

Объектно-ориентированный подход для разработки современного программно-методического комплекса моделирования разнородных технических систем

Д.М. Жук, Д.Ю. Кожевников, В.Б. Маничев, Т.А. Цветковская

МГТУ имени Н.Э.Баумана, manichev@bmstu.ru

Аннотация — В статье рассмотрены основные требования, предъявляемые при разработке современного программно-методического комплекса моделирования динамики технических систем нового поколения, в первую очередь изделий микроэлектроники, вычислительной техники и электротехники. Дается обоснование необходимости объектно-ориентированного подхода для разработки программно-методического комплекса приведенного класса и рассмотрена программная реализация данного комплекса с математическим ядром решателей систем дифференциально алгебраических уравнений из библиотеки MZK.

Ключевые слова — автоматизированное проектирование электронных схем, математическое моделирование, системы инженерного анализа, динамические системы, обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ), дифференциально алгебраические уравнения (ДАУ).

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время непрерывно растут требования со стороны организаций, выпускающих конечную продукцию, по снижению стоимости развертывания производства изделий и сокращению сроков выпуска изделий на рынок при одновременном повышении качества и снижении стоимости продукции. Возрастает роль быстрой и точной оценки принимаемых проектных решений. При этом крайне важна именно требуемая точность оценки, поскольку стоимость ошибок в принятии проектных решений на ранних стадиях проектирования чрезвычайно высока. Для решения задач моделирования, анализа и оптимизации проектных решений применяются системы инженерного анализа проектных решений – Computer Aided Engineering (CAE) системы, основанные на соответствующих программно-методических комплексах (ПМК), которые можно разделить на две группы: ПМК на уровне распределенных систем и на уровне сосредоточенных систем. Математическими моделями технических объектов при проведении анализа на уровне распределенных систем являются дифференциальные уравнения в частных производных. Моделирование на этом уровне характеризуется высокой степенью точности получаемых результатов, но требует значительных затрат времени и вычислительных ресурсов и редко может применяться на ранних стадиях проектирования. Среди ПМК,

выполняющих моделирование на уровне распределенных систем, следует выделить MSC.Nastran [1], ANSYS [2], COMSOL [3]. Моделирование на уровне сосредоточенных систем связано с решением систем ОДУ-ДАУ и позволяет получить точные результаты за приемлемое время без использования больших вычислительных ресурсов. Поэтому моделирование на этом уровне находит все большее применение при проектировании изделий промышленности на ранних стадиях проектирования. К ПМК на уровне сосредоточенных систем относятся ПМК схмотехнического моделирования электронных схем на основе SPICE решателя, ПМК моделирования механических систем MSC.ADAMS [4], ПМК моделирования мульти доменных технических систем на основе языка Modelica [5]: Wolfram System Modeler, Maplesim, SimulationX, Open Modelica, а также ПМК серии ПА4-ПА9 [21] и др. В настоящее время наметилась тенденция к увеличению рынка подобных систем, подробно рассмотренных далее.

Однако, широкое распространение системы моделирования на уровне сосредоточенных систем получили только при схмотехническом проектировании изделий микроэлектроники, вычислительной техники и электротехники, где применяются специализированные программные средства, в других же областях, в частности, при проектировании изделий мехатроники указанные системы используются лишь эпизодически. Это связано с отсутствием на рынке универсальных систем, удовлетворяющих требованиям, сформулированным далее.

К недостаткам имеющихся на рынке систем следует отнести их узкую специализацию, либо на моделирование электронных изделий, либо на проектирование механических систем, так лидер на этом рынке MSC.ADAMS ориентирован преимущественно на проектирование изделий автомобильной промышленности, пополнение библиотеки моделей в этом ПМК крайне затруднено и требует от пользователей навыков программирования на языке FORTRAN. Существующие ПМК схмотехнического моделирования, за редким исключением, не предоставляют возможностей моделирования систем, состоящих из физически различных подсистем – мульти физическое, мульти дисциплинарное или мульти доменное моделирование

