

УДК 519.622.2

Программные системы для 1D моделирования

Маничев Владимир Борисович manichev@bmstu.ru

Кожевников Денис Юрьевич kozhevn@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье рассмотрены основные требования, предъявляемые к современным программным системам 1D моделирования динамики технических систем нового поколения при их разработке. Подобные системы в первую очередь предназначены для проектирования изделий микроэлектроники, электротехники и мехатроники. Дается обоснование необходимости использования объектно-ориентированного подхода для разработки программной системы приведенного класса и рассмотрена возможная программная реализация такой системы с математическим ядром в виде набора решателей систем дифференциально алгебраических уравнений из библиотеки MZK.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, мультифизические системы, динамические системы, обыкновенные дифференциальные уравнения, математическое моделирование, программные системы

Введение. В настоящее время рост технологических требований к изделиям наряду с требованиями повышения качества и снижения стоимости производства, а также с требованиями по сокращению сроков выхода изделий на рынок, значительно увеличивает роль, которую играет быстрая и точная оценка проектируемого изделия на самых ранних стадиях проектирования, когда точные трехмерные модели конструкции изделия еще не известны, а также верификация принимаемых проектных решений на этих стадиях.

Эту задачу решают системы инженерного анализа проектных решений — Computer Aided Engineering (CAE) системы, имеющие в основе различные программные системы (ПС).

Условно такие ПС, основанных на решении систем дифференциальных уравнений, можно разделить на две большие группы:

1) ПС для анализа на распределенном уровне (3D моделирование), когда объектом анализа является математическая модель технического объекта в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) относительно пространственных независимых переменных x, y, z ;

2) ПС для анализа на сосредоточенном уровне (1D моделирование), когда объектом анализа является система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) относительно временной независимой переменной t .

Моделирование на распределенном уровне характеризуется высокой степенью точности получаемых результатов, но требует значительных затрат времени и вычислительных ресурсов и редко может применяться на самых

ранних стадиях проектирования. Среди ПС, выполняющих моделирование на распределенном уровне, следует выделить MSC.Nastran [1], ANSYS [2], COMSOL [3], ABAQUS [4], FlowVision [5], ЛОГОС [6].

На этом уровне для решения ДУЧП применяются методы конечных разностей, конечных элементов, конечных объемов и т. п. на основе конечно разностных аппроксимаций переменных по x , y , z . Так как конечно разностная аппроксимация по времени физически не достоверна, поскольку время, в отличие от пространственных координат, изменяется только вперед по оси времени, поэтому на этом уровне при изменении времени, производные по x , y , z полагаются равными нулю, а полученные системы ОДУ решаются пошаговыми методами, обычно с постоянным очень маленьким шагом, чтобы после каждого временного шага изменения по пространственным координатам были небольшие, например, для механических систем часто методом Ньюмарка.

Моделирование на сосредоточенном уровне позволяет получить достаточно точные результаты за приемлемое время без больших вычислительных затрат при использовании, поэтому оно находит все большее применение при проектировании изделий промышленности на самых ранних стадиях проектирования, когда известны требования к функциональности изделия, но еще не определены конкретные конструкционные требования к 3D-моделям изделия (точная геометрия, материалы деталей и т. д., и т. п.), а так же при упрощенном, сосредоточенном представлении таких моделей на более поздних стадиях проектирования.

В области схемотехнического моделирования электронных схем к ПС этого уровня относятся комплексы на основе решателя SPICE (есть примеры моделирования мультифизических систем), рассмотренные далее, в области моделирования механических систем ПС MSC.ADAMS [7] (расширяется на моделирование мультифизических систем) и др., в области моделирования именно мультифизических технических систем MATLAB-SIMULINK, Siemens Amesim, SimulationX, 20-Sim и на основе языка Modelica [8]: Dassault Systemes Dymola, Wolfram System Modeler и Maplesim, рассмотренные далее.

В настоящее время основным недостатком первых ПС для 1D моделирования на сосредоточенном уровне является их узкая физическая направленность, так как рост современных функциональных требований к изделию подразумевает одновременное моделирование разнородных физических систем, в которых учтено взаимное влияние друг на друга процессов, имеющих разную физическую природу, т. е. сейчас крайне актуально моделирование мультифизических систем: совместное моделирование электрических, электронных, механических, тепловых, гидравлических, пневматических, оптических систем и т. п.

Как пример, можно привести задачи моделирования изделий микро мехатроники, например, проектирование микроэлектромеханических систем (МЭМС, MEMS — MicroElectroMechanical Systems — микроустройств самых разнообразных конструкций и назначения, производимых сходными метода-

ми с использованием модифицированных групповых технологических приемов микроэлектроники. Существующие ПС схемотехнического моделирования электронных схем пока также не предоставляют пока возможностей проведения моделирования систем, состоящих из физических разнородных подсистем.

ПС Схемотехнического моделирования на основе SPICE решателя. SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — программа моделирования электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. Является мощной программой, используемой в разработке как интегральных схем, так и дискретных схем для проверки целостности схемы и анализа ее поведения [9]. Последовательно было разработано три версии: SPICE1 (1973г.), SPICE2 (1975г.) и SPICE3 (1989г.). За эти годы пакеты схемотехнического моделирования бурно развивались, но при этом оставался постоянным язык описания электронных схем — список цепей (netlist) формата SPICE. В настоящее время рост производительности современных компьютеров и суперкомпьютеров позволяет на схемотехническом уровне моделировать весьма сложные функциональные электронные блоки и на первый план выходит проблема одновременного моделирования физически разнородных подсистем, в первую очередь, электронных и тепловых, а также механических, пневматических, гидравлических, химических и т. п. Но в подавляющем числе этих ПС реализовано только дискретно-аналоговое моделирование электронных схем на базе языков SPICE, Verylog, VHDL. Только компания Synopsys, которая купила ПС ANSYS, немного продвинулась в решении вышеуказанной проблемы. Ниже приводится краткий обзор лучших ПС схемотехнического проектирования, созданных на базе SPICE ядра, и их основных особенностей.

ПС Accusim (Mentor Graphics — сейчас это Siemens EDA) [10]. Эта программа сегодня представляет собой гибкие и мощные алгоритмы моделирования, применяемые как для высокоточного моделирования ИС, так и для проектирования печатных плат. Программа позволяет моделировать коммерческие ИС, содержащие более 100 000 транзисторов.

ПС компании Cadance Design Systems [11]. Фирма Cadence предлагает два пакета схемотехнического моделирования. ПС SpectreX Simulation использует те же самые алгоритмы, что и SPICE: точные методы численного интегрирования, итерации Ньютона — Рафсона и точные матричные решения систем линейных алгебраических уравнений. В программе применяются современные технологии для работы с разреженными матрицами и узловые алгоритмы, что позволяет моделировать очень большие схемы (более 50 000 транзисторов). Вторая ПС, это хорошо известная, бесплатная ПС OrCAD-PSpice.

ПС NI Multisim (National Instruments) [12]. NI Multisim позволяет объединить процессы разработки электронных устройств и тестирования на основе технологии виртуальных приборов для учебных и производственных целей. Подразделение Electronics Workbench Group компании National Instruments

разработало Multisim и Multiboard, самых последних версий программного обеспечения для интерактивного SPICE-моделирования и анализа электрических цепей, используемых в схемотехнике, проектировании печатных плат и комплексном тестировании. К сожалению, пока нет возможностей мультифизического моделирования.

ПС PrimeSim HSPICE (Synopsys Inc.) [13]. Повышенная «золотая точность» — это краеугольный камень PrimeSim HSPICE, он легко интегрируется с другими средствами моделирования компании. PrimeSim HSPICE является отраслевым «золотым стандартом» для точного моделирования схем и предлагает сертифицированные модели МОП устройств с современными алгоритмами моделирования и анализа.

Особо следует выделить ПС SABER (Synopsys Inc.) [14]. Это один из самых мощных пакетов схемотехнического и многоуровневого и даже мультифизического моделирования. Пакет включает собственную разработку — SABER симулятор, работающий с библиотекой емкостью более 8000 моделей компонентов. Используются следующие виды устройств: смешанные ИС; дискретные полупроводники; пассивные устройства; мощные полупроводники; электро-термические устройства; электро-гидравлические устройства; электро-механические устройства; электро-оптические устройства.

ПС SYMICA (Symica, Зеленоград, Россия) [15]. Основные особенности пакета SYMICA: дружественный и интуитивно понятный интерфейс схемотехнического редактора на русском языке; возможность использовать аналоговое поведенческое, цифровое или транзисторное представление подсхем, гибкие настройки моделирования, совместимость с netlist, моделями и методами анализа HSPICE и SpectreX.

Главный недостаток рассмотренных ПС состоит в том, что методы решения систем ОДУ встроены в математические модели базовых схемных элементов — в модели емкостей и индуктивностей, поэтому в них реализованы только два метода, которые это позволяют: — методы Гира и трапеций. Но эти методы не справляются со сверхжесткими системами ОДУ (число обусловленности более 10^6). Между тем постоянные времени в микроэлектронике уже оцениваются в 10^{-12} — 10^{-15} секунд, а постоянные времени в механике обычно измеряются секундами, поэтому жесткость систем ОДУ в мехатронике будет порядка 10^{12} и более.

ПС Блочного, энергетического и объектно-ориентированного моделирования мультифизических технических систем. В настоящее время с учетом обзора зарубежных ПС для мультифизического моделирования можно выделить два основных подхода: блочный, энергетический на основе бонд-графов и объектно-ориентированное моделирование (ООМ) мультифизических динамических систем. При этом можно выделить три направления разработок:

– блочное, энергетическое на основе бонд-графов и языка SimScape в ПС MATLAB-SIMULINK компании Mathworks и подобных языков в ПС SimCenter AMESim компании Siemens Digital Industry Software, в ПС SimulationX группы

компаний ESI-ITI GmbH, Германия, в PC 20-sim, компании Controllab, Нидерланды и в отечественных PC Engee и Simintech;

- OOM на основе языка Model Vision Language (MVL) в PC Rand Model Designer;

- OOM на основе языка Modelica в соответствующих PC.

Язык SimScape в PC MATLAB-SIMULINK компании Mathworks предназначен для создания моделей мультифизических систем в среде Simulink [16]. Доступно создание собственных моделей компонентов на языке Simscape, основанном на MATLAB. Язык SimScape позволяет создавать текстовые компоненты, домены и библиотеки для физического моделирования. Модели параметризуются при помощи переменных и выражений MATLAB. Модели SimScape создаются при помощи сборки компонентов в единую схему. SimScape содержит много готовых настраиваемых моделей компонентов. Предусмотрен экспорт моделей в формате FMI/FMU. MATLAB и Simulink могут быть использованы для автоматизации многих задач построения моделей. Блоки Simulink представляют собой основные математические операции. Когда вы подключаете блоки Simulink, они связываются между собой **направленными** связями типа вход-выход, т. е. чисто математическими связями. Технология SimScape использует энергетический подход на основе бонд-графов и позволяет создать представление системы на основе подхода мультифизической модели. Согласно этому подходу каждая система представлена как состоящая из функциональных элементов, которые взаимодействуют друг с другом путем обмена **энергией** через их порты. Эти порты подключения с **ненаправленными** связями. Они имитируют энергетические связи между элементами. Количество портов подключения для каждого элемента определяется количеством потоков энергии, которыми он обменивается с другими элементами в системе, и зависит от уровня идеализации. Поток энергии характеризуется своими переменными. Каждый поток энергии связан с двумя переменными: *through* (типа напряжения в электрических цепях) и *across* (типа тока в электрических цепях). Обычно это переменные, произведение которых это поток энергии в ваттах (рис. 1).

В PC SimulationX и 20-sim используются аналогичные понятия (рис. 2) [17].

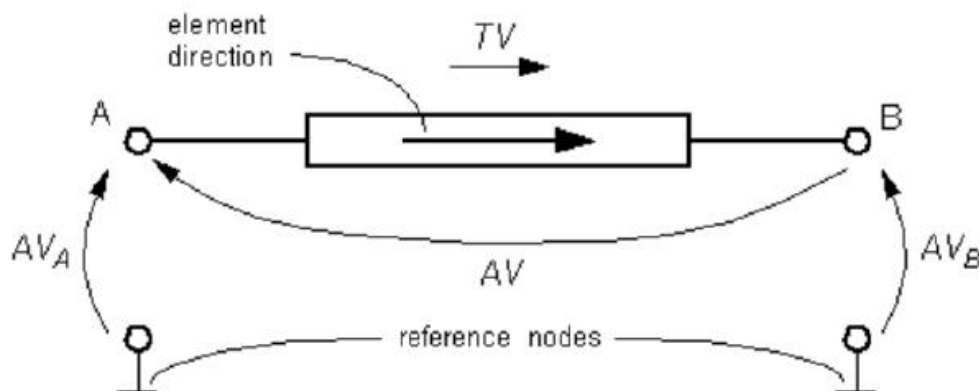


Рис. 1. Переменные Through (TV) и Across (AV) в PC MATLAB-SIMULINK-SimScape

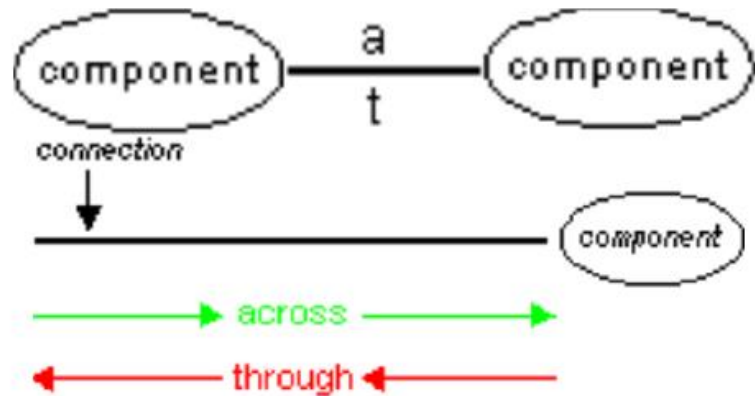


Рис. 2. Переменные Through (t) и Ecross (a) в PC 20-sim

Системы ОДУ и в SimScape и в 20-sim получаются в полуявном виде и возможно использовать 11 методов решения систем ОДУ, реализованных в MATLAB. Но ни один из этих методов не решает сверхжесткие системы ОДУ. Одна из лучших реализаций блочного, энергетического подхода это немецкая разработка — PC SimulationX [18]. Предлагается 6 методов решения систем ОДУ, представленных символично в полуявной форме

$$dXp/dt = F(Xp, U, P, Z, ZF, t);$$

$$Y = G(Xp, U, P, Z, ZF, t);$$

$$Z = H1(Xp, U, P, ZF, t);$$

$$ZF = H2(Xp, U, P, Z, ZF, t),$$

где Xp — вектор переменных состояния; U — вектор входных переменных; Y — вектор выходных переменных; P — вектор параметров; Z — вектор дискретных переменных; ZF — вектор нулевых функций; t — время.

Язык MVL это классическая реализация OOM, т. е. объектно-ориентированного, компонентного моделирования динамических систем на основе языка Unified Modeling Language (UML) [19]. Представление сложной системы и ее модели в виде компонентов и связей между ними — традиционный инженерный подход к проектированию сложных динамических систем. Язык (UML) стал практическим стандартом языков объектно-ориентированного моделирования не только дискретных систем, но и событийно управляемых динамических систем [20]. Системы ОДУ, к сожалению, только в полуявной форме. В PC Rand Model Designer реализованы 2 явных и 3 неявных метода интегрирования.

Язык Modelica это классическая реализация объектно-ориентированного, компонентного моделирования динамических систем [8], намного более мощный для мультифизического моделирования, чем UML/MVL, так как системы ОДУ представлены в общей, неявной форме. Язык Modelica является непатентованным, объектно-ориентированным, основанном на уравнениях языком. Это язык для удобного моделирования сложных мультифизических систем, содержащих, например, механическую, электрическую, электронную,

гидравлическую, тепловую, и электрическую энергию или ориентированных на компонентное моделирование. Доступна спецификация языка Modelica 3.5 и доступны библиотеки Modelica с большим набором методов [8]. Одна из лучших ПС на этом уровне это американская Wolfram System Modeler [21]. В Wolfram System Modeler 5 методов решения систем ОДУ, но ни один из вышеуказанных методов решения систем ОДУ не решил сверхжесткую тестовую задачу, рассмотренную ниже.

Требования к современной ПС для 1D моделирования и универсальные тестовые задачи. Исходя из вышеизложенного и анализа рассмотренных выше ПС, можно сформулировать требования к современному ПС для 1D моделирования на сосредоточенном уровне:

- Открытость — подразумевает не только возможность подключения к потокам данных на любом этапе моделирования и анализа для сторонних программных продуктов, но и возможность создания собственных моделей и библиотек компонентов профильными экспертами, не обладающими специальной квалификацией (например, глубоким знанием программирования).
- Возможность моделирования технических объектов, модели которых состоят из различных взаимозависимых формальных описаний процессов, принадлежащим к разнородным физическим подсистемам: электрической, механической, гидравлической, тепловой и т. п. (формальные мультифизические модели). Такие модели реализуют требование максимальной физической адекватности и описываются набором дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ) в общем виде $F(D, dD/dt, Al, t) = 0$, дополненным множеством условий дискретизации $ZF(D, dD/dt, Al) = 0$, где F — вектор функция модели, D — вектор дифференциальных переменных, Al — вектор алгебраических переменных.
- Ориентированность на инженера, как конечного пользователя, который не должен обладать специальными знаниями в области численных методов, программировании, математической физики и знанием способа формирования систем ДАУ для анализируемого изделия.
- Отделение описания модели (уравнений модели) от методов моделирования (численных методов решения систем ДАУ). Это требование вытекает из условия открытости ПС и также позволяет верифицировать модель в других ПС и передавать модели в формате FMI/FMU.
- Надежность и высокая точность математического ядра с возможностью его модернизации и замены.
- Возможность выполнения вычислений на специально выделенном сервере или кластере, а также возможность развертывания распределенной системы моделирования в корпоративной сети предприятия.

Возможность расчета формальных моделей мультифизических систем налагает специальные требования к математическому ядру: помимо уже указанной возможности описания ДАУ в общем виде, что позволяет, например, язык Modelica, не менее важным требованием является надежность, и достоверность расчета.

В качестве примера подобных задач приведем базовый набор тестовых задач, используемый сейчас при разработке российского математического ядра, математической библиотеки программ MZK, ориентированной на расчет систем ДАУ с высокой жесткостью (большой разброс собственных значений фундаментальных решений системы ОДУ) и высокой добротностью (большой разброс частот фундаментальных решений системы ОДУ).

В качестве базового набора тестовых задач были разработаны пять тестовых линейных однородных систем ОДУ 2-го порядка, имеющих аналитические решения, соответствующие пяти базовым фундаментальным решениям, показанным на рис. 2 и рис. 3 в статье [23]. Тестовая линейная система ОДУ 2-го порядка имеет вид: $dX/dt = A * X + B$, где X — вектор неизвестных системы ОДУ, A — матрица постоянных коэффициентов системы размером $[2 \times 2]$, B — постоянный вектор. Полученные пять тестовых задач с известным аналитическим решением, представлены в статье [23].

Для проверки возможности решения сверхжестких систем ОДУ предлагается схема на рис. 3 для параметра $MU > 10e7$.

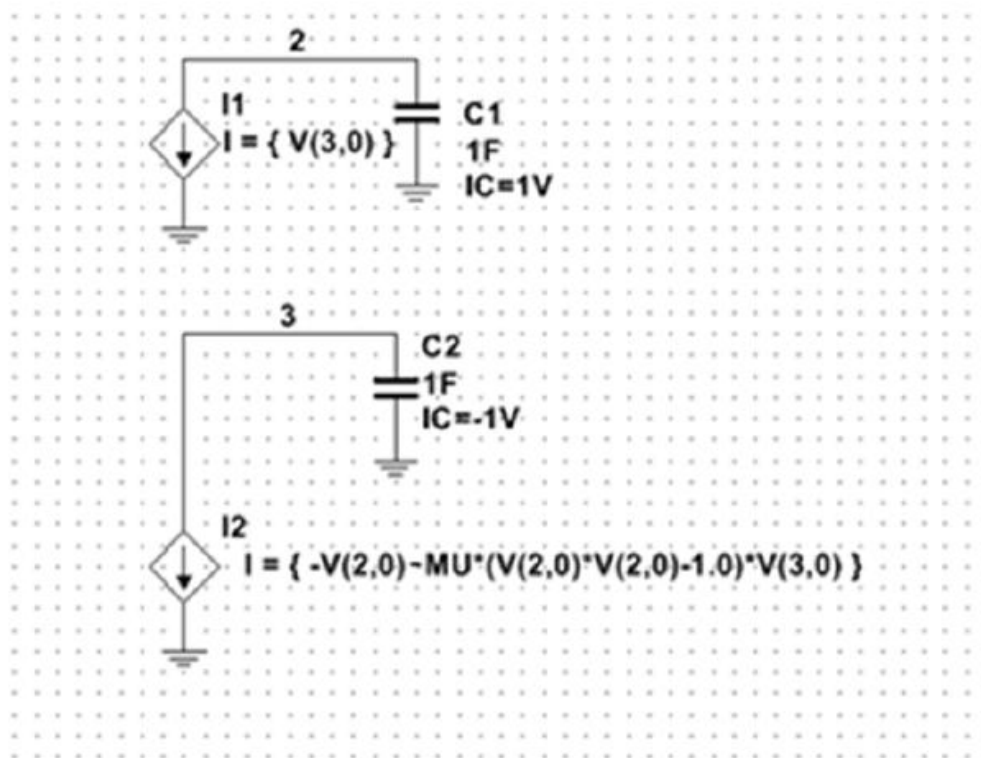


Рис. 3. Схема для сверхжестких систем ОДУ (параметр $MU > 10e7$)

Ни один из рассмотренных ПС схемотехнического моделирования и ни один из рассмотренных ПС объектно-ориентированного моделирования мультифизических технических систем не справляется со сверхжесткими системами ОДУ с параметром MU более $10e7$ и параметрами интегрирования, взятыми по умолчанию. Все решатели систем ОДУ из библиотеки MZK решают этот тест для MU вплоть до $10e16$ с параметрами интегрирования по умолчанию.

Заключение. Растущие технологические требования к изделиям выводят на первое место задачу функционального моделирования сложных мультифизических технических объектов с детальными физически адекватными и точными моделями.

В настоящее время на рынке по объективным причинам не представлено решения, наиболее полно удовлетворяющего перечисленным выше требованиям и позволяющего на 1D сосредоточенном уровне моделирования проводить надежный анализ динамики технических объектов с формальными, мультифизическими моделями. Наиболее перспективной представляется разработка новой ПС для 1D моделирования мультифизических систем на основе ООМ с обязательной поддержкой языка Моделика и на базе разрабатываемого, нового математического ядра MZK.

Литература

- [1] URL: <https://www.mscsoftware.com/product/msc-nastran> (accessed 01.05.2025).
- [2] URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys> (accessed 01.05.2025).
- [3] URL: <https://www.comsol.com/> (accessed 01.05.2025).
- [4] URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/cae> (accessed 01.05.2025).
- [5] URL: https://thesis.com.ru/own_design/flowvision/ (accessed 01.05.2025).
- [6] URL: <https://digitalrosatom.ru/marketplace/logos> (accessed 01.05.2025).
- [7] URL: <https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/adams> (accessed 01.05.2025).
- [8] URL: <https://modelica.org> (accessed 01.05.2025).
- [9] URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/SPICE> (accessed 01.05.2025).
- [10] URL: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Mentor_Graphics (accessed 01.05.2025).
- [11] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cadence_Design_Systems (accessed 01.05.2025).
- [12] URL: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html> (accessed 01.05.2025).
- [13] URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Synopsys> (дата просмотра 01.05.2025).
- [14] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Saber_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Saber_(software)) (accessed 01.05.2025).
- [15] URL: <https://symica.ru/> (дата обращения 01.05.2025).
- [16] URL: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html> (accessed 01.05.2025).
- [17] URL: <https://www.20sim.com/> (accessed 01.05.2025).
- [18] URL: <https://www.esi-group.com/products/system-simulation> (accessed 01.05.2025).
- [19] Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. *Компонентное моделирование сложных динамических систем*. Санкт-Петербург, ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020, 208 с.
- [20] URL: <https://www.uml.org/> (accessed 01.05.2025).
- [21] URL: <https://www.wolfram.com/system-modeler> (accessed 01.05.2025).
- [22] Акиншин А.А., Жук Д.М., Ильницкий А.О., Кожевников Д.Ю., Маничев В.Б. Метод моделирования динамики технических систем на основе формальных схем. *Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем — 2005. Сб. науч. тр.* Москва, ИППМ РАН, 2005, с. 19–24.
- [23] Жук Д.М., Кожевников Д.Ю., Маничев В.Б. Достоверность и точность решения систем ОДУ в среде моделирования разнородных динамических систем ПА10 (РА10). *Проблемы разработки перспективных микро- и нано-электронных систем*, 2018, вып. 1, с. 97–102. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-1-97-102>

Software systems for 1D modeling

Manichev Vladimir Borisovich

manichev@bmstu.ru

Kozhevnikov Denis Yurievich

kozhevn@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

This article examines the key requirements for modern 1D software systems for modeling the dynamics of next-generation technical systems during their development. Such systems are primarily intended for the design of microelectronics, electrical engineering, and mechatronics products. The rationale for using an object-oriented approach to developing a software system of this class is presented, and a possible software implementation of such a system with a mathematical core consisting of a set of differential-algebraic equation solvers from the MZK library is discussed.

Keywords: *computer-aided design, multi-physics systems, dynamic systems, ordinary differential equations, mathematical modeling, software systems*