

УДК 004.94(048.8)

Н.М. Дубинин, Л.А. Гембух

Сравнительный анализ инструментальных систем математического моделирования

Представлен расширенный сравнительный анализ современных программных средств, предназначенных для моделирования различных процессов и систем в широком диапазоне областей – от физики, химии и математики до электротехники и систем управления. Рассматриваются как коммерческие, так и открытые программные платформы, включая COMSOL Multiphysics, Ansys Fluent, MatLab/Simulink, OpenFOAM, DWSIM, LTSpice и др. Особое внимание уделено классификации систем моделирования по области применения, типу лицензирования, уровню абстракции и используемым парадигмам моделирования. Статья подробно анализирует особенности и архитектуру двух российских систем моделирования – MAPC и SimInTech, их функциональные возможности, интеграционные решения, лицензирование, документацию и области применения. Выполнен сравнительный анализ этих отечественных решений с зарубежными аналогами, выявлены их преимущества, недостатки и потенциальные ниши применения. Также обсуждаются ключевые тенденции в развитии средств моделирования, включая рост значимости открытого программного обеспечения, развитие цифровых двойников, интеграцию с ИИ и облачными платформами, а также стандартизацию через такие инициативы, как Modelica, FMI и CAPE-OPEN. Статья представляет интерес как для исследователей и инженеров, так и для преподавателей и студентов технических направлений.

Ключевые слова: системы моделирования, моделирование, компьютерное моделирование, динамическое моделирование, моделирование физических процессов, инструментальные средства моделирования математических систем, моделирование электрических систем.

DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-3-97-114

Актуальность и значение моделирования

Моделирование является неотъемлемой частью современных научных исследований и инженерного проектирования. Оно предоставляет исследователям и инженерам мощный инструмент для анализа сложных систем, прогнозирования их поведения в различных условиях и оптимизации параметров без проведения дорогостоящих и зачастую труднореализуемых натурных экспериментов [1]. Крупные разработчики на протяжении десятилетий используют компьютерное моделирование для анализа и коррекции проектов на ранних стадиях, еще до выпуска первых прототипов, что позволяет значительно сократить время и затраты на разработку новой продукции [2].

Возрастающая сложность моделируемых объектов и процессов, охватывающих мультифизические взаимодействия и комплексные системы управления, обуславливает необходимость использования специализированных программных сред, способных адекватно описывать и анализировать такие системы. Таким образом, развитие и применение эффективных систем моделирования напрямую влияет на темпы научно-технического прогресса и конкурентоспособность в различных отраслях промышленности. Этот спрос на инструменты моделирования обусловлен не только усложнением технических систем, но и насущной необходимостью сокращения циклов разработки и оптимизации затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР).

Основной целью данной статьи является сравнение инструментальных систем моделирования, предназначенных для исследования физических, химических, математических, электрических и других процессов и систем. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- провести классификацию современных программных систем моделирования по основным признакам: области применения, типу лицензии, парадигме моделирования и уровню абстракции;

- выполнить обзор и анализ ключевых отечественных и зарубежных программных систем моделирования, применяемых в различных технических и научных областях;

- представить детализированное описание архитектуры, функциональных возможностей и областей применения российских систем моделирования MAPC и SimInTech;

- сравнить MAPC и SimInTech с зарубежными аналогами с позиции универсальности, интеграционных возможностей, доступности и соответствия современным требованиям;

- обобщить современные тенденции развития инструментальных систем моделирования, включая роль открытого ПО, развитие цифровых двойников, облачные решения и стандартизацию;

- сформулировать рекомендации по выбору среды моделирования в зависимости от типа задач, особенностей пользователя и контекста применения.

Классификация и общая характеристика систем моделирования

Современные системы моделирования представляют собой широкий спектр программных продуктов, которые можно классифицировать по различным признакам, что помогает ориентироваться в их многообразии и выбирать наиболее подходящий инструмент для конкретной задачи. Основные подходы к классификации включают:

- *По области применения.* Это один из наиболее распространенных способов группировки. Системы

могут быть ориентированы на моделирование физических процессов (например, механики, гидрогазодинамики, теплопередачи) [3], химических реакций и технологий [4], математических и абстрактных систем [1], электрических и электронных схем и устройств [2], энергетических систем, экономических моделей, биологических процессов и многих других. Существуют также мультифизические системы, позволяющие моделировать взаимодействия между явлениями различной природы. Следует отметить, что в данной работе намеренно **не вводятся жёсткие ограничения по области применения** рассматриваемых программных сред моделирования. Это обусловлено тем, что значительная часть современных инструментов моделирования является **междисциплинарными по своей природе** и используется как в технических и инженерных отраслях, так и в смежных научных направлениях – например, в химии, биотехнологии, энергетике, автоматизации и др. Такой подход позволяет более объективно охарактеризовать универсальность и гибкость систем моделирования, особенно в условиях стремительно растущей сложности технических и киберфизических систем. При этом основной акцент в обзоре всё же сделан на **технические и инженерные приложения**, что отражается в выборе примеров, описании функциональных возможностей систем и критериях сравнения.

– **По парадигме моделирования**: современные программные системы реализуют различные парадигмы моделирования, определяющие подход к представлению, структуре и динамике исследуемых систем.

Наиболее распространённые парадигмы включают:

– **дискретно-событийное моделирование** – описывает поведение системы как последовательность дискретных событий во времени, часто используется в логистике, телекоммуникациях и системах обслуживания;

– **агентное моделирование** – система рассматривается как совокупность автономных агентов, взаимодействующих между собой по заданным правилам;

– **системная динамика** – основана на моделировании потоков и обратных связей в непрерывных системах, широко применяется в экономике, социологии, экологии;

– **объектно-ориентированное моделирование** – предполагает построение модели из объектов с определёнными свойствами и методами, удобно для иерархичных и сложных технических систем;

– **блочнo-ориентированное моделирование** – используется для моделирования структур управления, где поведение системы описывается с помощью функциональных блоков;

– **онтологическое моделирование** – применяется для формализации предметной области через систему понятий, связей и правил, особенно актуально в интеллектуальных и семантических системах;

– **моделирование на основе компонентных цепей** – используется в средах, таких как MAPS, и предполагает построение моделей на основе взаимосвязанных компонент с различными потоками взаимодействий;

– **моделирование на основе унифицированных языков** (например, UML) – применимо при разработке сложных программно-аппаратных систем, акцентирует внимание на структурных и поведенческих аспектах.

Выбор конкретной парадигмы определяется характером моделируемого объекта, задачами исследования и предпочтениями разработчиков. Многие современные среды поддерживают мультипарадигменный подход, позволяя комбинировать различные методы в рамках одной модели.

– **По типу лицензии**: системы моделирования могут быть коммерческими (проприетарными), требующими приобретения лицензии [7], свободно распространяемыми с открытым исходным кодом (open-source) [8] или бесплатными (freeware), но с закрытым кодом [9]. Тип лицензии существенно влияет на доступность, стоимость и возможности модификации программного обеспечения;

– **По уровню абстракции**: моделирование может выполняться на различных уровнях детализации – от микроскопического описания физических явлений до макроскопического системного уровня. Некоторые системы специализируются на определенном уровне абстракции, другие позволяют работать с многоуровневыми моделями.

Моделирование физических процессов

Моделирование физических процессов охватывает широкий спектр явлений, включая механику твердого тела и деформируемого твердого тела, гидрогазодинамику, теплопередачу, акустику, электромагнетизм и оптику. Ключевой концепцией в этой области часто является вычислительная гидродинамика (CFD), позволяющая строить виртуальные модели процессов или устройств и решать базовые уравнения, описывающие физические и химические механизмы [3].

При моделировании физических систем важно различать модели с распределенными параметрами, где свойства системы изменяются в пространстве, и модели с сосредоточенными параметрами, где система рассматривается как набор дискретных элементов [10]. Среди популярных систем для моделирования физических и мультифизических процессов выделяются:

– COMSOL Multiphysics – мощная платформа для мультифизического моделирования, позволяющая связывать различные физические явления в одной модели. Широко используется в научных исследованиях и промышленности [11];

– AnsysFluent – один из лидеров в области CFD, предназначенный для моделирования течений жидкостей и газов, теплообмена и химических реакций. Обладает широким набором моделей турбулентности и многофазных течений [12];

– OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) – свободно распространяемый пакет с открытым исходным кодом для CFD. Предоставляет пользователям большую гибкость и возможность модификации, популярен в академической среде и для исследовательских задач [8].

Моделирование химических процессов

Моделирование химических процессов и технологий направлено на анализ и оптимизацию химических реакций, расчет материальных и энергетических балансов, проектирование и анализ работы химического оборудования [13]. Важным аспектом являются моделирование кинетики химических превращений и гидродинамики потоков в реакторах и аппаратах [4]. К известным системам моделирования химических процессов относятся:

– Aspen Plus – отраслевой стандарт для моделирования химико-технологических процессов в нефтегазовой, химической и нефтехимической промышленности. Обладает обширной базой данных по свойствам веществ и моделям оборудования [14];

– ChemCAD – интегрированный пакет программ для моделирования химических процессов, включающий расчеты термодинамических свойств, фазовых равновесий, работы ректификационных колонн, реакторов и другого оборудования [15];

– DWSIM – бесплатная система моделирования химических процессов с открытым исходным кодом, поддерживающая стандарт CAPE-OPEN. Предоставляет широкий набор инструментов для моделирования различных операций и термодинамических расчетов [16];

– AnsysChemkin – специализированное программное обеспечение для моделирования сложных химических реакций, горения и образования частиц [17].

Инструментальные средства моделирования математических систем

Системы математического моделирования общего назначения предоставляют инструменты для решения широкого круга задач – от численных расчетов и символьных преобразований до разработки алгоритмов и визуализации данных. **Математические системы** – это абстрактные модели, описывающие поведение объектов и процессов с помощью математических средств. Математическое моделирование включает в себя различные виды, отличающиеся подходами к представлению исследуемых систем. Среди наиболее распространенных видов можно выделить:

– **объектно-ориентированное моделирование** – основано на представлении системы в виде взаимодействующих объектов с заданными свойствами и поведением, что упрощает разработку сложных и иерархичных моделей;

– **имитационное моделирование** – позволяет воспроизводить поведение системы во времени, особенно эффективно для дискретных и стохастических процессов (например, систем массового обслуживания);

– **унифицированный язык моделирования (UML)** – используется для визуализации, специфика-

ции и документирования архитектуры программных и технических систем; сочетает графические нотации и формальные методы;

– **логическое моделирование** – применяется для описания систем с дискретным поведением, где важны логическая структура и правила переходов (например, в цифровой электронике и теории автоматов);

– **онтологическое моделирование** – используется для формального описания предметной области с помощью понятий, связей и аксиом; активно применяется в интеллектуальных системах и семантическом моделировании.