(multi physics, multi discipline or multi domain modeling). Между тем возрастает актуальность моделирования изделий микро-мехатроники, например, проектирование МикроЭлектроМеханических Систем или сокращенно МЭМС (MEMS – MicroElectroMechanical Systems) - это множество микро-устройств самых разнообразных конструкций и назначения, производимых с использованием модифицированных групповых технологических приемов микроэлектроники. Данные технологии весьма перспективны, особенно при ударных воздействиях на МЭМС, которые требуют соответствующих точных расчетов. В связи с этим могут быть сформулированы следующие требования, которым должны удовлетворять разрабатываемые в настоящее время современные ПМК моделирования на уровне сосредоточенных систем:

- комплексное моделирование технических объектов, состоящих из различных физических подсистем - электрических, механических, гидравлических, пневматических, тепловых, химических и т.п.
- надежность и высокая точность математических ядер таких ПМК (решателей систем ОДУ-ДАУ), возможность легкой замены и расширения математического ядра;
- наличие интерактивных средств создания моделей пользователями, при этом от пользователя не должно требоваться специальных, глубоких знаний в области программирования и/или численных методов;
- наличие средств параллельной работы разработчиков моделей, возможность выполнения вычислений на специально выделенном сервере или кластере;

Для решения перечисленных задач необходимо создание нового поколения ПМК моделирования динамических процессов в технических системах. Учитывая приведенные выше требования, а также опыт, накопленный при разработке программ ПА-4, ПА-6, ПА-7, ПА-9, предполагается разработать ПМК моделирования нового поколения ПА-10 на основе надежных решателей систем ОДУ библиотеки MZK [20, 21, 23, 25].

II. ПМК 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 [6]. Последовательно было разработано три версии Berkeley SPICE: SPICE1 (1973 г.), SPICE2 (1975 г.) и SPICE3 (1989 г.). С ранних версий SPICE являлась программным обеспечением с открытыми исходными кодами, что способствовало ее широкому распространению и применению. SPICE стала

индустриальным стандартом моделирования электронных схем. В результате SPICE послужила основой для разработки множества других программ моделирования схем, как в академической, так и в промышленной среде. За эти годы пакеты схемотехнического моделирования бурно развивались, но при этом оставался постоянным язык описания электронных схем – список цепей нетлист (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 ПМК реализовано только дискретно-аналоговое моделирование электронных схем на базе языков SPICE, Verilog, VHDL. Только компания Synopsys немного продвинулась в решении вышеуказанной проблемы. Ниже приводится краткий обзор лучших ПМК схемотехнического проектирования, созданных на базе SPICE ядра, и их основных особенностей.

ПМК Accusim (Mentor Graphics – Siemens EDA) [7]. 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.

ПМК компании Cadence Design Systems [8]. Фирма Cadence предлагает два пакета схемотехнического моделирования. ПМК SpectreX Simulation использует те же самые алгоритмы, что и SPICE: точные методы численного интегрирования, итерации Ньютона-Рафсона и точные матричные решения. В программе применяются современные технологии для работы с разреженными матрицами и узловые алгоритмы, что позволяет моделировать очень большие схемы. Программа написана на языке Си. Каждый алгоритм разрабатывался с использованием последних алгоритмических технологий. Поддерживает все типы входных файлов и видов анализа, что и у Berkeley SPICE и мощный механизм создания моделей пользователем. Алгоритмы базовых видов анализа основаны на алгоритмах Berkeley SPICE3. Высокая точность моделирования достигается за счет использования точных моделей компонентов. На библиотеку компонентов Cadence, которая содержит более 4600 моделей, установлен промышленный стандарт. В библиотеке содержатся модели элементов для мощной электроники, цифровые компоненты, аналоговые ИС, а также сложные модели компонентов (system-on-a-chip). Второй, это хорошо известный, бесплатный ПМК OrCAD-PSPICE.

ПМК NI (National Instruments) Multisim [9]. 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, самые последние версии программного обеспечения для интерактивного SPICE моделирования и анализа электрических цепей, используемых в схемотехнике, проектировании печатных плат и комплексном тестировании. Эта платформа связывает процессы тестирования и проектирования, предоставляя разработчику электронного оборудования гибкие возможности технологии виртуальных приборов. Совместное использование программного обеспечения для моделирования электрических цепей Multisim компании National Instruments со средой разработки измерительных систем LabVIEW, позволяет сравнивать теоретические данные с реальными непосредственно в процессе создания схем обычных печатных плат, что снижает количество проектных итераций, число ошибок в прототипах и ускоряет выход продукции на рынок. Можно использовать Multisim для интерактивного создания принципиальных электрических схем и моделирования их режимов работы. База данных компонентов включает более 1200 SPICE моделей элементов от ведущих производителей, таких как Analog Devices, Linear Technology и Texas Instruments, а также более 100 новых моделей импульсных источников питания. Помимо этого, в новой версии программного обеспечения появился помощник Convergence Assistant, который автоматически корректирует параметры SPICE, исправляя ошибки моделирования. Добавлена поддержка моделей МОП транзисторов стандарта BSIM4, а также расширены возможности отображения и анализа данных, включая новый пробник для значений тока и обновленные статические пробники для дифференциальных измерений.

ПМК SYMICA (Symica, Зеленоград, Россия) [10]. Основные особенности пакета SYMICA: дружественный и интуитивно понятный интерфейс схемотехнического редактора; возможность использовать аналоговое поведенческое, цифровое или транзисторное представление подсхем; гибкие настройки моделирования; совместимость с нетлистами, моделями и методами анализа HSPICE и Spectre; моделирование поведенческого описания на языке Verilog-A; точное моделирование аналоговых схем, критичных к точности моделирования, протестированное на совместимость с промышленными стандартами и на наборе более чем из 1700 тестовых схем; мощный постпроцессор для просмотра и обработки результатов моделирования.

ПМК PrimeSim HSPICE (Synopsys Inc.) [11]. 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 MOS-устройств с современными алгоритмами

моделирования и анализа. PrimeSim HSPICE широко используется в моделировании целостности сигналов микросхемы / корпуса / объединительной платы, а также в разработке аналого-цифровых ИС со смешанными сигналами.

Особо следует выделить ПМК SABER (Synopsys Inc.) [12]. Это один из самых мощных пакетов схемотехнического и многоуровневого 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.

Главный недостаток рассмотренных ПМК состоит в том, что методы решения ОДУ встроены в математические модели базовых схемных элементов – в модели емкостей и индуктивностей, поэтому в них реализованы только два метода, которые позволяют это, – 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 времена в механике обычно измеряются секундами, поэтому сверхжесткость систем ОДУ-ДАУ в мехатронике будет порядка 10^{12} .

III. ПМК ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящее время объектно-ориентированный подход к моделированию мульти доменных динамических систем фактически стал стандартом. Следует выделить три направления разработок:

- на основе языка Model Vision Language (MVL) в ПМК Rand Model Designer;
- на основе языка SimScape в ПМК MATLAB-SIMULINK компании Mathworks и подобного языка в ПМК 20-sim;
- на основе языка Modelica в соответствующих ПМК.

Язык MVL это классическая реализация объектно-ориентированного, компонентного моделирования динамических систем [13]. Представление сложной системы и ее модели в виде компонентов и связей между ними – традиционный инженерный подход к проектированию сложных динамических систем. Полезность и эффективность объектно-ориентированного подхода при изучении и проектировании многокомпонентных сложных динамических систем уже ни у кого не вызывает сомнения. Язык Unified Modeling Language (UML) стал практическим стандартом языков объектно-ориентированного моделирования не только дискретных систем, но и событийно-управляемых динамических систем [14]. Язык MVL расширяет этот язык и на объектно-ориентированное моделирование

непрерывных динамических систем. Концепция объектно-ориентированного моделирования проста и понятна. Модель системы собирается из компонентов, соединенных связями. Каждый компонент может содержать параметры, настраиваемые пользователем. Общее описание компонента с разделением переменных на внутренние (невидимые) переменные и внешние (видимые) называется классом; параметры, переменные, процедуры, функции и другие его элементы – атрибутами. Система ОДУ формируется в полу явном виде, с разделением дифференциальных и алгебраических уравнений, поэтому возможна реализация как явных, так и неявных методов интегрирования. В ПМК Rand Model Designer реализованы 2 явных и 3 неявных метода.

Язык SimScape в ПМК MATLAB-SIMULINK компании Mathworks предназначен для создания моделей физических систем в среде Simulink [15]. Моделируются такие системы, как электродвигатели, мостовые выпрямители, гидроприводы и системы охлаждения. Дополнительные продукты SimScape предоставляют более сложные компоненты и инструменты анализа. SimScape помогает разрабатывать системы управления и тестировать производительность на уровне системы. 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. 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 математические связи. Технология SimScape позволяет создать представление системы на основе подхода физической 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 ненаправленные. Они имитируют физические 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 - поток энергии (рис. 1).

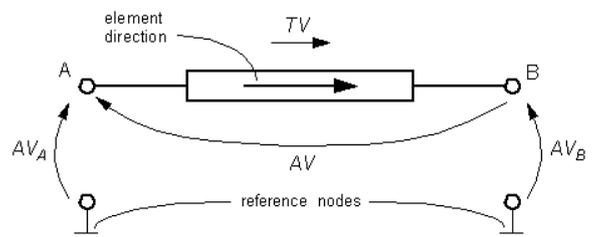


Рис. 1. Переменные Through (TV) и Across (AV) в ПМК MATLAB-SIMULINK-SimScape

В ПМК 20-sim используются аналогичные понятия (рис. 2) [16].

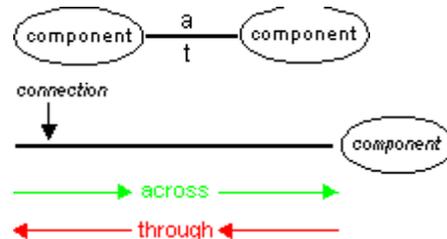


Рис. 2. Переменные Through (t) и Across (a) в ПМК 20-sim

Следует отметить, что этот подход к моделированию мульти доменных систем был предложен в нашей статье 2010 года [17].

Системы ОДУ и в SimScape и в 20-sim получаются в полу явном виде и поэтому возможно использовать 11 методов решения систем ОДУ, реализованных в MATLAB. Но ни один из этих методов не решает сверхжесткие системы ОДУ-ДАУ.

Язык Modelica это классическая реализация объектно-ориентированного, компонентного моделирования динамических систем [5]. Язык Modelica является непатентованным, объектно-ориентированным, основанным на уравнениях, языком для удобного моделирования сложных мульти доменных физических систем, содержащих, например, механическую, электрическую, тепловую, гидравлическую, пневматическую или химическую энергию, ориентированных на компонентное моделирование, основанное на спецификации языка Modelica 3.5. Доступна открытая стандартная библиотека Modelica с большим набором моделей [22]. В частности, она содержит около 1600 моделей и 1350 функций из многих областей. Модели SPICE3 были также импортированы в эту библиотеку, но, например, SPICE тесты в ПМК Open Modelica правильно рассчитать не удалось. ПМК для моделирования на основе языка Modelica доступны коммерчески и бесплатно, например, JModelica.org, Open Modelica, ANSYS SImploer, Dymola CATIA Systems, SimCenter AMESim Siemens Digital Industry Software, MapleSim, MWorks, SimulationX, Wolfram System Modeler. Модели Modelica удобно импортировать в Simulink с помощью функций экспорта Dymola, MapleSim и SimulationX. Промышленность использует язык Modelica и библиотеки Modelica для разработок на основе соответствующих моделей. В частности, многие

автомобильные компании, такие как Audi, BMW, Daimler, Ford, Toyota, VW, используют Modelica для разработки энерго-эффективных транспортных средств или улучшенных систем кондиционирования воздуха. Также Modelica используют поставщики электростанций, такие как ABB, EDF, Siemens, как и многие другие компании. Одни из лучших реализаций это немецкая разработка SimulationX [18] и американская Wolfram System Modeler [19]. В первой предлагается 6 методов решения систем ОДУ, представленных символично в полу явной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, p, z, z_f, t) \\ y &= g(x, u, p, z, z_f, t) \\ z &= h_1(x, u, p, z_f, t) \\ z_f &= h_2(x, \dot{x}, u, p, z, t) \end{aligned}$$

где x переменные состояния, u входные переменные, y выходные переменные, p параметры, z – дискретные переменные, z_f нулевые функции, t время. В ПМК SimulationX реализованы 6 методов решения систем ОДУ-ДАУ, а в Wolfram System Modeler 5 методов, но ни один из вышеуказанных методов решения систем ОДУ-ДАУ не решил сверхжесткую тестовую задачу, рассмотренную ниже.

IV. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ

В качестве базового набора тестовых задач, на которых отлаживались основные модули в библиотеке MZK, были разработаны пять тестовых линейных однородных систем ОДУ 2-го порядка, имеющих аналитические решения, соответствующие пяти базовым фундаментальным решениям, показанным на рис. 2 и на рис. 3 в статье [21]. Соответствующая тестовая линейная система ОДУ 2-го порядка имеет вид:

$$dX/dt = A \cdot X + B,$$

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 таблице 1 в статье [21]. Соответствующая электрическая схема для этих тестов в ПМК Open Modelica показана на рис. 3.

Для проверки возможности решения сверхжестких систем ОДУ по аналогии с предыдущими схемами предлагается электрическая схемная модель уравнений Ван дер Поля на рис. 4 для параметра $MU > 10^7$:

$$\begin{cases} dx_1 / dt = x_2 \\ dx_2 / dt = -x_1 - MU \cdot (x_1 \cdot x_1 - 1) \cdot x_2 \\ x_1(0) = 1, x_2(0) = -1. t \in [0, 4 \cdot MU] \end{cases}$$

V. СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ В ПА10

При объектном подходе в качестве основной структурной единицы описываемой модели выступает объект с известной моделью. С точки зрения схемного моделирования такой объект является

многополюсником — элементом с двумя и более контактными выводами (полюсами). С точки зрения модели объекта каждый вывод является интерфейсом для двух базовых переменных — переменной типа «потенциал» и переменной типа «поток» [17].

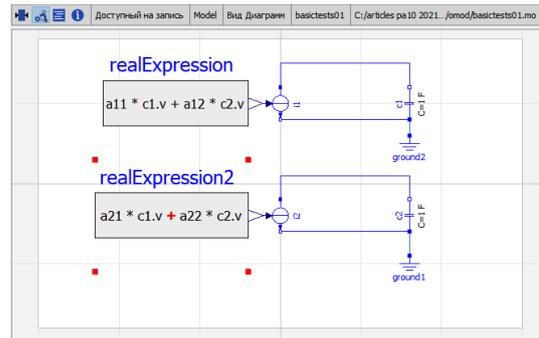


Рис. 3. Схема для разработки и тестирования решателей систем ОДУ-ДАУ

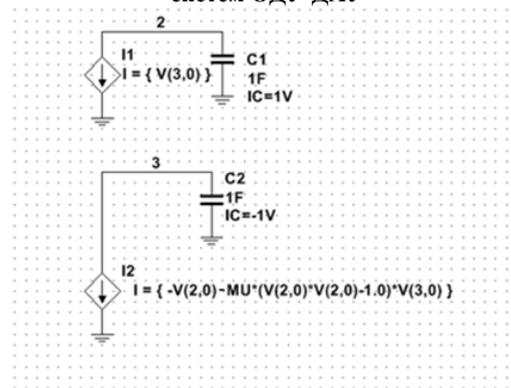


Рис. 4. Схемная модель уравнений осциллятора Ван дер Поля для сверхжестких систем ОДУ-ДАУ (параметр $MU > 10^7$), время расчета $4 \cdot MU$

Каждый многополюсник внутри, в свою очередь, может быть задан схемой соединения других многополюсников или двухполюсников, либо переменные могут быть непосредственно использованы в заданных аналитически (или алгоритмически) уравнениях. Очевидно, что при таком определении понятия многополюсника все базовые двухполюсники являются частным случаем многополюсника. В схемном моделировании следует отделять графическое и топологическое описание схемы. Графическое описание служит в большей степени для визуализации, в то время как топологическое описание напрямую служит для построения модели. К графическому описанию, в частности, относятся условное изображение элемента на схеме, координата и масштаб этого изображения, цвета и толщины линий, координаты линий связи и т.д. Топологическое описание оперирует только следующими структурами:

- Множество составляющих схему многополюсников и их контактных площадок (полюсов).
- Множество соединений контактных площадок (полюсов) многополюсников.

Многополюсники, включенные в схему, различаются по типам и по номенклатуре, поэтому каждому использованному в схеме многополюснику должен соответствовать уникальный идентификатор (пример из электрических схем — R1, R2, R3). С другой стороны, необходимо однозначно идентифицировать контактные площадки каждого многополюсника, по аналогии с электрическими схемами достаточно простой нумерации этих полюсов. Так как один и тот же объект, представленный на схеме многополюсником, при мульти доменном моделировании задан в нескольких физических системах, то и контактные площадки (с переменными типа «потенциал» и «поток») имеют различную физическую размерность, поэтому для контактных площадок требуется их жесткая типизация, и так как полюса различных типов (принадлежащие разным физическим подсистемам) не могут быть соединены напрямую, удобно использовать не сквозную нумерацию контактных площадок, а собственную нумерацию полюсов внутри каждой подсистемы. Также имеет смысл говорить, что мульти доменная схемная модель объекта расположена в различных физических «слоях», что имеет своё представление в графическом отображении (например, объекты каждого слоя имеют свой цвет и т. п.). Соединение контактная площадка (полюсов) многополюсников уравнивает значение переменных в каждый момент времени для указанных выводов и не

имеет никаких других функциональных особенностей, в случае необходимости реализации других типов связей, например, направленная связь может быть реализована специальным типом двухполюсника, типа идеального «вольтметра» и «амперметра». Так как визуализация схемы является задачей разработки графического интерфейса и, по сути, система визуализации является надстройкой над описанием топологии схемы, для создания библиотеки моделей на функциональном уровне достаточно использовать любой из объектно-ориентированных (ОО) языков программирования.

Рассмотрим принципы формирования модели на примере использования языка C++. Количество переменных модели соответствует количеству элементов в множестве соединений, для упрощения введём массив соединений, каждый элемент которого — экземпляр структуры, хранящей переменную типа «поток» и переменную типа «потенциал», а номер элемента в таком массиве — номер контактной площадки, соответствующего полюса. При создании экземпляра объекта многополюсника каждый полюс — это ссылка на структуру с переменными, поэтому для каждого полюса необходимо передать в конструктор многополюсника адреса контактных площадок, к которым он подключён. На рис. 5 в качестве примера представлено описание колебательного контура.

```
class Electric : public ContactPad { double current, potential;};

(a)

Electric p[2]; // две контактные площадки – два полюса
Capacity C1(1E-2, p[0],p[1]); // Конденсатор ёмкостью 10 мкФ включён между полюсами 0 и 1
Inductor L1(1E-2, p[0],p[1]); // Катушка индуктивности 10 мкГн включена между полюсами 0 и 1
C1.charge(1); // Устанавливаем заряд на конденсаторе

(b)
```

Рис. 5. Описание колебательного контура (а) и его схема (б)

Практически реализованы прототипы ПА10 мини на C# и C++ [24]. В ПА10 мини на C++ структура классов, относящихся к схемному режиму максимально упрощена – графическая составляющая объединена с математической. Реализованы только основные типы элементов, базовые двухполюсники: источник тока, источник напряжения, ёмкость, индуктивность, сопротивление и проводимость. Например, класс для ёмкости совмещает математическую модель соответствующего двухполюсника с его графическим представлением:

```
CItem::CItem(int id_, QPointF pos_,
QGraphicsItem *parent)
: CircuitItem(parent)
{
id = id_;
name = "C" + QString::number(id);
eq = "i=u'*f";
f = "1.0";
```

```
fDim = "F";
fName = "C";
elemType = C;
setPos(pos_); }
```

Рассмотрим многополюсник, описывающий экземпляр реального объекта. Можно выделить следующие особенности такого представления:

- Один и тот же реальный объект может быть не просто представлен различными моделями, но и быть смоделирован различными способами, а именно задан аналитически, алгоритмически, с помощью схемного задания модели и т. д.
- Размерность вектора входных параметров каждой из возможных моделей различна, поэтому далее будем говорить о множестве параметров объекта, представляющего собой объединение множеств входных параметров всех известных моделей.

- Достоверность и точность модели может меняться в процессе моделирования (например, нежесткая система становится жесткой в процессе моделирования), поэтому можно говорить об уровне адекватности модели в данный момент расчётного времени.
- Реально существующий объект, представляемый моделью, имеет свою номенклатуру и соответствующее этой номенклатуре множество параметров объекта, поэтому объектно-ориентированный подход подразумевает не только описание топологии, но и сборку модели конечного продукта из элементов с известной номенклатурой.

VI. ВЫВОДЫ

В качестве языка разработки моделей можно и нужно использовать непосредственно один из ОО языков программирования. При этом выбор следует делать как C++, так и среди наиболее современных языков, таких как Java, C#, Python, обладающих простым и понятным синтаксисом, и при этом мощными возможностями.

Ни один из рассмотренных ПМК схемотехнического моделирования и ни один из рассмотренных ПМК объектно-ориентированного моделирования много доменных технических систем не справляется со сверхжесткими системами ОДУ с числом обусловленности более 10^7 степени. Все решатели систем ОДУ из библиотеки MZK решают этот тест для MU вплоть до 10^{16} .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] URL : <https://www.mscsoftware.com/product/msc-nastran> (дата просмотра 30.07.2021)
- [2] URL : <https://www.ansys.com/> (дата просмотра 30.07.2021)
- [3] URL : <https://www.comsol.ru/> (дата просмотра 30.07.2021)
- [4] URL : <http://www.mscsoftware.ru/products/adams> (дата просмотра 30.07.2021).
- [5] URL : <https://modelica.org/modelicalanguage.html> (дата просмотра 30.07.2021)
- [6] URL : <http://plmpedia.ru/wiki/SPICE> (дата просмотра 30.07.2021)
- [7] URL : <https://eda.sw.siemens.com/en-US> (дата просмотра 30.07.2021)
- [8] URL : https://www.cadence.com/en_US/home/tools/customic-analog-rf-design/circuit-simulation.html (дата просмотра 30.07.2021)
- [9] URL : <https://www.ni.com/ru-ru/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html> (дата просмотра 30.07.2021)
- [10] URL : <https://symica.ru/> (дата просмотра 30.07.2021)
- [11] URL : <https://www.synopsys.com/implementation-and-signoff/ams-simulation/primesim-hspice.html> (дата просмотра 30.07.2021)
- [12] URL : <https://www.synopsys.com/verification/virtual-prototyping/saber.html> (дата просмотра 30.07.2021)
- [13] Колесов Ю. Б. Компонентное моделирование сложных динамических систем : учеб. пособие / Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – СПб. :ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 208 с.
- [14] URL : <https://www.uml.org/> (дата просмотра 30.07.2021)
- [15] URL : <https://www.mathworks.com/products/simscape.html> (дата просмотра 30.07.2021)
- [16] URL : <https://www.20sim.com/> (дата просмотра 30.07.2021)
- [17] 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. Сборник научных трудов / под общ. ред. А.Л.Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2005. С. 19-24.
- [18] URL : <https://www.esi-group.com/products/system-simulation> (дата просмотра 30.07.2021)
- [19] URL : <https://www.wolfram.com/system-modeler/> (дата просмотра 30.07.2021)
- [20] Митенкова Е.Ф., Соловьева Е.В., