoft.com/products/maplesim/academic/>)

## Engineering Curriculum Content: Exploring Engineering Fundamentals

Free, professionally developed content designed to teach engineering fundamentals. Students use this material to explore and reinforce concepts, and instructors use it to supplement lectures, and as base material for labs and assignments.

**Kinematics & Dynamics**

**Robot Manipulators**

**Intro to Vibrations**

**Electrical Circuits**

**Intro to Control Systems**

Also Available: [Classroom content for Control Theory](#)

Рис. 19. Библиотеки от MapleSoft для инженеров (<https://www.maplesoft.com/contact/webforms/ControlTheory/index.aspx>)

Жаль только, что компания перестала поставлять программное обеспечение для нашей страны. При регистрации на сайте нужно указать страну, где вы работаете, но России в этом списке нет.



Еще одна среда моделирования, возникшая на базе математического пакета и использующая язык Modelica, называется System Modeler.

## 9. System Modeler (<https://www.wolfram.com/system-modeler/>)

Создатели этой среды также много внимания уделяет виртуальным лабораториям (рис. 20).

### Virtual Lab Libraries

Make education come alive and be more engaging. Virtual Labs are open educational resources (OER) designed to encourage student curiosity by allowing students to test ideas with immediate feedback in a programmatic environment.

#### Virtual Labs






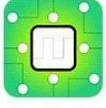
	<b>High School Physics</b> The High School Physics library provides interactive examples and exercises related to high-school physics courses. » <b>Free</b>		<b>High School Biology</b> The High School Biology library provides interactive examples and exercises related to high-school biology courses. » <b>Free</b>
	<b>High School Chemistry</b> The High School Chemistry library provides interactive examples and exercises related to high-school chemistry courses. » <b>Free</b>		<b>College Thermal</b> The College Thermal library provides interactive examples and exercises related to heat transfer and thermal engineering courses. » <b>Free</b>
	<b>College Biology</b> The College Biology library provides interactive examples and exercises related to college biology courses. » <b>Free</b>		<b>College Digital Electronics</b> The College Digital Electronics library contains electronics labs for college students. » <b>Free</b>

Рис. 20. Виртуальные лаборатории среды System Modeler

Число библиотек постоянно растет (<https://www.wolfram.com/system-modeler/what-is-new/new-libraries.html.ru?footer=lang>, рис. 21).

### Новые библиотеки

System Modeler    Блоги    **Библиотеки**    Ресурсы



 <b>Fluid</b> Моделируйте свои одномерные терможидкостные системы с помощью библиотеки Fluid. Библиотека предоставляет компоненты, поддерживающие как несжимаемые, так и сжимаемые потоки жидкости. Вы можете использовать газовые смеси, а также жидкости, которые могут претерпевать фазовые изменения. ⚙ Библиотека Modelica Fluid	 <b>CollegeDigitalElectronics</b> Библиотека CollegeDigitalElectronics включает лабораторные работы по электронике для студентов колледжа. Она содержит упражнения, связанные с комбинаторными и последовательными схемами. Вы узнаете, как создавать сумматоры и реализовать собственный 16 разрядный цифровой сумматор. ⚙ Библиотека CollegeDigitalElectronics	 <b>Бизнес-симуляция</b> Моделируйте стратегические вопросы бизнеса, экономики и государственной политики в любой организации с помощью этой бесплатной сторонней библиотеки. ⚙ Библиотека Business Simulation  ▶ Моделирование динамики системы с помощью библиотеки Business Simulation (18:02)
---	---	---

Рис. 21. Новики от System Modeler

Есть библиотеки и для школьников (<https://www.wolfram.com/system-modeler/what-is-new/new-libraries.html.ru?footer=lang>, рис. 22).



Рис. 22. Библиотека по физике для школьников

Российские среды (например SimInTech, <https://simintech.ru/>, рис. 23) также успешно используются для создания виртуальных лабораторий.

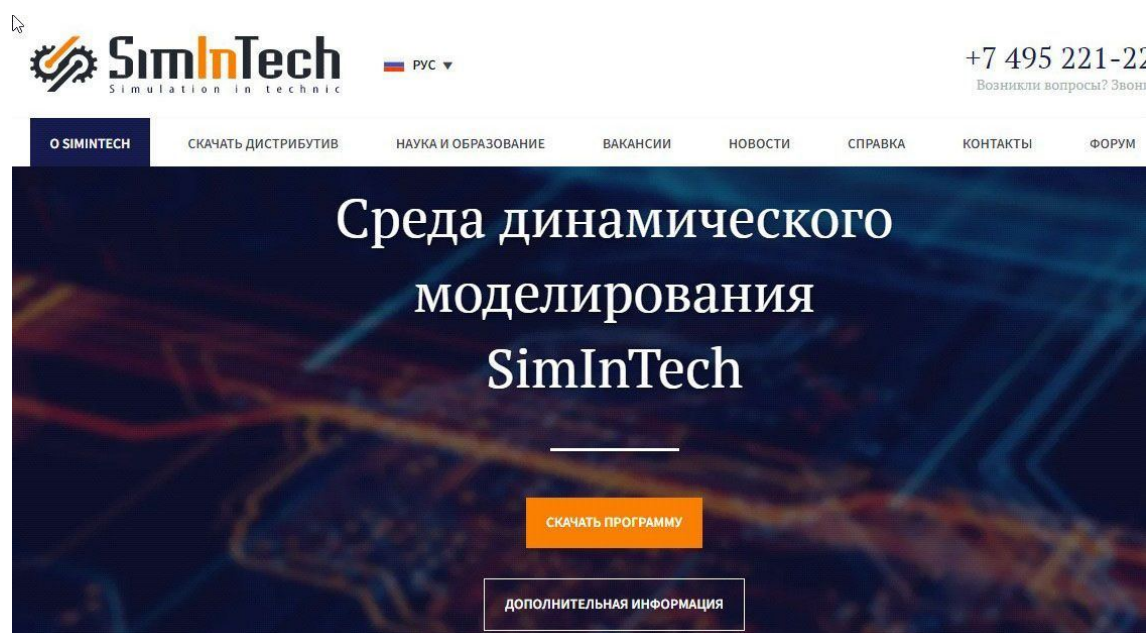


Рис. 23. Сайт среды SimInTech

Список разработанных учебных материалов разработчиками среды впечатляет (рис. 24).

В книге «Практикум по моделированию систем управления» задания формулируются на языке теории управления, что позволяет студентам их выполнять, используя любую среду, умеющую строить компонентную модель из блоков с направленными связями. Например, студенты строили модели одновременно в средах AnyDynamics, OpenModelica, сравнивали их, а в качестве контрольных результатов использовали результаты моделирования, приведенные в книге. AnyDynamics (<https://www.mvstudium.com/>).



	<a href="#">Практикум по моделированию систем автоматического регулирования</a>	Карташов Б. А. Шабаев Е. А. Козлов О. С. Щекатуров А. М.
	<a href="#">Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения</a>	Герман-Галкин С. Г. Карташов Б. А. Летвинов С. Н.
	<a href="#">Моделирование в электроприводе</a>	Калачев Ю. Н.
	<a href="#">Преобразователи автономных источников энергии</a>	Калачев Ю. Н. Александров А. Г.
	<a href="#">Применение программного пакета SimInTech для изучения теории автоматического управления</a>	Гайдук А. Р. Пьявченко Т. А.
	<a href="#">Методика моделирования динамики октокоптера</a>	Щекатуров А. М.
	<a href="#">Методика моделирования динамики паротурбинной установки</a>	Щекатуров А. М. Корсаков А. Р.

Рис. 24. Книги разработчиков среды SimInTech

В проекте MvStadium нет специального приложения, аналогичного App Designer: Matlab+Simulink, для построения лабораторий, но один из пользовательских интерфейсов среды Anydynamics — интерфейс «Объект общего вида» (рис. 25) позволяет создавать дополнительную машину состояний (карту поведения), управляющую поведением исследуемого объекта.

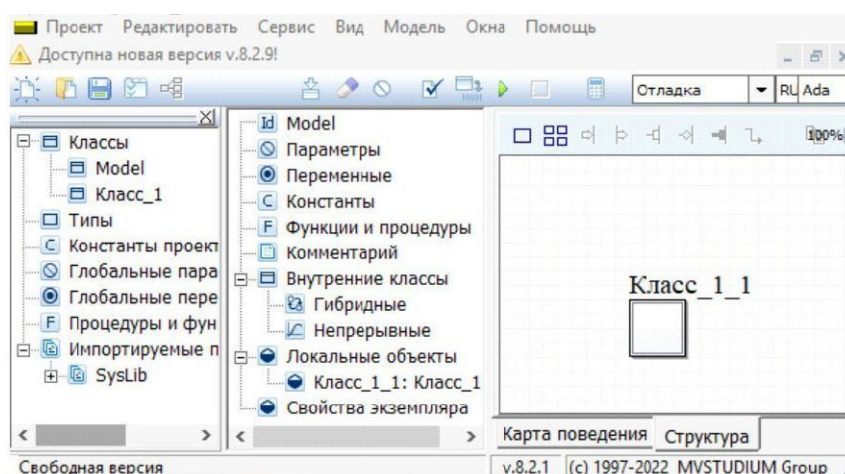


Рис. 25. Карта поведения (машина состояний) управляет ходом эксперимента с экземпляром класса Класс\_1 (лабораторная установка)

Машины состояний для управления поведением моделей использует и Ptolemy II [65–68] (рис. 26).

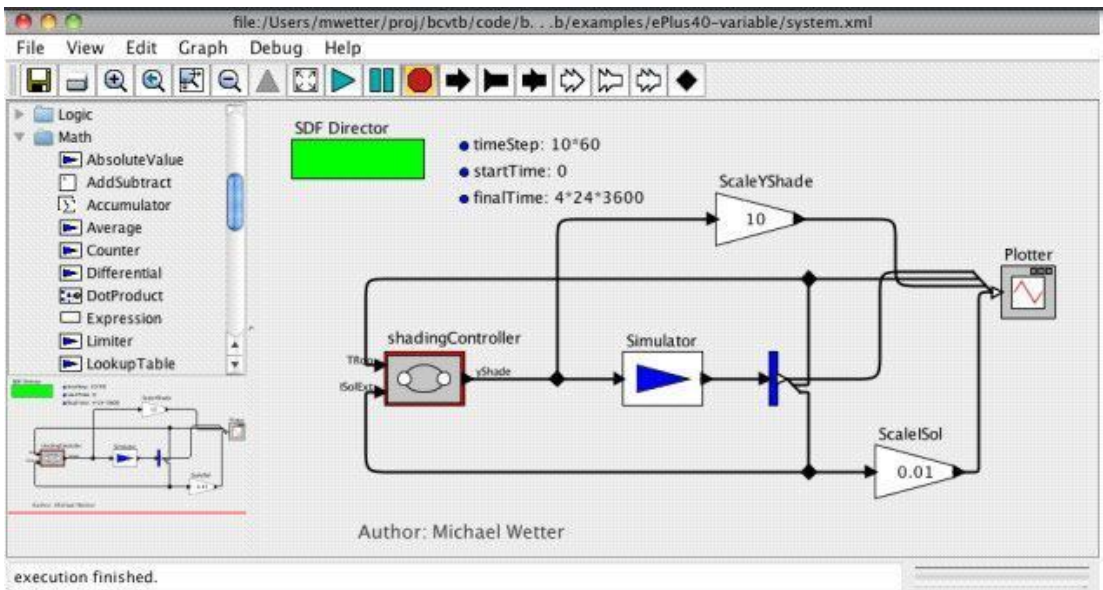


Рис. 26. Использование машин состояний в Ptolemy II

Первые виртуальные лаборатории в среде MvStudium, предшественнице Anydynamics, были созданы в 90-х годах прошлого столетия. По ссылке [64] можно найти примеры из работы Г. Н. Петрова «Компьютерное моделирование механических систем в среде «Model vision» (рис. 27).

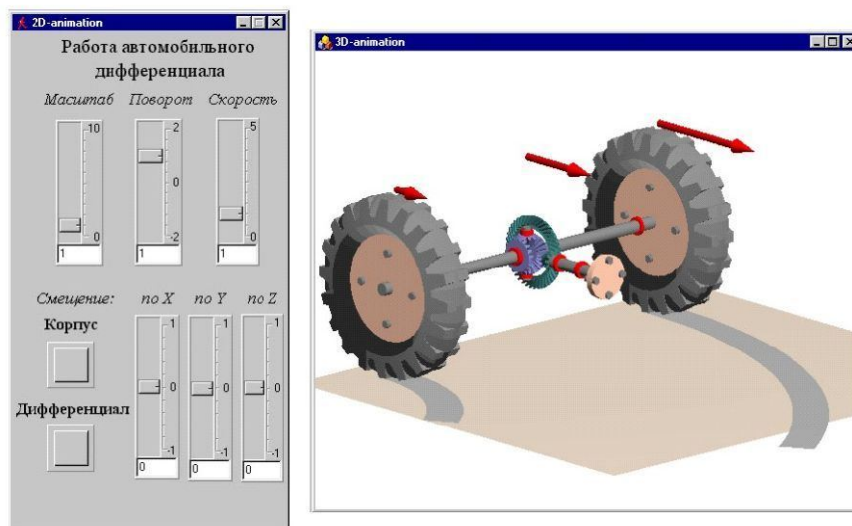


Рис. 27. Работа автомобильного дифференциатора

В работах Е. С. Гебель и Е. И. Солонина [33, 34] можно найти описание виртуальных лабораторий для изучения плоских рычажных механизмов (курс «Теория механизмов и машин»).

Промышленные варианты среды AnyDynamics использовались для разработки морских тренажеров (<http://transas.ru/>) и моделей систем физической защиты (рис. 28) (<https://www.cctv.ru/>), с помощью которых можно имитировать нападения злоумышленников и ответные действия охраны.

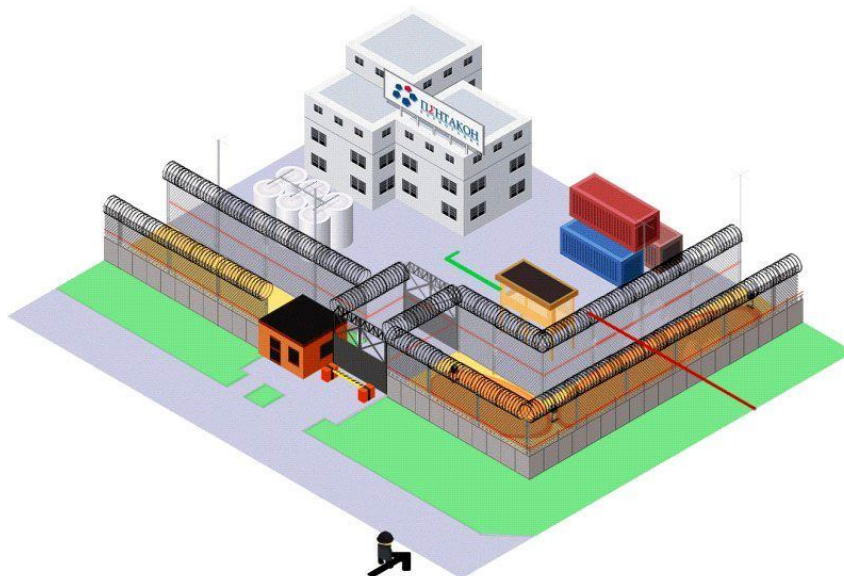


Рис. 28. Цифровой двойник охраняемого объекта

Другие примеры использования среды в учебном процессе можно найти в работе [70].

## 10. ПУБЛИЧНАЯ БИБЛИОТЕКА ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

График роста числа публикаций (рис. 1) показывает, что интерес к виртуальным лабораториям только возрастает, и, как следует из статей [3, 29–33], они стали повседневным инструментом педагога. Более того, появились различные инструменты разработки виртуальных лабораторий, и педагоги могут самостоятельно разрабатывать нужные им библиотеки. Разработка библиотек — не тривиальная научная задача (тематика, форма, юридические правила использования материалов, оценка востребованности) и пока еще достаточно трудоемкая работа. Из приведенных примеров видно, что число библиотек, как общедоступных, так и коммерческих, стремительно возрастает. Для облегчения их использования целесообразно разработать стандарт и попытаться ему следовать при разработке новых виртуальных лабораторий. Этот стандарт должен включать и требования к электронным материалам, сопровождающим библиотеки [67–69, 72].

Редакция журнала «Компьютерные инструменты в образовании» предлагает заинтересованным авторам электронных учебных материалов, связанных с виртуальными лабораториями, начать обсуждение принципов создания публичных библиотек, проблемы стандартизации лабораторий, сформировать каталог существующих библиотек и инструментов для создания библиотек.

## Список литературы

1. *Raghu R. Krishnashree A., Vinith K. N., Prema N.* Virtual Laboratories a historical review and bibliometric analysis of the past three decades // *Education and Information Technologies*. 2022. Vol. 27, № 8. P. 11055–11087. doi: 10.1007/s10639-022-11058-9
2. *Трухин А. В.* Об использовании виртуальных лабораторий в образовании // *Открытое и дистанционное образование*. 2002. № 4 (8). С. 81–82.
3. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева. Virtual Laboratory — виртуальная лаборатория. URL: [https://kai.ru/documents/683568/1374382/V\\_VLab.pdf](https://kai.ru/documents/683568/1374382/V_VLab.pdf) (дата обращения: 20.10.2022).
4. *Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б., Инихов Д. Б.* MvStudium в учебном процессе // *Компьютерные инструменты в образовании*. 2007. № 6. С. 32–38.
5. *Бирюков С. В., Гуськов Д. Н.* Лабораторный практикум по общей физике при дистанционном обучении — эксперимент виртуальный и реальный // *Материалы Международной конференции «Информационные технологии в образовании «ИТО-2003»*. Ч. 2. С. 68–69.
6. *Белов В. В., Образцов И. В., Иванов В. К., Коноплев Е. Н.* Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2015. 108 с.
7. *Образцов И. В., Белов В. В.* Виртуальные тренажеры в практике технического образования. Тверь: ТвГТУ. URL: <http://cdokp.tstu.tver.ru/site.services/download.aspx?act=1&did=89791&dbid=marcmain> (дата обращения: 20.10.2022).
8. *Сергеев С. Ф.* Виртуальные тренажеры: проблемы теории и методологии проектирования // *Биотехносфера*. 2010. №2 (8). С. 15–20.
9. *Кафтрев А. Ф.* Компьютерные программы по физике для средней школы // *Компьютерные инструменты в образовании*. 1999. № 1. С. 42–47.
10. *Водопьян Г. М.* Компьютерная лаборатория для предметов естественно-математического цикла // *Компьютерные инструменты в образовании*. 1999. № 1. С. 31–34.
11. ИЦ «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ. ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения». URL: <https://fea.ru/article/gost-c-d> (дата обращения: 20.10.2022).
12. *Mark Asch.* A toolbox for digital twins: from model-based to data-driven. SIAM, 2022.
13. *AIAA Digital Engineering Integration Committee.* DIGITAL TWIN: DEFINITION & VALUE. An AIAA and AIA Position Paper. 15 с. [https://www.aiaa.org/docs/default-source/uploadedfiles/issues-and-advocacy/policy-papers/digital-twin-institute-position-paper-\(december-2020\).pdf](https://www.aiaa.org/docs/default-source/uploadedfiles/issues-and-advocacy/policy-papers/digital-twin-institute-position-paper-(december-2020).pdf) (дата обращения: 20.10.2022).
14. *Davila Delgado, J. M., & Oyedele, L.* (2021). Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 49, 101332. doi:10.1016/j.aei.2021.101332
15. *Зуйкова А.* Что такое цифровые двойники и где их используют? 2021. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb> (дата обращения: 20.10.2022).
16. *Ashtarout Ammar, Hala Nassereddine, Nadine AbdulBaky, Anwar AbouKansour, Juliano Tannoury, Harald Urban and Christian Schranz.* Digital twins in the construction industry: a perspective of practitioners and building authority. *Frontiers in Built Environment*. June 2022, volume 8, article 834672. *Frontiers in Built Environment*
17. *Крейдли Е. Ю.* Система управления DeltaV – от управления процессами к обучению операторов // *Автоматизация в промышленности*. 2016. № 3. С. 13–16.
18. *Костылев В. В.* Компьютерные тренажеры в обучении персонала на нефтегазовом производстве // *Вестник науки*. 2020. № 5 (26) С. 234–236.
19. *Дудырев Ф. Ф., Максименкова О. В.* Симуляторы и тренажеры в профессиональном образовании: педагогические и технологические особенности // *Вопросы образования/Educational Studies*. Moscow. 2020. №36 С. 255–276.
20. *Бутиков Е. И.* Движение космических тел в компьютерных моделях. I. Задача Кеплера // *Компьютерные инструменты в образовании*. 2001. № 3-4. С. 20–44.
21. *Бутиков Е. И.* Движение космических тел в компьютерных моделях. II. Задача многих тел //



- Компьютерные инструменты в образовании. 2001. № 5. С. 4–22.
22. «Виртуальная лаборатория движения космических тел», комплект дискет к журналу «Компьютерные инструменты в образовании», № 3–4, 2001 г., стр. 20–44.
  23. *Christian W., Belloni M.* Physlets: Teaching Physics with Interactive Curricular Material. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
  24. *Christian W., Belloni M.* Physlet Physics. Prentice Hall, 2004.
  25. *Кристиан В., Беллони М., Денци М., Кох А.* Интерактивные учебные материалы на основе физлетов // Компьютерные инструменты в образовании. 2003. № 5. С. 30–41.
  26. *Kevin M. Lee, Gayle Nicoll and David W. Brooks.* A Comparison of Inquiry and Worked Example Web-Based Instruction Using Physlets. Journal of Science Education and Technology Vol. 13, No. 1 (Mar., 2004), P. 81–88 (8 pages) Published By: Springer. <https://www.jstor.org/stable/40186692> (дата обращения: 20.10.2022).
  27. *Фомичева Е. Е.* Виртуальные лабораторные работы в дистанционном обучении физике // Мир науки, культуры, образования. 2022. № 1 (92). С. 65–69.
  28. *Козловский Е. О., Кравцов Г. М.* Мультимедийная виртуальная лаборатория по физике в системе дистанционного обучения. Proceedings of the 5th Workshop on Cloud Technologies in Education Kyyvyi Rih, Ukraine, April 28, 2017. С. 42–53.
  29. *Троицкий Д. И., Дикова Е. Е.* Виртуальные лабораторные работы в естественнонаучном образовании // Сборник научных статей XVIII Объединенной конференции «Интернет и современное общество» IMS-2015, Санкт-Петербург, 23–25 июня 2015 г. © Университет ИТМО. С. 121–129.
  30. *Исунц Д. Д.* Разработка виртуальной среды для выполнения учебных и лабораторных работ // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2019», 22–24 мая 2019 г. С. 271–273. [https://storage.tusur.ru/files/127272/2019\\_2.pdf](https://storage.tusur.ru/files/127272/2019_2.pdf) (дата обращения: 20.10.2022).
  31. *Никулина Т. В., Стариченко Е. Б.* Виртуальные образовательные лаборатории: принципы и возможности // Педагогическое образование в России. 2016. № 7. С. 62–66.
  32. *Дмитриев В. М., Гембух Л. А.* Концептуальная модель реально-виртуальной лаборатории // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 5–16. doi: 10.14529/ctcr22020
  33. *Солонин Е. В., Гебель Е. С.* Лабораторные работы по курсу «Моделирование систем». Дисциплина «Моделирование систем», спец. 22031, 220401, 4 курс, ДО, ВО, ЗО. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007
  34. *Гебель Е. С., Солонин Е. В.* Моделирование как инструмент изучения дисциплины «Теория механизмов и машин» // Компьютерные инструменты в образовании. 2008, № 5. С. 37–44.
  35. *Borutzky W.* Bond graph modelling of engineering systems. Theory, applications and software support. NY, Springer. 2011. doi:10.1007/978-1-4419-9368-7
  36. MathWorks. Virtual Labs and Projects with MATLAB and Simulink. <https://www.mathworks.com/academia/online-teaching/virtual-labs.html> (дата обращения: 20.10.2022).
  37. *Дмитриев В. М., Гембух Л. А.* Концептуальная модель реально-виртуальной лаборатории // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 5–16. doi: 10.14529/ctcr22020.
  38. *Neeraj Kumar Reddy Dantu, Nived Chebrolu.* Virtual Labs-Analog Experiments and Applications of Labview: virtual lab experiments using Labview. LAP LAMBERT Academic Publishing (April 30, 2012). <https://www.amazon.com/Virtual-Labs-Analog-Experiments-Applications-Labview/dp/3848480018> (дата обращения: 20.10.2022).
  39. *Prakash B. S., Sree M.L., Saranya R.S., Karthik R.* Design and implementation of virtual laboratory using labview and myDAQ, International Journal of Mechanical Engineering and Technology. Т. 8. 744–748. 2017.
  40. *Краснянский М. Н.* Разработка школьных виртуальных лабораторий на базе среды программирования LabView. 2012. URL: [https://www.studmed.ru/krasnyanskiy-m-n-razrabotka-shkolnyh-virtualnyh-laboratoriy-na-baze-sredy-programirovaniya-labview\\_3c2ead835ee.html](https://www.studmed.ru/krasnyanskiy-m-n-razrabotka-shkolnyh-virtualnyh-laboratoriy-na-baze-sredy-programirovaniya-labview_3c2ead835ee.html)
  41. *Белов М. П.* Компьютерные методы исследования с визуализацией динамических процессов



- в автоматизированных электромеханических комплексах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 4. С. 67–74.
42. Байбулов А. К., Ивануцкая Н. В., Казагачев В. Н. Виртуальные лабораторные работы в инженерной среде LabView // Вестник казахско-русского международного университета. 2016. Т. 3. С. 134–136.
  43. Монахов В. В., Огинец О. В., Жоголь С. Н., Яковлева М. Г. Создание виртуальных приборов и программирование устройства сбора данных NI myDAQ в среде LABVIEW: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. СПб: ЛЕМА, 2017. 131 с.: ил.
  44. Carla Martin-Villalba, Alfonso Urquia, Sebastian Dormido An approach to virtual-lab implementation using Modelica // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, vol. 14, no. 4, Aug. 2008, pp. 341–60. doi:10.1080/13873950701846712
  45. Martin-Villalba Carla, Manzur Maria Eugenia, Urquia Alfonso. Virtual lab in Modelica for air population control // Computer tools in education. no. 1, pp. 5-15, 2018.
  46. Carla Martin-Villalba, Alfonso Urquia, S. Dormido, Félix Martinez. Implementation in Modelica of a virtual-lab for testing washing machine designs.
  47. Carla Martin-Villalba, Alfonso Urquia, Sebastian Dormido. Development of an industrial boiler virtual-lab for control education using Modelica. Computer application in engineering education. Volume 21, Issue 1, 2013, p. 36-45. doi:10.1002/cae.20449
  48. Urquia A., C. Martin Villalba. Modeling and simulation in Engineering using Modelica. Madrid, Spain, UNED Editorial, 2018
  49. Urquia A., C. Martin Villalba, M. Rubio Gonzalez, M. Sanz Prat. Simulation practice with Modelica. Madrid, Spain, UNED Editorial, 2018
  50. Сениченков Ю. Б. Книги проекта Inmotion: «Новые стратегии обучения инженеров с использованием сред визуального моделирования и открытых учебных платформ». Компьютерные инструменты в образовании, 2018. № 5: 52–68.
  51. Carla Martin-Villalba, Alfonso Urquia. An approach to develop collaborative virtual labs in Modelica. IEEE Access, vol. 10, 2022, pp. 58938–49. doi:10.1109/access.2022.3179712
  52. Carla Martin-Villalba, Alfonso Urquia, Sebastian Dormido. Development of virtual training simulators with Modelica. SCSC '10: Proceedings of the 2010 Summer Computer Simulation Conference. July 2010, Pages 413–418.
  53. Carla Martin and Alfonso Urquia and José Sánchez and Sebastián Dormido and Francisco Esquembre and José Luis Guzmán and Manuel Berenguel. Interactive simulation of object-oriented hybrid models, by combined use of EJS, Matlab/Simulink and Modelica/Dymola. In Proc. 18th European Simulation Multiconference, pp. 210-215. 2004.
  54. К. Мартин-Виллалба, А. Уркия. Новые свойства библиотеки Interactive, основанной на языке программирования Modelica. Университетский научный журнал №22 (физико-математические, технические и биологические науки), С. 37–48. 2016.
  55. Чирцов А. С., Никольский Д. Ю., Брильянтов В. А., Ванькович И. В. Использование физическо-объектно-ориентированного моделирования для развития индивидуализированного обучения и организации мини-исследований в курсах механики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 201–214. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-201-214
  56. Маликов Р. Ф. Основы разработки компьютерных моделей сложных систем. Уфа: Изд-во БГПУ, 2012. 256 с.
  57. Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с., ил.
  58. Peter Fritzson, Vadim Engelson, Johan Gunnarsson. An integrated Modelica environment for modeling, documentation and simulation. in Proceedings of The 1998 Summer Computer Simulation Conference (SCSC '98) July 19-22, 1998, Reno, Nevada. pp. 308–313.
  59. Veselina Nedeva, Zlatin Zlatev, Svetoslav Atanasov Trakia. Virtual lab for systems modeling and simulation. // Applied Researches in Technics, Technologies and Education Journal of the Faculty of Technics and Technologies, Trakia Universityhttps. Vol. 1, No. 1, pp. 26–30. 2013

60. Vladimir Ryzhov, Tatiana Fedorova, Kirill Safronov, Shaharin Anwar Sulaiman,, Mark Ovinis & Veeradasan Perumal. Guidelines for Performing Virtual Labs in Wolfram SystemModeler. Modeling and Simulation of Complex Dynamical Systems pp 91–168, 2021. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-3053-8\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-3053-8_2) (дата обращения: 20.10.2022).
61. Ляцев А. В., Кондратьев А. С. Физика. Задачи на компьютере. Издательство ФИЗМАТЛИТ, 2008. 400 с.
62. Центр цифровых образовательных ресурсов — структурное подразделение Национального исследовательского Томского политехнического университета. [https://portal.tpu.ru/ceor/v\\_lab](https://portal.tpu.ru/ceor/v_lab) (дата обращения: 20.10.2022).
63. ITMO.Expert. Коллекция виртуальных лабораторных работ. Часть 1. [http://expert.itmo.ru/lab\\_list](http://expert.itmo.ru/lab_list) (дата обращения: 20.10.2022).
64. Г. Н. Петров компьютерное моделирование механических систем в среде «Model vision» Пакет «Model Vision» <https://auto-dnevnik.com/docs/index-6360.html> (дата обращения: 20.10.2022).
65. Michael Wetter. Co-Simulation of Building Energy and Control Systems with the Building Controls Virtual Test Bed. *Journal of Building Performance Simulation*, 4(3):185-203, 2011.
66. Gauthier Quesnel, Raphaël Duboz. The Virtual Laboratory Environment – An operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, no. 4, pp. 641–653, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.simpat.2008.11.003.
67. Fabio Cremona, Marten Lohstroh, Stavros Tripakis, Christopher Brooks, Edward A. Lee. FIDE – An FMI Integrated Development Environment. Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on Applied Computing, pp. 1759–1766, 2016, doi: 10.1145/2851613.2851677
68. Steffen Peter, Farshad Momtaz and Tony Givargis. From the Browser to the Remote Physical Lab: Programming Cyber-physical Systems. Peter, S., Momtaz, F., & Givargis, T. (2015, October). From the browser to the remote physical lab: Programming cyber-physical systems. In Proc. 2015 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) pp. 1-7. 2015.
69. D.A. Manrique Negrin. Using Ptolemy II as a Framework for Virtual Entity Integration & Orchestration in Digital in *Twins. MODDIT 2021 WORKSHOP AT MODELS 2021, OCTOBER 12TH*. [https://gemoc.org/pub/moddit21/2021.10.08.Paper\\_Ptolemy\\_framework\\_for\\_integration.pdf](https://gemoc.org/pub/moddit21/2021.10.08.Paper_Ptolemy_framework_for_integration.pdf) (дата обращения: 20.10.2022).
70. Маликов Р. Ф. Компьютерное моделирование динамических систем в среде rand model designer: учебное пособие для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2022. 223 с.
71. Dongfeng Liu, Priscila Valdiviezo-Díaz, Guido Riofrio, Yi-Meng Sun, Rodrigo Barba. Integration of Virtual Labs into Science E-learning. *Procedia Computer Science*, vol. 75, pp. 95–102, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.12.224

Поступила в редакцию 26.07.2022, окончательный вариант — 20.10.2022.

**Сениченков Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор высшей школы «Программная инженерия» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, ✉ [senyb@dcn.icc.spbstu.ru](mailto:senyb@dcn.icc.spbstu.ru)**