Системы математического моделирования представляют собой совокупность взаимосвязанных элементов, для которых определены математические зависимости (например, уравнения, логические правила, алгоритмы). Они находят применение в инженерных дисциплинах, экономике, финансах, биологии и других областях [1]. Наиболее распространенные представители этого класса:

– MatLab/Simulink (MathWorks) – интегрированная среда для технических вычислений, программирования и моделирования. MatLab предоставляет язык высокого уровня и интерактивную систему для численного анализа, визуализации данных и разработки алгоритмов. Simulink является графической средой для моделирования динамических систем и систем управления на основе блок-схем [10];

– GNU Octave – свободно распространяемая программа с открытым исходным кодом, предоставляющая язык высокого уровня, во многом совместимый с MATLAB, для численных расчетов [18];

– Scilab/Xcos – бесплатная программная система с открытым исходным кодом для инженерных и научных расчетов. Scilab предоставляет вычислительную среду, а Xcos – графический редактор для моделирования динамических систем по аналогии с Simulink [19];

– OpenModelica – свободно распространяемая система моделирования с открытым исходным кодом, основанная на объектно-ориентированном языке Modelica, который предназначен для моделирования сложных физических систем [20].

Популярность систем с открытым исходным кодом в этой категории, таких как GNU Octave, Scilab и OpenModelica, объясняется не только их бесплатностью, но и предоставляемой гибкостью, возможностью модификации под специфические нужды пользователя и активной поддержкой со стороны сообщества. Это делает их привлекательными инструментами для академической среды и научно-исследовательских работ, где часто возникают нестандартные задачи, требующие адаптации программных средств.

Моделирование электрических и электронных систем

Моделирование в этой области включает анализ аналоговых и цифровых электрических цепей, разработку электронных устройств, моделирование работы микроконтроллеров и ПЛИС, а также проектирование печатных плат [2]. Среди инструментов для

моделирования электрических и электронных систем можно выделить:

- LTSpice (Analog Devices) – бесплатный, высокопроизводительный SPICE-симулятор, широко используемый для моделирования аналоговых схем, особенно источников питания и линейных стабилизаторов [9];

- NI Multisim (National Instruments) – интегрированная система для моделирования схем и проектирования печатных плат, популярная в образовании и промышленности. Позволяет моделировать аналоговые, цифровые и смешанные схемы [21];

- Proteus Design Suite (Labcenter Electronics) – комплексное решение для проектирования электроники, включающее средства схематического моделирования (в том числе микроконтроллеров) и трассировки печатных плат [22];

- KiCad EDA – свободно распространяемый кроссплатформенный пакет программ для автоматизации проектирования электронных устройств (EDA), включающий редактор схем, редактор печатных плат и 3D-визуализатор [23].

Моделирование энергетических систем

Специализированные системы для моделирования энергетических систем предназначены для анализа стационарных и переходных процессов в электроэнергетических системах, расчета потоков распределения, устойчивости, коротких замыканий и электромагнитных переходных процессов.

PSCAD (Power Systems Computer Aided Design): программный комплекс для моделирования электромагнитных переходных процессов в энергосистемах. Широко используется для анализа работы устройств силовой электроники (HVDC, FACTS), интеграции возобновляемых источников энергии и исследования сложных явлений в сетях [24].

Система моделирования MAPC (ТУСУР)

Архитектура и основные принципы работы. В основе системы MAPC лежит метод компонентных цепей (МКЦ) [25]. Этот метод предполагает декомпозицию сложной системы на отдельные компоненты с последующей их сборкой в единую системную модель. Модели объектов представляются в формате компонентных цепей, что позволяет описывать их структуру и взаимодействия между элементами [25, 26]. Ключевой особенностью архитектуры MAPC является поддержка многоуровневого моделирования [7, 25]. Это означает, что исследование сложных технических объектов и их виртуальных аналогов может проводиться на различных уровнях детализации – от физического до функционального. Для поддержки совместной работы и создания интерактивных тренажеров разработана клиент-серверная версия среды MAPC, позволяющая нескольким пользователям взаимодействовать с единой компьютерной моделью через локальные и глобальные вычислительные сети [27, 28]. Такая архитектура открывает возможности для организации дистанционных виртуальных лабораторий и коллективного выполнения вычислительных экспериментов [28].

Ключевые функциональные возможности и особенности. MAPC позиционируется как автоматизированная система научных исследований и графическая среда разработки приложений [7, 25]. Ее универсальность позволяет работать с мультифизическими объектами, объединяя в рамках одной модели механические, гидравлические, электротехнические, тепловые, управляющие и другие подсистемы [25].

Среди основных функциональных возможностей можно выделить:

- различные режимы анализа: временной анализ (расчет переходных процессов), частотный анализ, статистический анализ методом Монте-Карло, анализ чувствительности, параметрическая оптимизация и др. [25, 26];

- расширяемая библиотека компонентов: пользователи могут создавать собственные модели компонентов и пополнять существующие библиотеки [25, 26];

- виртуальные инструменты и приборы (СВИП): интегрированная система СВИП позволяет формировать виртуальные измерительные приборы, осуществлять сбор, интерпретацию и визуализацию результатов экспериментов [25, 26];

- интерактивный генератор отчетных форм (ИГОФ): средство для автоматизации процессов документирования результатов моделирования и управления технически сложными объектами [25];

- объектно-ориентированный подход: применяется при моделировании, что упрощает работу со сложными системами [25];

- поддержка различных типов потоков: в связях между компонентами могут использоваться энергетические, информационные и неоднородные векторные потоки [25].

Поддерживаемые операционные системы и системные требования. Система MAPC разработана для работы на персональных компьютерах под управлением операционных систем семейства Microsoft Windows, включая Windows XP, Vista, 7, 8, 10 и 11 [7, 26]. Аппаратной платформой является x86 [7]. Для корректной работы программного обеспечения также требуется наличие установленных компонентов, таких как Microsoft.NET Framework 3.5, MSXML 4.0 SP2, Microsoft Data Access Components 2.8 и Internet Explorer 5.0 или выше [26]. Ориентация на наиболее распространенную операционную систему Windows обеспечивает широкую доступность среды, однако отсутствие нативной поддержки других операционных систем, таких как Linux или macOS (несмотря на упоминание бета-версии для Linux на официальном сайте [7]), может являться ограничением для некоторых пользователей.

Лицензирование и доступность. Среда моделирования MAPC является проприетарным программным обеспечением [7, 25]. Это означает, что для ее использования необходимо приобретение лицензии у разработчика. Информация о стоимости лицензий в открытых источниках, как правило, отсутствует [7]. Для получения сведений о ценах и условиях приоб-

речения потенциальным пользователям следует обращаться напрямую к разработчикам в ТУСУР. На официальном сайте (se-mars.ru) в разделе публикаций имеется форма для скачивания программы, где пользователю предлагается указать свою принадлежность к одной из категорий (представитель компании, учебного заведения, преподаватель, студент/аспирант) [7]. Это может свидетельствовать о наличии гибкой ценовой политики и различных условий лицензирования для академических и коммерческих пользователей. Тем не менее проприетарный характер и необходимость индивидуального запроса цены являются стандартной практикой для многих специализированных программных продуктов, но могут создавать определенные барьеры для быстрой оценки и выбора ПО независимыми исследователями или небольшими организациями.

Области применения и примеры использования. Система МАРС находит широкое применение прежде всего в образовательном процессе и научных исследованиях.

– **Образование:** на базе МАРС созданы многочисленные виртуальные лабораторные работы по таким дисциплинам, как «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), «Электрические машины и элементы автоматики», «Электроника», «Системы автоматического управления» (САУ) [26, 30]. Это позволяет студентам получать практические навыки моделирования и анализа сложных систем в интерактивной среде.

– **Научные исследования:** МАРС используется для компьютерного исследования сложных технических объектов [25, 26], моделирования цифровых устройств и систем [30], разработки и анализа цифровых двойников [31], моделирования систем массового обслуживания (например, в банковской сфере, городском транспорте, логистике) [32, 33], моделирования физико-химических систем и процессов, включая оборудование нефтегазовой промышленности (например, процессы экстракции [34]) и ядерно-топливного цикла [35], а также для моделирования робототехнических комплексов, как, например, в проекте моделирования марсохода [28].

Примеры использования демонстрируют универсальность среды и ее применимость в различных областях техники и науки. Глубокая интеграция МАРС с учебным процессом ТУСУРа [30] обеспечивает постоянную апробацию и развитие системы, а также подготовку квалифицированных специалистов, владеющих данным инструментом. Однако такая тесная связь с конкретным вузом может потенциально означать, что некоторые специфические требования широкой промышленности могут быть не в фокусе разработки.

Интеграционные возможности. Система МАРС обладает возможностями интеграции с другими программными и аппаратными компонентами:

– система виртуальных инструментов и приборов (СВИП): обеспечивает сбор, интерпретацию и визуализацию результатов экспериментов [25, 26];

– интерактивный генератор отчетных форм (ИГОФ): автоматизирует создание документации по результатам моделирования [25];

– базы данных и базы знаний: МАРС может взаимодействовать с внешними базами данных для параметризации моделей и с базами знаний, содержащими производственные модели, для определения режимов функционирования реальных объектов [25];

– сетевое взаимодействие: клиент-серверная архитектура МАРС поддерживает сетевое взаимодействие, что позволяет создавать многопользовательские компьютерные тренажеры и распределенные виртуальные лаборатории для удаленного выполнения экспериментов через локальные и глобальные сети [27, 28].

Эти интеграционные возможности расширяют функциональность МАРС, позволяя создавать комплексные модельно-ориентированные решения.

Документация и поддержка. Пользователям системы МАРС доступна документация на русском языке, включая инструкции по работе с программой, снабженные примерами из различных областей техники, представленные в монографии [25] и на официальном сайте [7]. Значительный объем информации представлен в виде научных статей и монографий, опубликованных разработчиками и пользователями системы. Основными источниками информации являются официальный сайт проекта (se-mars.ru) и научно-образовательные ресурсы ТУСУРа (например, журналы «Доклады ТУСУР», портал edu.tusur.ru) [7]. Наличие русскоязычной документации и активная публикационная деятельность способствуют освоению и распространению системы, особенно в русскоязычном научно-образовательном пространстве.

Преимущества и недостатки. На основе анализа доступной информации можно выделить следующие преимущества системы МАРС:

– универсальность: способность моделировать мультифизические системы различной природы [25];

– оригинальный методологический подход: использование метода компонентных цепей и многоуровневого моделирования [25];

– ориентация на российскую науку и образование: разработка ведется в российском вузе, имеется русскоязычный интерфейс и документация, активно используется в учебном процессе [7, 25, 30];

– наличие виртуальных лабораторий: готовые решения для образовательных целей [26];

– интегрированные средства визуализации и документирования (СВИП, ИГОФ) [25, 26];

– длительный опыт разработки: свидетельствует о зрелости и проработанности системы [7, 25].

К недостаткам можно отнести:

– непрозрачность ценовой политики: отсутствие информации о стоимости лицензий в открытом доступе и необходимость прямого запроса к разработчикам [7], что создает барьер для независимых исследователей и малых предприятий;

– ограниченная информация о поддержке ОС: явно заявлена поддержка только Microsoft Windows,

что может быть неудобно для пользователей других операционных систем [7, 26];

– потенциальная узкая направленность: тесная связь с ТУСУРом может приводить к недостаточной ориентации на нужды широкой промышленности за пределами специфики вуза.

Система моделирования SimInTech

Архитектура и идеология. SimInTech представляет собой систему, предназначенную для детального исследования и анализа нестационарных процессов в сложных технических объектах и системах управления [36]. Идеология программы основана на модельно-ориентированном подходе к проектированию, где математическая модель объекта и система управления разрабатываются и тестируются совместно. Архитектурно SimInTech поддерживает создание структурированных проектов с использованием иерархии вложенных блоков и функциональных блок-схем для описания алгоритмов [39]. Важным элементом является объектно-ориентированная база данных сигналов проекта, которая обеспечивает обмен данными между различными частями комплексной модели и поддерживает векторную обработку сигналов [39].

Ключевые функциональные возможности. SimInTech обладает широким набором функциональных возможностей, ориентированных на решение комплексных задач моделирования и проектирования систем управления:

– разработка математических моделей: создание моделей объектов и процессов в различных физических доменах [39];

– проектирование алгоритмов управления: разработка и отладка алгоритмов управления на математической модели объекта [40];

– разработка интерфейсов управления (HMI): создание пользовательских интерфейсов для взаимодействия с моделью и управления процессом моделирования [39];

– автоматическая генерация кода: одной из ключевых особенностей является возможность генерации исполняемого кода на языках C и ST (Structured Text) для различных целевых платформ, включая промышленные логические контроллеры (ПЛК) таких производителей, как Schneider Electric, B&R, а также для систем реального времени (QNX/КПДА), операционных систем Linux и широкого спектра микроконтроллеров, в том числе отечественных (например, «Миландр») [36];

– обширные библиотеки стандартных блоков: SimInTech поставляется с большим набором готовых библиотек для моделирования теплогидравлических процессов, электротехнических систем, электрических приводов, силовых гидравлических и пневматических машин, механических взаимодействий, динамики полета летательных аппаратов, баллистики космических аппаратов, систем цифровой связи, обработки сигналов, нейронных сетей, нечеткой логики, а также специализированные блоки для моделирования работы микроконтроллеров и 3D-визуализации [37];

– создание цифровых двойников: инструментальный SimInTech позволяет разрабатывать цифровые двойники технических систем [40].

Способность к кодогенерации является существенным преимуществом, так как она обеспечивает плавный переход от этапа моделирования к реализации системы управления на реальном оборудовании, сокращая время и затраты на разработку и отладку.

Поддерживаемые операционные системы и системные требования. SimInTech является кроссплатформенным программным обеспечением. Официально поддерживаются операционные системы Microsoft Windows (версии 7, 8, 10) [36] и Linux [36]. Поддержка Linux включает и российские дистрибутивы, например, подтверждена совместимость с ОС «Альт Образования» [41]. Программа написана с использованием языков Delphi, C и C++ [36]. Поддержка различных операционных систем, включая отечественные, расширяет возможности применения SimInTech, особенно в контексте политики импортозамещения и в организациях, где использование Windows ограничено.

Лицензирование и доступность. SimInTech распространяется по проприетарной лицензии [36]. Для получения полнофункциональной версии программы разработчик предлагает установить демонстрационную версию и отправить запрос на лицензию непосредственно из интерфейса программы [39]. Информация о стоимости коммерческих и академических лицензий на официальном сайте в явном виде отсутствует или труднодоступна. Некоторые сторонние реселлеры указывают «цену по запросу» [42]. Данные о ценах, найденные на ресурсах smath.com [43] и Universal Mechanism [44], вероятно, относятся к другим продуктам или специализированным модулям, а не к базовой лицензии SimInTech. Информация о стоимости в презентации для SHS Conferences [45] представлена без достаточного контекста. Это создает значительные трудности для потенциальных пользователей в оценке стоимости и условий приобретения, особенно для академических учреждений. Такая непрозрачность ценовой политики и технические проблемы с доступом к ключевой информации на сайте являются существенным недостатком.

Области применения и примеры использования. SimInTech находит применение в широком спектре отраслей и для решения разнообразных инженерных задач:

– автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП): проектирование и отладка алгоритмов управления для промышленных объектов [46, 47]. Пример – использование с ПЛК FIMATIC [48];

– энергетика: моделирование ядерных и тепловых энергоустановок [36], электрических частей электростанций [49], паротурбинных установок [50];

– электропривод: проектирование и анализ систем управления электроприводами [37];

– робототехника и следящие системы: моделирование динамики и систем управления роботами [36];

- аэрокосмическая отрасль: моделирование динамики летательных аппаратов (например, октокоптеров [49]), баллистики космических аппаратов [50];
- транспорт: моделирование различных транспортных систем;
- создание тренажеров: разработка аналитических и полномасштабных тренажеров для обучения оперативного персонала в нефтегазовой, энергетической, транспортной и других сферах [50];
- цифровые двойники: применение для создания цифровых двойников сложных технических объектов [40];
- телекоммуникации: моделирование компьютерных сетей и протоколов обмена данными (UDP, TCP/IP) [51].

SimInTech активно позиционируется как отечественный конкурент западным аналогам [37] с фокусом на поддержку российских аппаратных платформ, что делает его привлекательным для проектов, ориентированных на импортозамещение и технологический суверенитет.

Интеграционные возможности. SimInTech обладает развитыми средствами интеграции с другими программными продуктами и аппаратными платформами:

- кодогенерация: автоматическая генерация кода для широкого спектра ПЛК и микроконтроллеров [36];
- обмен данными: внутренняя объектно-ориентированная база данных сигналов обеспечивает эффективный обмен данными между различными расчетными схемами в рамках комплексной модели [50];
- поддержка стандартов: реализована поддержка стандарта FMI (Functional Mock-up Interface) для импорта и экспорта моделей, что обеспечивает совместимость с другими FMI-совместимыми системами моделирования [52];
- интерфейсы с другим ПО: SimInTech может интегрироваться с такими популярными пакетами, как MATLAB, Simulink, Dymola, EULER, а также с российскими разработками PASHAP, TPP, Universal Mechanism, ThermoGTE, ЛОГОС [52];
- взаимодействие с оборудованием: поддерживается работа с различным измерительным и управляющим оборудованием через интерфейсы, такие как OPC-серверы/клиенты, платы National Instruments, USB-CAN адаптеры, оборудование «Информтест», «Элкус», программно-определяемые радиосистемы HackRF, а также стандартные джойстики [52].

Такие широкие интеграционные возможности, включая поддержку промышленных стандартов и взаимодействие с распространенными инженерными программными пакетами, существенно повышают гибкость и практическую применимость SimInTech в сложных проектах.

Документация и поддержка. Разработчики SimInTech предоставляют пользователям достаточно подробную документацию и справочные материалы:

- онлайн-справочная система: доступна на сайте help.simintech.ru и содержит детальное описание интерфейса, библиотек блоков, языка программирова-

ния, методов решения, примеры использования и другую необходимую информацию [52];

- документация на GitHub: некоторые материалы и примеры могут быть доступны через репозитории на GitHub [5];

– руководство по установке: прилагается к дистрибутиву программы [38];

- научные публикации и книги: ряд научных статей и монографий, посвященных применению SimInTech в различных областях, также служат источником информации о возможностях системы [49].

Наличие качественной и доступной документации является важным фактором для успешного освоения и эффективного использования любого сложного программного продукта.

Преимущества и недостатки. К основным преимуществам SimInTech можно отнести:

- отечественная разработка: включена в реестр российского ПО, что актуально для импортозамещения [38];
- мощные средства динамического моделирования: ориентация на нестационарные процессы и сложные системы управления [36];
- кодогенерация: поддержка широкого спектра целевых платформ, включая российские [36];
- обширные библиотеки моделей: покрывают множество физических доменов и инженерных задач [50];
- кроссплатформенность: поддержка Windows и Linux, включая российские ОС [36];
- развитые интеграционные возможности: поддержка FMI, OPC, интеграция с MatLab/Simulink и другим ПО [53].

Основные недостатки:

- непрозрачная информация о стоимости: отсутствие публичных цен на лицензии и недоступность соответствующих разделов на официальном сайте [38]. Это является серьезным препятствием для потенциальных пользователей, особенно из академической системы, и может свидетельствовать о недостаточном внимании к маркетингу и поддержке этих аспектов;
- высокий порог вхождения: как и для большинства профессиональных систем моделирования, для эффективной работы может потребоваться значительное время на освоение.

Сравнительный анализ систем моделирования

Сравнение современных систем моделирования является сложной задачей ввиду их значительного разнообразия по функциональным возможностям, областям применения, парадигмам моделирования и моделям лицензирования. Прямое сопоставление не всегда корректно, так как многие пакеты узко специализированы или ориентированы на разные категории пользователей. Тем не менее на основе доступной информации из обзоров [5] и индивидуальных характеристик каждой системы можно провести анализ по ключевым критериям. Особое внимание будет уделено позиционированию российских разработок

МАРС и SimInTech относительно друг друга и популярных зарубежных аналогов.

Обе системы являются проприетарными отечественными разработками с длительной историей, ориентированы на русскоязычного пользователя и имеют свои уникальные сильные стороны. МАРС выделяется своей методологией (МКЦ) и глубокой интеграцией в образовательный процесс, в то время как SimInTech предлагает мощные инструменты для динамического моделирования промышленных систем управления с возможностью кодогенерации и широкой интеграции.

В настоящем обзоре детально рассмотрены только две российские системы моделирования – **МАРС** и **SimInTech**, поскольку именно они обладают наиболее широкой функциональностью, зрелой архитектурой и практической применимостью в различных отраслях. Другие отечественные разработки, такие как ЛОГОС, TPP, RASNA, Universal Mechanism и др., не были включены в расширенный анализ по причине их *узкой специализации, ограниченной многофизичности, отсутствия поддержки современных стандартов* (например, FMI) или *недостаточной гибкости в построении комплексных моделей*.

В отличие от них МАРС реализует оригинальную методологию компонентных цепей, поддерживает многоуровневое моделирование и активно используется в научно-образовательной среде. SimInTech, в свою очередь, ориентирован на промышленное применение, предлагает развитую поддержку кодогенерации, интеграцию с ПЛК, библиотеками управления и российскими аппаратными платформами. Эти характеристики позволяют считать **МАРС и SimInTech наиболее универсальными и перспективными российскими платформами** для задач системного, мультидисциплинарного и прикладного моделирования.

Обсуждение результатов сравнения

Российские разработки МАРС и SimInTech занимают свою нишу. МАРС с его уникальным методом компонентных цепей и сильной образовательной базой в ТУСУРе представляет интерес для академических кругов и для моделирования сложных технических систем с возможностью многоуровневого подхода. SimInTech, в свою очередь, ориентирован на промышленное применение, особенно в области АСУ ТП и энергетики, предлагая мощные средства динамического моделирования и кодогенерации, что критически важно для перехода от модели к реальному объекту. Обе системы выигрывают от наличия русскоязычного интерфейса и документации, что является важным фактором для многих российских пользователей, особенно в образовательной сфере и для инженеров, не в полной мере владеющих английским языком.

В сравнении с зарубежными аналогами российские системы часто уступают в маркетинге и прозрачности ценовой политики. Например, такие гиганты, как COMSOL Multiphysics [54, 55] и AnsysFluent [56–

58], предлагают чрезвычайно мощный функционал для мультифизического моделирования и CFD соответственно, но их стоимость для коммерческого использования весьма высока [54]. MatLab/Simulink остается де-факто стандартом во многих инженерных и научных областях благодаря своим обширным библиотекам и удобной среде, но также является дорогостоящим продуктом.

С другой стороны, активно развиваются бесплатные и открытые альтернативы. OpenFOAM [59, 60] в CFD, Aspen Plus [61, 62], ChemCAD [63–65], DWSIM [66, 67] в химической технологии. Как аналоги MatLab [68–71] – GNU Octave [72, 73] и Scilab [74, 75], LTSpice [76, 77], NI Multisim [78–80], Proteus Design Suite [81, 82], KiCad [83, 84], PSCAD [85–87] в проектировании электроники – все они предоставляют мощные инструменты без затрат на лицензии. Это делает их привлекательными для образования, индивидуальных исследователей и малых предприятий. Однако, как правило, открытое ПО требует от пользователя большей технической подготовки, а уровень официальной поддержки может быть ниже, чем у коммерческих продуктов [88].

Выбор конкретной системы моделирования, таким образом, всегда представляет собой компромисс между функциональностью, стоимостью, порогом вхождения, доступностью поддержки и спецификой решаемых задач. Для российских пользователей МАРС и SimInTech могут стать предпочтительным выбором при решении определенных классов задач, особенно если важны русскоязычная поддержка, ориентация на отечественные стандарты или требования по импортозамещению.

Тенденции развития и перспективы систем моделирования

Область компьютерного моделирования непрерывно развивается, отражая общие тенденции в информационных технологиях и отвечая на растущие потребности науки и промышленности. Можно выделить несколько ключевых направлений, определяющих будущее систем моделирования.

Выбор и обоснование критериев сравнения систем моделирования

При сравнении и анализе инструментальных систем математического моделирования были отобраны объективные и функционально значимые критерии. Их выбор обусловлен необходимостью комплексной оценки как технических характеристик программных средств, так и их практической применимости в инженерных, научных и образовательных задачах. Каждый из представленных критериев имеет прикладное значение и позволяет сопоставить как возможности, так и ограничения систем моделирования.

– *Разработчик и страна происхождения.* Позволяют оценить надёжность и профессиональную репутацию команды, а также влияние национальной технологической базы. Например, отечественные решения могут быть предпочтительны в условиях импортозамещения и адаптации под российские стандарты.

– *Лицензия и стоимость.* Критически важны для выбора ПО в образовательных и коммерческих организациях. Наличие академических условий или открытой лицензии делает систему доступной для широкого круга пользователей.

– *Поддерживаемые операционные системы.* Совместимость с актуальными ОС (Windows, Linux, macOS) расширяет гибкость внедрения систем на различных платформах, включая российские альтернативы.

– *Основные области применения.* Указывают на специализацию и глубину проработки инструментов под конкретные инженерные задачи – от АСУ ТП и мультифизики до химических процессов и электронных схем.

– *Парадигма моделирования.* Отражает методологическую основу системы: блочное моделирование, объектно-ориентированный подход, МКЭ, SPICE, логическое моделирование и др. Это влияет на формализм, понятность и масштабируемость моделей.

– *Уровень удобства интерфейса.* Оценивается с точки зрения пользователя. Интерфейс напрямую влияет на время освоения и продуктивность работы в

системе, особенно для студентов и инженеров-практиков.

– *Русскоязычная документация и поддержка.* Наличие локализации критично для образовательных учреждений и пользователей без глубоких знаний английского языка. Также оно повышает доступность систем в СНГ.

– *Поддержка стандартов и интеграции.* Совместимость с международными стандартами (Modelica, FMI, CAPE-OPEN и др.) и возможность интеграции с другими инструментами (MatLab, Python, CAD) повышают универсальность и расширяемость платформ.

– *Ключевые возможности и особенности.* Позволяют выделить уникальные функциональные аспекты систем: кодогенерация, виртуальные лаборатории, поддержка цифровых двойников, расчёт теплогидродинамики и пр.

Таким образом, выбор представленных критериев обусловлен стремлением к объективной, многоаспектной оценке систем моделирования с учётом технологических, функциональных и пользовательских характеристик (таблица).

Сравнительная таблица систем моделирования

Наименование	Общие характеристики	Стоимость и доступность	Функциональные возможности
1	2	3	4
МАРС	«РЕВИКОМ» ТУСУР; Россия; проприетарная	По запросу / спец. условия для образования вероятны; Windows	Образование, научные исследования, технические системы; МКЦ, многоуровневое
SimInTech	ООО «ЗВ Сервис»; Россия; проприетарная	По запросу / информация затруднена; Windows, Linux	АСУ ТП, энергетика, электропривод, робототехника; блочное, динамическое
COMSOL Multiphysics	COMSOL AB; Швеция; коммерческая	(\$3,495+ в год) / да, скидки (\$1,495+ в год); Windows, Linux, macOS	Мультифизика, НИОКР, промышленность; МКЭ (FEA)
Ansys Fluent	Ansys, Inc.; США; коммерческая	(\$10k–\$50k пакет) / да, бесплатное студенческое ПО, скидки для вузов (\$2100+ Fluent); Windows, Linux	CFD, аэрогидродинамика, теплообмен, химические реакции; МКО (FVM)
OpenFOAM	OpenFOAM Foundation, CFD Direct; Великобритания / международное; открытая (GPL)	Бесплатно; Linux, Windows (WSL/native), macOS	CFD, научные исследования, промышленность (продвинутые пользователи); МКО (FVM)
Aspen Plus	AspenTech; США; коммерческая	(\$30k–\$100k+) / да, спец. цены для вузов; Windows	Химическая технология, нефтепереработка, полимеры; модульное, потоковые схемы
ChemCAD	Chemstations, Inc.; США; коммерческая	(стоимость зависит от модулей) / да, спец. цены для вузов (в некоторых вузах бесплатно); Windows, Web	Химическая технология, проектирование процессов; модульное, потоковые схемы
DWSIM	Daniel Wagner, сообщество; Бразилия / международное; открытая (GPL) / Freemium (моб. версии)	Бесплатно (Desktop); Windows, Linux, macOS, Android, iOS	Химическая технология, образование; модульное, потоковые схемы
MatLab / Simulink	MathWorks; США; коммерческая	(\$2,150 perpetual / \$860 annual) / да, студенческая (\$49–\$99), академическая (\$250–\$500); Windows, Linux, macOS, Web (Online)	Математические вычисления, алгоритмы, динамические системы, управление; матричные вычисления, блочное моделирование
GNU Octave	John W. Eaton, сообщество; международное; открытая (GPL)	Бесплатно; Windows, Linux, macOS, BSD	Математические вычисления, альтернатива MatLab; матричные вычисления
Scilab/Xcos	ESI Group (ранее INRIA, Scilab Enterprises, Dassault Systèmes); Франция/международное; открытая (CeCILL/GPL-совместимая)	Бесплатно; Windows, Linux, macOS	Инженерные и научные расчеты, моделирование динамических систем; матричные вычисления, блочное моделирование (Xcos)

Окончание таблицы

1	2	3	4
LTSpice	Analog Devices; США; бесплатная (Freeware)	Бесплатно; Windows, macOS	Моделирование аналоговых электронных схем; SPICE
NI Multisim	National Instruments; США; коммерческая	(от \$0 до \$9,99/мес для Multisim Live, академические лицензии от \$50-\$190/год за модуль); Windows, Web (Live)	Моделирование электронных схем, образование; SPICE, блочное
Proteus Design Suite	Labcenter Electronics; Великобритания; коммерческая	(от \$248 за Starter Kit до \$8,622 за Platinum) / да, спец. цены для образования; Windows	Проектирование электроники, симуляция МК, разработка ПП; SPICE, симуляция МК
KiCad EDA	KiCad Developers (сообщество); международное; открытая (GPL)	Бесплатно; Windows, Linux, macOS	Проектирование электронных схем и ПП; SPICE (через ngspice)
PSCAD	Manitoba Hydro International Ltd.; Канада; коммерческая / бесплатная (Free Edition)	(по запросу) / да, Free Edition для малых систем, спец. условия для образования; Windows	Электромагнитные переходные процессы в энергосистемах; EMTDC (решатель)

Общие сведения о системах моделирования

Наименования и данные по системам моделирования:

МАРС. Разработчик / основной контрибьютор – «РЕВИКОМ» ТУСУР. Страна происхождения – Россия. Лицензия – проприетарная. Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – по запросу / спец. условия для образования вероятны. Поддерживаемые ОС – Windows.

SimInTech. Разработчик / основной контрибьютор – ООО «ЗВ Сервис». Страна происхождения – Россия. Лицензия – проприетарная. Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – по запросу / информация затруднена. Поддерживаемые ОС – Windows, Linux.

COMSOL Multiphysics. Разработчик / основной контрибьютор – COMSOL AB. Страна происхождения – Швеция. Лицензия – коммерческая. Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – (\$3,495+ в год) / да, скидки (\$1,495+ в год). Поддерживаемые ОС – Windows, Linux, macOS [89].

Ansys Fluent. Разработчик / основной контрибьютор – Ansys, Inc. Страна происхождения – США. Лицензия – коммерческая. Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – (\$10k–\$50k пакет) / да, бесплатное студенческое ПО, скидки для вузов (\$2100+ Fluent). Поддерживаемые ОС – Windows, Linux.

OpenFOAM. Разработчик / основной контрибьютор – OpenFOAM Foundation, CFD Direct. Страна происхождения – Великобритания / международное. Лицензия – открытая (GPL). Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – бесплатно. Поддерживаемые ОС – Linux, Windows (WSL/native), macOS [90].

Aspen Plus. Разработчик / основной контрибьютор – AspenTech. Страна происхождения – США. Лицензия – коммерческая. Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – (\$30k–\$100k+) / да, спец. цены для вузов. Поддерживаемые ОС – Windows.

ChemCAD. Разработчик / основной контрибьютор – Chemstations, Inc. Страна происхождения –

США. Лицензия – коммерческая. Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – (стоимость зависит от модулей) / да, спец. цены для вузов (в некоторых вузах бесплатно). Поддерживаемые ОС – Windows, Web.

DWSIM. Разработчик / основной контрибьютор – Daniel Wagner, сообщество. Страна происхождения – Бразилия / международное. Лицензия – открытая (GPL) / Freemium (моб. версии). Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – бесплатно (Desktop). Поддерживаемые ОС – Windows, Linux, macOS, Android, iOS.

MatLab/Simulink. Разработчик / основной контрибьютор – MathWorks. Страна происхождения – США. Лицензия – коммерческая. Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – (\$2,150 perpetual / \$860 annual) / да, студенческая (\$49–\$99), академическая (\$250–\$500). Поддерживаемые ОС – Windows, Linux, macOS, Web (Online).

GNU Octave. Разработчик / основной контрибьютор – John W. Eaton, сообщество. Страна происхождения – Международное. Лицензия – открытая (GPL). Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – бесплатно. Поддерживаемые ОС – Windows, Linux, macOS, BSD [91].

Scilab/Xcos. Разработчик / основной контрибьютор – ESI Group (ранее INRIA, Scilab Enterprises, Dassault Systèmes). Страна происхождения – Франция / международное. Лицензия – открытая (CeCILL/GPL-совместимая). Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – бесплатно. Поддерживаемые ОС – Windows, Linux, macOS [92].

LTSpice. Разработчик / основной контрибьютор – Analog Devices. Страна происхождения – США. Лицензия – бесплатная (Freeware). Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – бесплатно. Поддерживаемые ОС – Windows, macOS.

NI Multisim. Разработчик / основной контрибьютор – National Instruments. Страна происхождения – США. Лицензия – коммерческая. Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия –

ские условия – (от \$0 до \$9,99/мес. для Multisim Live, академические лицензии от \$50–\$190/год за модуль). Поддерживаемые ОС – Windows, Web (Live).

Proteus Design Suite. Разработчик / основной контрибьютор – Labcenter Electronics. Страна происхождения – Великобритания. Лицензия – коммерческая. Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз./год) / академические условия – (от \$248 за Starter Kit до \$8,622 за Platinum) / да, спец. цены для образования. Поддерживаемые ОС – Windows.

KiCad EDA. Разработчик / основной контрибьютор – KiCad Developers (сообщество). Страна происхождения – международное. Лицензия – открытая (GPL). Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – бесплатно. Поддерживаемые ОС – Windows, Linux, macOS.

PSCAD. Разработчик / основной контрибьютор – Manitoba Hydro International Ltd. Страна происхождения – Канада. Лицензия – коммерческая / бесплатная (Free Edition). Ориентировочная стоимость (коммерческая, 1 польз. / год) / академические условия – (по запросу) / да, Free Edition для малых систем, спец. условия для образования. Поддерживаемые ОС – Windows.

Основные выводы обзора

Проведенный обзор современных систем моделирования демонстрирует их широкое многообразие, специализацию и непрерывное развитие. Моделирование стало неотъемлемым инструментом в науке и технике, позволяющим решать сложнейшие задачи анализа, проектирования и оптимизации.

В отличие от большинства существующих публикаций, характеризующихся фрагментарным подходом и ограниченным охватом тематики, представленный обзор носит комплексный и систематизированный характер. В нём детально рассмотрены не только зарубежные, но и отечественные программные системы моделирования, включая глубокий анализ их архитектуры, функциональных возможностей, областей применения и интеграционных решений. Особенностью настоящей работы является сопоставление российских разработок (МАРС, SimInTech) с ведущими мировыми аналогами в контексте современных тенденций, таких как импортозамещение, цифровые двойники, открытое ПО и стандартизация. Такой подход позволяет не только объективно оценить текущее состояние отрасли, но и предложить обоснованные рекомендации по выбору инструментов моделирования в зависимости от задач, ресурсов и стратегических приоритетов пользователя. Структурированность материала, актуальность приведённых примеров и акцент на практическую применимость отличают данный обзор от большинства ранее опубликованных работ в данной области.

Российские разработки, такие как МАРС (ТУСУР) и SimInTech (ООО «ЗВ Сервис»), занимают свою нишу и обладают рядом уникальных характеристик. МАРС, основанный на методе компонентных цепей, силен в многоуровневом моделировании и широко используется в образовательном процессе, осо-

бенно в ТУСУРе. SimInTech ориентирован на динамическое моделирование сложных технических систем и АСУ ТП, предлагая мощные средства кодогенерации и интеграции, что делает его востребованным в промышленности. Обе системы имеют преимущество в виде русскоязычного интерфейса и документации.

В то же время на мировом рынке представлено множество мощных коммерческих пакетов (COMSOL Multiphysics, AnsysFluent, MatLab / Simulink, Aspen Plus и др.), являющихся лидерами в своих областях, но отличающихся высокой стоимостью. Активно развиваются и бесплатные/открытые альтернативы (OpenFOAM, DWSIM, GNU Octave, Scilab, KiCad, LTSpice, OpenModelica), предоставляющие доступные инструменты для широкого круга пользователей, особенно в академической среде, хотя и требующие порой большей самостоятельности в освоении и поддержке.

Ключевыми тенденциями развития систем моделирования являются рост влияния открытого ПО, интеграция с технологиями искусственного интеллекта и цифровых двойников, переход к облачным вычислениям и все большее значение стандартизации (Modelica, FMI, CAPE-OPEN) для обеспечения совместимости и эффективности мультидисциплинарного моделирования.

Рекомендации по выбору систем моделирования

Выбор эффективной системы моделирования является многофакторной задачей, где техническое совершенство программного продукта не всегда является единственным или главным критерием. Необходимо учитывать специфику решаемых задач, финансовые возможности, уровень подготовки пользователей, доступность документации и поддержки, а также стратегические цели организации или исследователя.

Для академических пользователей и образовательных целей:

- МАРС может быть рекомендован для вузов, особенно для направлений, где уже существуют разработанные на его основе лабораторные работы и методические материалы (например, в ТУСУРе и для специальностей, связанных с электроникой, электротехникой, САУ) [29];

- SimInTech представляет интерес для инженерных специальностей, ориентированных на АСУ ТП, энергетику, робототехнику, при условии наличия доступных академических лицензий. Его возможности по кодогенерации могут быть полезны для практико-ориентированного обучения;

- бесплатные и открытые системы (GNU Octave, Scilab/Xcos, OpenFOAM, DWSIM, KiCad, LTSpice, OpenModelica) являются отличным выбором для большинства дисциплин благодаря отсутствию лицензионных платежей и возможности глубокого изучения принципов работы. Их использование способствует формированию у студентов навыков работы с разнообразными инструментами и адаптации к различным программным продуктам.

Для научных исследований:

- выбор определяется спецификой исследовательской задачи; для сложных мультифизических расчетов или задач, требующих высокой точности и валидированных моделей, могут потребоваться мощные коммерческие пакеты, такие как COMSOL Multiphysics, AnsysFluent или MatLab/Simulink;

- для задач, требующих гибкости, кастомизации или доступа к исходному коду, предпочтительными могут быть открытые пакеты, например, OpenFOAM или OpenModelica;

- SimInTech может быть полезен для моделирования сложных управляемых технических систем с последующей генерацией кода для экспериментальных установок. MARC подойдет для исследований, использующих его специфическую методологию.

Для промышленных задач:

- часто выбор падает на хорошо зарекомендовавшие себя коммерческие пакеты с развитой технической поддержкой, обширными библиотеками валидированных моделей и интеграцией в существующие CAD/CAE/PLM-системы (например, Ansys, Aspen Plus, ChemCAD, Proteus Design Suite);

- SimInTech является сильным кандидатом для российских предприятий, особенно в контексте импортозамещения и задач автоматизации;

- решения на базе открытого ПО также находят применение, особенно если в компании есть специалисты, способные адаптировать и поддерживать такие системы.

В заключение следует подчеркнуть, что при выборе системы моделирования важно провести тщательный анализ имеющихся альтернатив, изучить опыт других пользователей в схожих областях, по возможности протестировать демонстрационные версии и оценить не только текущие, но и перспективные потребности. Экономические, образовательные, экосистемные и даже геополитические факторы могут играть существенную роль в принятии окончательного решения.

Литература

1. Самарский А.А. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
2. Полуботко Д.В. Современные программные средства моделирования электрических сетей / Д.В. Полуботко, Ю.Я. Чукреев // Программные продукты и системы. – 2008. – № 4(84). – С. 130–132.
3. Бахвалов Н.С. Численные методы в задачах математической физики / Н.С. Бахвалов, Ж.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 636 с.
4. Романкова П.Г. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие / П.Г. Романкова, К.Ф. Павлов, А.А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
5. Малыгина С.Н. Обзор современных средств имитационного моделирования / С.Н. Малыгина, Е.О. Неупокоева // Труды Кольского научного центра РАН. – Сер.: Технические науки. – 2022. – № 2.
6. Дмитриев В.М. MARC – среда моделирования технических устройств и систем: монография / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, Т.В. Ганджа. – Томск: В-Спектр, 2011. – 278 с.

риев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, Т.В. Ганджа. – Томск: В-Спектр, 2011. – 278 с.

7. Среда моделирования MARC. Официальный сайт [Электронный ресурс]: Научная группа «РЕВИКОМ». – Режим доступа: <http://www.se-mars.ru>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

8. OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://openfoam.org>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

9. LTSpiceSimulator [Электронный ресурс]: Analog Devices. – Режим доступа: <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

10. Моделирование мехатронных систем в среде MatLab/Simulink / SimMechanics: учеб. пособие для вузов / В.М. Мусалимов, Г.Б. Замоуев, И.И. Калапышина, А.Д. Перечесова, К.А. Нуждин. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 114 с.

11. COMSOL Multiphysics® [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.com>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

12. Ansys Fluent. Fluid Simulation Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

13. Эмануэль Н.М. Курс химической кинетики: учебник для хим. фак. ун-тов / Н.М. Эмануэль, Д.Г. Кнорре. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 463 с.

14. Aspen Plus. Leading Process Simulation Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

15. CHEMCAD. Chemical Engineering Simulation Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chemstations.com/chemcad>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

16. DWSIM. Chemical Process Simulation for Everyone [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dwsim.org>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

17. Vasileiadou A. Modelling of CO_x and NO_x emissions from industrial solid wastes combustion using ANSYS CHEMKIN PRO / A. Vasileiadou, S. Zoras, A. Dimoudi // Waste Management. – 2023. – Vol. 172. – P. 248–261.

18. GNU Octave. Scientific Programming Language [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://octave.org>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

19. Scilab. Open source software for numerical computation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scilab.org>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

20. OpenModelica. Open-Source Modelica-Based Modeling and Simulation Environment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://openmodelica.org>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

21. NI Multisim. Circuit Design and Simulation Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.multisim.com>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

22. Proteus Design Suite. PCB Design & Simulation Made Easy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.labcenter.com>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

23. KiCad EDA. Schematic Capture & PCB Design Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kicad.org>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

24. PSCAD. Power Systems EMT Simulation Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.pscad.com>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

25. Дмитриев В.М. Метод компонентных цепей для моделирования мультифизических систем // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2019. – С. 263–270.

26. Дмитриев В.М. Система визуализации и управления вычислительным экспериментом в среде многоуровневого моделирования MAPC / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, Т.Ю. Коротина // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 1 (21), ч. 2. – С. 149–155.

27. Архитектура многопользовательской среды моделирования / Т.В. Ганджа, В.М. Дмитриев, Т.Н. Зайченко, А.С. Букреев // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 44–49. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-44-49.

28. Болденков А.С. Структура сетевой многоуровневой компьютерной модели в формате метода компонентных цепей для реализации сетевых виртуальных лабораторий / А.С. Болденков, Т.В. Ганджа, В.М. Дмитриев // Программные продукты и системы. – 2024. – № 1. – С. 24–33. DOI: 10.15827/0236-235X.145.024-033.

29. Зайченко Т.Н. Организация учебного компьютерного эксперимента в системе многоуровневого моделирования MAPC / Т.Н. Зайченко, В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 84–88. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-84-88.

30. Зайченко Т.Н. Информационное моделирование цифровых устройств в системе MAPC // Вестник Том. гос. педагогического ун-та. – Сер.: Компьютерные и информационные науки. – 2005. – Вып. 1(45). – С. 118–122.

31. Дмитриев В.М. Реализация цифрового двойника в среде моделирования MAPC / В.М. Дмитриев, Л.А. Гембух, А.Е. Сахабутдинов // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. – Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 26–35. DOI: 10.14529/ctcr230403.

32. Григорьева Т.Е. Разработка моделей компонентов в среде моделирования MAPC для моделирования систем массового обслуживания // Матер. 52-й Междунар. науч. студенческой конференции МНСК–2014: Информационные технологии. – Новосибирск: НГУ, 2014. – С. 104.

33. Григорьева Т.Е. Дискретно-событийное моделирование в СМ MAPC для курса «Системы массового обслуживания» // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1(31). – С. 152–155.

34. Адаптация среды моделирования MAPC для исследования процессов экстракции в аппаратах «центробежный контактор – отстойник» / А.В. Ушаков, В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, С.А. Панов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 599–614. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-3-599-614.

35. Ганджа Т.В. Автоматизированная параметризация моделей физико-химических систем в среде многоуровневого компьютерного моделирования «MAPC» / Т.В. Ганджа, С.А. Панов // Химия и химическая технология в XXI веке: матер. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2017. – С. 288–289.

36. Ляшенко А.И. Основы моделирования в SimInTech: метод. пособие / А.И. Ляшенко, Н.В. Маслова, Д.П. Вент. – Новомосковск, ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский ин-т (филиал). 2018. – 42 с.

37. Калачев Ю.Н. SimInTech. Моделирование в электроприводе учеб. пособие. – М.: ДМК Пресс. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.help.simintech.ru/oxu_ex-1/webhelp_docs/SIT_Kalachev_Y.N._SimIn

[Tech_Modelirovanie_v_electroprivoде.pdf](#), свободный (дата обращения: 29.05.2025).

38. SimInTech [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://simintech.ru>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

39. Гусаков Д.С. Создание модели автоматического регулирования возбуждения в среде SimInTech / Д.С. Гусаков, П.В. Шамигулов // Вестник науки. – 2025. – № 5 (86). – С. 2103–2106.

40. Семинар «Среда динамического моделирования технических систем SimInTech» // Череповецкий государственный университет: новости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chsu.ru/novosti-i-sobytiya/seminar-sreda-dinamicheskogo-modelirovaniya-tehnicheskikh-sistem-simintech/> (дата обращения: 29.05.2025).

41. Совместимость ОС «Альт Образование» 9.2 со средой динамического моделирования технических систем SimInTech // BaseALT: новости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.basealt.ru/about/news/archive/view/sovместимость-os-alt-obrazovanie-92-so-sredoi-dinamicheskogo-modelirovaniya-tehnicheskikh-sistem-simintech/> (дата обращения: 29.05.2025).

42. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech // K-Integration: сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://k-integration.ru/product/sreda-dinamicheskogo-modelirovaniya-tehnicheskikh-sistem-simintech/> (дата обращения: 29.05.2025).

43. SMath Studio. Цены [Электронный ресурс] // SMath: сайт. – Режим доступа: <https://smath.com/ru-RU/обзор/271d5a10-2ee6-40f6-93b0-f51535ee4192/цена> (дата обращения: 29.05.2025).

44. Universal Mechanism. Цены [Электронный ресурс] // Лаборатория «Вычислительная механика»: сайт. – Режим доступа: <https://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=11>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

45. Modina M. Analysis of software products for the development of electronic textbooks in the information and educational environment of the university / M. Modina, V. Skoda, D. Deikun, A. Voskanyan // SHS Web of Conferences. – Vol. 164. – P. 00022. DOI: 10.1051/shsconf/202316400022.

46. Ильичев В.Ю. Моделирование работы гидравлической турбины в программе SimInTech / В.Ю. Ильичев, Н.С. Герасимова // E-Scio. – 2023. – № 7 (82). – С. 171–179.

47. SimInTech: сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://simintech.ru/education/universities/> (дата обращения: 29.05.2025).

48. САПР SimInTech для ПЛК FIMATIC // Гортехмаш [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gort.su/products/caprfim>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

49. Научные публикации SimInTech [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://simintech.ru/science/publications/>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

50. SimInTech. Введение в библиотеки // SimInTech Help: справочная система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.simintech.ru/4_nachalo_raboty/vvedenie/DAT_vvedenie.html, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

51. Черненко Е.А. Моделирование компьютерных сетей в SimInTech // Вестник ХГУ им. Н.Ф. Катанова. – 2021. – № 3 (37). – С. 6–8.

52. SimInTech. Справочная система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://help.simintech.ru>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

53. SimInTech Documentation [Электронный ресурс] // GitHub. – Режим доступа: <https://github.com/simintech/doc>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).

54. Дядова А.В. Моделирование распространения электрических сигналов в сердечной мышце человека с использованием программного пакета COMSOL / А.В. Дядова, А.С. Огородников // Бюллетень сибирской медицины. – 2014. – № 4. – С. 43–46.
55. Khan H.U. Identification of shear cracks in reinforced beams using finite element method / H.U. Khan, M.N. Rafique, K. Samir, K. Ahmad, M. Bashir // Pakistan Journal of Science. – 2014. – Vol. 66. – P. 50–55.
56. Ansys Academic Program // Ansys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/academic>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).
57. Моделирование турбулентности. Расчет сдвиговых течений с применением ANSYS Fluent: практикум / Е.А. Кузнецов, А.А. Матюшенко, А.В. Гарбарук, А.А. Смирновский. – СПб.: Политех-пресс, 2020. – 49 с.
58. Ansys Workbench Platform // Ansys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>, свободный (дата обращения: 29.05.2025).
59. Читалов Д.И. Разработка программного модуля для решателя stressFoam платформы OpenFOAM // Программные продукты и системы. – 2023. – № 4. – С. 661–667.
60. OpenFOAM Features [Электронный ресурс] // CFD Direct: сайт. – Режим доступа: <https://cfd.direct/openfoam/features/> (дата обращения: 29.05.2025).
61. Tapia J.F.D. Basics of process simulation with Aspen Plus // Chemical Engineering Process Simulation. – 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2023. – P. 343–360. DOI: 10.1016/B978-0-323-90168-0.00016-0.
62. AspenTech Customer Testimonials [Электронный ресурс] // AspenTech: сайт. – Режим доступа: <https://www.aspentech.com/en/customer-help/testimonials> (дата обращения: 29.05.2025).
63. Chemcad License & Download [Электронный ресурс] // University of Illinois Webstore: product page. – Режим доступа: <https://webstore.illinois.edu/shop/product.aspx?zpid=1216> (дата обращения: 29.05.2025).
64. CHEMCAD Frequently Asked Questions // Chemstations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://chemstations.com/support/frequently_asked_questions/ (дата обращения: 29.05.2025).
65. CHEMCAD // Chemstations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chemstations.com/chemcad/> (дата обращения: 29.05.2025).
66. DWSIM vs ChemSep Comparison // Slashdot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://slashdot.org/software/comparison/ChemSep-vs-DWSIM/> (дата обращения: 29.05.2025).
67. Трусов П.В. Введение в математическое моделирование: учеб. пособие. – М.: Логос, 2004. – 336 с.
68. Татарников О. Обзор программ для символьной математики // КомпьютерПресс. – 2005. – № 5. – С. 130–135.
69. Оленев Н. Параллельное программирование в MatLab и его приложения / Н. Оленев, Р. Печенкин, А. Чернецов. – М.: Изд-во ВЦ РАН, 2007. – 120 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.1766.4481.
70. Дьяконов В.П. MatLab и Simulink для инженеров. – М.: ДМК-Пресс, 2016. – 976 с.
71. Continuous Integration with MatLab and Simulink // MathWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/solutions/continuous-integration.html> (дата обращения: 29.05.2025).
72. GNU Octave Reviews // SourceForge [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sourceforge.net/projects/octave/reviews/> (дата обращения: 29.05.2025).
73. GNU Octave: Numerical Integration // GNU Octave Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.octave.org/v4.0.1/Numerical-Integration.html> (дата обращения: 29.05.2025).
74. Scilab Reviews // G2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.g2.com/products/scilab/reviews?page=2> (дата обращения: 29.05.2025).
75. Scilab and X2C for Motor Control Simulations // Microchip Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.microchip.com/en-us/solutions/technologies/motor-control-and-drive/motor-control-simulations/scilab-and-x2c> (дата обращения: 29.05.2025).
76. Best Circuit Simulation Software (Free and Paid) That You Should Try in 2025 // Components101 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://components101.com/articles/best-circuit-simulation-software-free-and-paid-that-you-should-try-in-2025> (дата обращения: 30.05.2025).
77. LTSpice Integration Method Issues // LTwiki [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ltwiki.org/files/LTSpiceHelp.chm/html/integration_method_issues.htm (дата обращения: 29.05.2025).
78. Ищук А.А. Схемотехническое моделирование в Multisim: учеб. пособие / А.А. Ищук, И.А. Оболюнин. – СПб.: Лань, 2024. – 124 с.
79. Single-Seat Software Licenses for Academia // NI – National Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ni.com/da-dk/shop/software-portfolio/single-seat-academic-licenses.html> (дата обращения: 29.05.2025).
80. He Y. Research on the application of Multisim in electronic design / Y. He, R. Xu // Advances in Computer Science Research. – 2018. – Vol. 77. – P. 365–368. DOI: 10.2991/icmcs-18.2018.74.
81. Proteus Commercial Pricing // Labcenter Electronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.labcenter.com/pricing/comm/> (дата обращения: 29.05.2025).
82. Proteus PCB Software // Labcenter Electronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.labcenter.com/pcb/> (дата обращения: 29.05.2025).
83. KiCad EDA Reviews & Ratings 2025 // TrustRadius [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.trustradius.com/products/kicad-eda/reviews> (дата обращения: 29.05.2025).
84. KiCad Schematic Editor // KiCad Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.kicad.org/8.0/en/eeschema/eeschema.html> (дата обращения: 29.05.2025).
85. PSCAD End User License Agreement [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pscad.com/uploads/ck/files/PSCAD_EULA_Com-Edu-Free-Trial_rev_201301827.pdf (дата обращения: 29.05.2025).
86. PSCAD Reviews 2025: Details, Pricing, & Features // G2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.g2.com/products/pscad/reviews> (дата обращения: 29.05.2025).
87. Woodford D. PSCAD/EMTDC / D. Woodford, G. Irwin, U.S. Gudmundsdottir. – UK: The Institution of Engineering and Technology, 2015. – 546 p. DOI: 10.1049/PBPO078E_ch4.
88. Шустрова М.Л. Средства численного моделирования гидродинамических параметров процессов / М.Л. Шустрова, И.М. Аминев, А.Д. Байтимиров // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2014. – № 14. – С. 221–224.
89. Enhancing AI Integration with COMSOL Multiphysics // SciEngineer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sciengineer.com/enhancing-ai-integration-with-comsol-multiphysics-a-gateway-to-smarter-industrial-optimization/> (дата обращения: 30.05.2025).

90. OpenModelica [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.openmodelica.org/> (дата обращения: 29.05.2025).

91. Blochwitz T. Functional Mockup Interface 2.0: the standard for tool independent exchange of simulation models / T. Blochwitz, M. Otter, J. Åkesson, M. Arnold, C. Clauss, H. Elmquist, M. Friedrich, A. Junghanns, J. Mauss, D. Neumerkel, H. Olsson, A. Viel // Proceedings of 9th International Modelica Conference, Munich, Germany, 2012. – P. 173–184. DOI: 10.3384/ecp12076173.

92. Scilab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scilab.org/> (дата обращения: 29.05.2025).

Дубинин Никита Максимович

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-929-373-04-98

Эл. почта: nikita.d@inbox.ru

Гембух Лев Алексеевич

Аспирант каф. КСУП ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-952-176-01-32

Эл. почта: lev.gembuh@mail.ru

Поступила в редакцию: 02.06.2025.

Принята к публикации: 06.08.2025.

Dubinina N.M., Gembukh L.A.

Comparative Analysis of Mathematical Modeling Tool Environments

This paper presents an extended comparative analysis of modern software tools designed for modeling various processes and systems in a wide range of fields – from physics, chemistry and mathematics to electrical engineering and control systems. Both commercial and open-source software platforms are considered, including COMSOL Multiphysics, Ansys Fluent, MatLab/Simulink, OpenFOAM, DWSIM, LTspice, and others. Special attention is paid to the classification of modeling systems by application, type of licensing, level of abstraction, and modeling paradigms used. The article provides a detailed examination of the features and architecture of two Russian modeling systems – MARS and SimInTech, their functionality, integration solutions, licensing, documentation and areas of application. A comparative analysis of these domestic solutions with foreign analogues has been performed, highlighting their advantages, disadvantages and potential application niches. Key trends in the development of modeling tools are also discussed, including the growing importance of open-source software, the development of digital twins, integration with AI and cloud platforms, as well as standardization through initiatives such as Modelica, FMI and CAPE-OPEN. This work is of interest to researchers and engineers, as well as to teachers and students in technical fields.

Keywords: modeling systems, simulation, computer modeling, dynamic modeling, physical processes modeling, instrumental tools, modeling of mathematical systems, electrical systems modeling.

DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-3-97-114

References

1. Samarskii A.A., Mikhailov A.P. *Matematicheskoye modelirovaniye: idei, metody, primery* [Mathematical modeling: ideas, methods, examples]. 2nd ed., rev. M/, Fizmatlit, 2001. 320 p. (in Russ.).

2. Polubotko D.V., Chukreev Yu.Ya. *Sovremennyye programnyye sredstva modelirovaniya el-ektricheskikh setei* [Modern software for electric networks simulation]. *Software & Systems*, 2008, no. 4(84), pp. 130–132 (in Russ.).

3. Bakhvalov N.S., Zhidkov Zh.P., Kobelkov G.M. *Chislennyye metody v zadachah matematicheskoi fiziki* [Numerical methods in problems of mathematical physics]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy, 2008, 636 p. (in Russ.).

4. Romankova P.G., Pavlov K.F., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu processov i apparatov himicheskoi tekhnologii* [Examples and problems on processes and apparatuses of chemical technology: textbook]. 10th ed., rev. and add. Leningrad, Khimiya, 1987, 576 p. (in Russ.).

5. Malygina S.N., Neupokoeva E.O. *Obzor sovremennykh sredstv imitatsionnogo modelirovaniya* [Review of modern simulation tools]. Proceedings of the Kola Science Centre RAS. Technical sciences series, 2022, no. 2 (in Russ.).

6. Dmitriev V.M., Shutenkov A.V., Zaichenko T.N., Gandzha T.V. *MARS – sreda modelirovaniya tekhnicheskikh ustroystv i sistem: monografiya* [MARS – simulation environment for technical devices and systems: monograph]. Tomsk, V-Spektr, 2011, 278 p. (in Russ.).

7. *Sreda modelirovaniya MARS* [Simulation environment MARS]. Scientific Group «Revicom». Available at: <http://www.se-mars.ru> (accessed 29 May 2025) (in Russ.).

8. OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. Available at: <https://openfoam.org> (Accessed: 29 May 2025).

9. LTSpice Simulator [Electronic resource]. Analog Devices. Available at: <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html> (Accessed: 29 May 2025).

10. Musalimov V.M., Zamoruev G.B., Kalapyshina I.I., Perechesova A.D., Nuzhdin K.A. *Modelirovaniye mekhatronnykh sistem v srede MatLab* [Modeling of mechatronic systems in MATLAB] (Simulink / SimMechanics): textbook. St. Petersburg, ITMO University, 2013, 114 p. (in Russ.).

11. COMSOL Multiphysics®. Available at: <https://www.comsol.com> (Accessed: 29 May 2025).

12. Ansys Fluent. Fluid Simulation Software. Available at: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> (accessed 29 May 2025).

13. Emanuel N.M., Knorre D.G. *Kurs himicheskoi kinetiki* [Course of chemical kinetics: textbook for chemistry faculties]. 4th ed., rev. M/, Vysshaya shkola, 1984, 463 p. (in Russ.).

14. Aspen Plus. Leading Process Simulation Software. Available at: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus> (Accessed: 29 May 2025).

15. CHEMCAD. Chemical Engineering Simulation Software. Available at: <https://chemstations.com/chemcad> (Accessed: 29 May 2025).

16. DWSIM. Chemical Process Simulation for Everyone. Available at: <https://dwsim.org> (Accessed: 29 May 2025).

17. Vasileiadou A., Zoras S., Dimoudi A. Modelling of COx and NOx emissions from industrial solid wastes combustion using ANSYS CHEMKIN PRO. *Waste Management*, 2023, vol. 172, pp. 248–261.

18. GNU Octave. Scientific Programming Language. Available at: <https://octave.org> (Accessed: 29 May 2025).

19. Scilab. Open-source software for numerical computation. Available at: <https://www.scilab.org> (Accessed: 29 May 2025).

20. OpenModelica. Open-Source Modelica-Based Modeling and Simulation Environment. Available at: <https://openmodelica.org> (Accessed: 29 May 2025).
21. NI Multisim. Circuit Design and Simulation Software. Available at: <https://www.multisim.com> (Accessed: 29 May 2025).
22. Proteus Design Suite. PCB Design & Simulation Made Easy. Available at: <https://www.labcenter.com> (Accessed: 29 May 2025).
23. KiCad EDA. Schematic Capture & PCB Design Software. Available at: <https://www.kicad.org> (Accessed: 29 May 2025).
24. PSCAD. Power Systems EMT Simulation Software. Available at: <https://www.pscad.com> (Accessed: 29 May 2025).
25. Dmitriev V.M. *Metod komponentnykh cepei dlya modelirovaniya multifizichnykh sistem* [Component chain method for modeling multiphysics systems]. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah. Trudy XXI Mezhdunarodnoy konferencii [Problems of control and modeling in complex systems. Proceedings of the XXI International Conference]*. Samara, SamSC RAS, 2019, pp. 263–270 (in Russ.).
26. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Korotina T.Yu. [System of imaging and control architecture environment multilevel modeling]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2010, no. 1(21), part 2, pp. 149–155 (in Russ.).
27. Gandzha T.V., Dmitriev V.M., Zaichenko T.N., Bukreev A.S. [Architecture of multiuser simulation environment MARS]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 44–49. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-44-49 (in Russ.).
28. Boldenkov A.S., Gandzha T.V., Dmitriev V.M. [The structure of a networked multilevel computer model in terms of the component circuit method for implementing networked virtual laboratories]. *Software & Systems*, 2024, no. 1, pp. 24–33. DOI: 10.15827/0236-235X.145.024-033 (in Russ.).
29. Zaichenko T.N., Dmitriev V.M., Gandzha T.V. Organization of educational computer experiment in the MARS multilevel simulation system. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2023, vol. 26, no. 4, pp. 84–88. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-84-88 (in Russ.).
30. Zaichenko T.N. *Informatsionnoe modelirovanie tsifrovyykh ustroystv v sisteme MARS* [Information modeling of digital devices in the MARS system]. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin. Ser. Science (Information Technology)*, 2005, no. 1(45), pp. 118–122 (in Russ.).
31. Dmitriev V.M., Gembukh L.A., Sakhabutdinov A.E. [Digital twin in simulation environment MARS]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automation Control, Radio Electronics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 26–35. DOI: 10.14529/ctcr230403 (in Russ.).
32. Grigorieva T.E. *Razrabotka modelei komponentov v srede modelirovaniya MARS dlya modelirovaniya sistem massovogo obsluzhivaniya* [Development of component models in the MARS simulation environment for queuing systems modeling]. *Proceedings of the 52nd International Student Scientific Conference ISSC-2014. Information Technologies, Novosibirsk, NSU*, 2014, p. 104 (in Russ.).
33. Grigorieva T.E. [Discrete-event simulation in CM MARS for «Mass service system» course]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2014, no. 1(31), pp. 152–155 (in Russ.).
34. Ushakov A.V., Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Panov S.A. Adaptation of the MARS simulation environment for studying extraction processes in centrifugal contactor–settler apparatuses. *Computer Research and Modeling*, 2024, vol. 16, no. 3, pp. 599–614. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-3-599-614 (in Russ.).
35. Gandzha T.V., Panov S.A. *Avtomatizirovannaya parametrizatsiya modelei fiziko-himicheskikh sistem v srede mnogourovnevnogo kompyuternogo modelirovaniya «MARS»* [Automated parameterization of models of physicochemical systems in the multilevel computer simulation environment “MARS”]. *Himiya i himicheskaya tekhnologiya v XXI veke: materialy XVIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov i molodykh uchennykh [Chemistry and chemical technology in the XXI century. Proceedings of the XVIII International scientific-practical conference of students and young scientists]*. Tomsk, TPU Publ., 2017, pp. 288–289 (in Russ.).
36. Lyashenko A.I., Maslova N.V., Vent D.P. *Osnovy modelirovaniya v SimInTech: metodicheskoe posobie* [Basics of modeling in SimInTech: methodological guide]. Novomoskovsk Institute (branch) of Mendelev University of Chemical Technology of Russia, Novomoskovsk, 2018, 42 p. (in Russ.).
37. Kalachev Yu.N. *SimInTech. Modelirovanie v elektropivode, uchebnoe posobie* [Modeling in electric drive, textbook]. Moscow, DMK Press. Available at: https://www.help.simintech.ru/oxy_ex-1/webhelp_docs/SIT_Kalachev_Yu.N._SimInTech_Modelirovanie_v_electropivode.pdf (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
38. SimInTech. Available at: <http://simintech.ru> (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
39. Gusakov D.S., Shamigulov P.V. [Creating a model of automatic excitation control in SimInTech]. *Vestnik nauki*, 2025, no. 5(86), p. 2103–2106 (in Russ.).
40. *Seminar «Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech»* [Seminar «Dynamic simulation environment SimInTech»] Cherepovets State University: news. Available at: <https://www.chsu.ru/novosti-i-sobytiya/seminar-sreda-dinamicheskogo-modelirovaniya-tekhnicheskikh-sistem-simintech/> (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
41. *Sovmestimost' OS «Al't Obrazovanie» 9.2 so sredoi dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech* [Compatibility of ALT Education OS 9.2 with SimInTech dynamic simulation environment]. BaseALT: news. Available at: <https://www.basealt.ru/about/news/archive/view/sovmetimost-os-alt-obrazovanie-92-so-sredoi-dinamicheskogo-modelirovaniya-tekhnicheskikh-sistem-simintech> (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
42. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech* [Dynamic simulation environment SimInTech]. K-Integration. Available at: <https://k-integration.ru/product/sreda-dinamicheskogo-modelirovaniya-tekhnicheskikh-sistem-simintech/> (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
43. *SMath Studio. Tseny* [SMath Studio. Prices]. SMath: website. Available at: <https://smath.com/ru-RU/o63op/271d5a10-2ee6-40f6-93b0-f51535ee4192/cena> (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
44. *Universal Mechanism. Tseny* [Universal Mechanism. Prices]. Laboratory “Computational Mechanics”. Available at: <https://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=11> (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
45. Modina M., Skoda V., Deikun D., Voskanyan A. Analysis of software products for the development of electronic textbooks in the information and educational environment of the university. *SHS Web of Conferences*, vol. 164, p. 00022. DOI: 10.1051/shsconf/202316400022.

46. Il'ichev V.Yu., Gerasimova N.S. [Modeling the operation of a hydraulic turbine in SimInTech]. *E-Scio*, 2023, no. 7 (82), pp. 171–179 (in Russ.).
47. SimInTech. Available at: <https://simintech.ru/education/universities/> (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
48. CAD SimInTech for FIMATIC PLC. Gortemash: website. Available at: <https://gort.su/products/caprfim> (accessed 29 May 2025) (in Russ.).
49. *Nauchnye publikatsii SimInTech* [SimInTech scientific publications]: website. Available at: <https://simintech.ru/science/publications/> (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
50. *SimInTech. Vvedenie v biblioteki* [SimInTech. Introduction to libraries]. SimInTech Help: documentation. Available at: https://help.simintech.ru/4_nachalo_raboty/vvedenie/DAT_vvedenie.html (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
51. Chernenko E.A. [Simulation of computer networks in SimInTech]. *Vestnik of KhSU named after N.F. Katanov*, 2021, no. 3 (37), pp. 6–8 (in Russ.).
52. *SimInTech. Spravochnaya sistema* [SimInTech. Help system]. Available at: <https://help.simintech.ru> (Accessed: 29 May 2025) (in Russ.).
53. SimInTech Documentation. GitHub. Available at: <https://github.com/simintech/doc> (Accessed: 29 May 2025).
54. Dyadova A.V., Ogorodnikov A.S. [The simulation of electrical signals propagation in the heart muscle of the human using software package COMSOL]. *Bulletin of Siberian Medicine*, 2014, no. 4, pp. 43–46 (in Russ.).
55. Khan H.U., Rafique M.N., Samir K., Ahmad K., Bashir M. Identification of shear cracks in reinforced beams using finite element method. *Pakistan Journal of Science*, 2014, vol. 66, pp. 50–55.
56. Ansys Academic Program. Ansys. Available at: <https://www.ansys.com/academic> (Accessed: 29 May 2025).
57. Kuznetsov E.A., Matyushenko A.A., Garbaruk A.V., Smirnovskiy A.A. *Modelirovanie turbulentnosti. Raschet sdvigo-vyh techenii s primeneniem ANSYS Fluent: praktikum* [Turbulence modeling. Shear flow calculation using ANSYS Fluent. Practical course]. St. Petersburg, Politekh-press, 2020, 49 p. (in Russ.).
58. Ansys Workbench Platform. Ansys. Available at: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench> (Accessed: 29 May 2025).
59. Chitalov D.I. [Software module for stressFoam solver of OpenFOAM platform]. *Software & Systems*, 2023, no. 4, pp. 661–667 (in Russ.).
60. OpenFOAM Features. CFD Direct. Available at: <https://cfdirect/openfoam/features/> (Accessed: 29 May 2025).
61. Tapia J.F.D. *Basics of process simulation with Aspen Plus*. Chemical Engineering Process Simulation. 2nd ed. Amsterdam, Elsevier, 2023, pp. 343–360. DOI: 10.1016/B978-0-323-90168-0.00016-0.
62. AspenTech Customer Testimonials. AspenTech. Available at: <https://www.aspentech.com/en/customer-help/testimonials> (Accessed: 29 May 2025).
63. Chemcad License & Download. University of Illinois Webstore: product page. Available at: <https://webstore.illinois.edu/shop/product.aspx?zpid=1216> (Accessed: 29 May 2025).
64. CHEMCAD Frequently Asked Questions. Chemstations. Available at: https://chemstations.com/support/frequently_asked_questions/ (Accessed: 29 May 2025).
65. CHEMCAD. Chemstations. Available at: <https://chemstations.com/chemcad/> (accessed 29 May 2025).
66. DWSIM vs ChemSep Comparison. Slashdot. Available at: <https://slashdot.org/software/comparison/ChemSep-vs-DWSIM/> (Accessed: 29 May 2025).
67. Trusov P.V. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie: uchebnoe posobie* [Introduction to mathematical modeling. Textbook]. Moscow, Logos, 2004, 336 p. (in Russ.).
68. Tatarnikov O. *Obzor programm dlya simvolnoi matematiki* [Review of programs for symbolic mathematics]. *KompyuterPress*, 2005, no. 5, pp. 130–135 (in Russ.).
69. Olenev N., Pechenkin R., Chernetsov A. *Parallelnoe programmirovaniye v MatLab i ego prilozheniya* [Parallel programming in MatLab and its applications], M., CC RAS, 2007, 120 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1766.4481 (in Russ.).
70. Dyakonov V.P. *MATLAB i Simulink dlya inzhenerov* [MatLab and Simulink for engineers]. M., DMK-Press, 2016, 976 p. (in Russ.).
71. Continuous Integration with MatLab and Simulink. MathWorks. Available at: <https://www.mathworks.com/solutions/continuous-integration.html> (Accessed: 29 May 2025).
72. GNU Octave Reviews. SourceForge. Available at: <https://sourceforge.net/projects/octave/reviews/> (Accessed: 29 May 2025).
73. GNU Octave: Numerical Integration. GNU Octave Documentation: manual. Available at: <https://docs.octave.org/v4.0.1/Numerical-Integration.html> (Accessed: 29 May 2025).
74. Scilab Reviews. G2: website. Available at: <https://www.g2.com/products/scilab/reviews?page=2> (Accessed: 29 May 2025).
75. Scilab and X2C for Motor Control Simulations [Microchip Technology]. Available at: <https://www.microchip.com/en-us/solutions/technologies/motor-control-and-drive/motor-control-simulations/scilab-and-x2c> (Accessed: 29 May 2025).
76. Best Circuit Simulation Software (Free and Paid) That You Should Try in 2025. Components101: article. Available at: <https://components101.com/articles/best-circuit-simulation-software-free-and-paid-that-you-should-try-in-2025> (Accessed: 30 May 2025).
77. LTSpice Integration Method Issues. LTwiki: help file. Available at: http://ltwiki.org/files/LTspice-Help.chm/html/integration_method_issues.htm (Accessed: 29 May 2025).
78. Ishchuk A.A., Obolonin I.A. *Skhemotekhnicheskoe modelirovanie v Multisim: uchebnoe posobie* [Circuit simulation in Multisim. Textbook]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2024, 124 p. (in Russ.).
79. Single-Seat Software Licenses for Academia. NI – National Instruments: website. Available at: <https://www.ni.com/da-dk/shop/software-portfolio/single-seat-academic-licenses.html> (Accessed: 29 May 2025).
80. He Y., Xu R. Research on the application of Multisim in electronic design. *Advances in Computer Science Research*, 2018, vol. 77, pp. 365–368 DOI:10.2991/icmcs-18.2018.74.
81. Proteus Commercial Pricing. Labcenter Electronics. Available at: <https://www.labcenter.com/pricing/comm/> (Accessed: 29 May 2025).
82. Proteus PCB Software. Labcenter Electronics. Available at: <https://www.labcenter.com/pcb/> (Accessed: 29 May 2025).
83. KiCad EDA Reviews & Ratings 2025. TrustRadius. Available at: <https://www.trustradius.com/products/kicad-eda/reviews> (Accessed: 29 May 2025).
84. KiCad Schematic Editor. KiCad Documentation: manual. Available at: <https://docs.kicad.org/8.0/en-eschema/eeschema.html> (Accessed: 29 May 2025).
85. PSCAD End User License Agreement. PDF document. Available at: https://www.pscad.com/uploads/ck/files/PSCAD_EULA_Com-Edu-Free-Trial_rev201301827.pdf (Accessed: 29 May 2025).

86. PSCAD Reviews 2025: Details, Pricing, & Features. G2: website. Available at: <https://www.g2.com/products/pscad/reviews> (Accessed: 29 May 2025).

87. Woodford D., Irwin G., Gudmundsdottir U.S. PSCAD/EMTDC. UK, The Institute of Engineering and Technology, 2015, 546 p. DOI: 10.1049/PBPO078E_ch4.

88. Shustrova M.L., Aminev I.M., Baytimirov A.D. *Sredstva chislennogo modelirovaniya gidrodinamicheskikh parametrov processov* [Numerical modeling tools for hydrodynamic process parameters]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, no. 14, pp. 221–224 (in Russ.).

89. Enhancing AI Integration with COMSOL Multiphysics. SciEngineer: blog. Available at: <https://sciengineer.com/enhancing-ai-integration-with-comsol-multiphysics-a-gateway-to-smarter-industrial-optimization/> (Accessed: 30 May 2025).

90. OpenModelica. Available at: <https://www.openmodelica.org/> (Accessed: 29 May 2025).

91. Blochwitz T., Otter M., Åkesson J., Arnold M., Clauss C., Elmqvist H., Friedrich M., Junghanns A., Mauss J., Neumerkel D., Olsson H., Viel A. Functional Mockup Interface 2.0: the standard for tool independent exchange of simulation models. Proceedings of 9th International Modelica Conference, Munich, Germany, 2012, pp. 173–184. DOI: 10.3384/ecp12076173.

92. Scilab. Available at: <https://www.scilab.org/> (Accessed: 29 May 2025).

Nikita M. Dubinin

Postgraduate student, Department of Computer Systems in Management and Design (CSMD), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-929-373-04-98
Email: nikita.d@inbox.ru

Lev A. Gembukh

Postgraduate student, Department of CSMD, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-176-01-32
Email: lev.gembuh@mail.ru

Received: 02.06.2025.

Accepted: 06.08.2025.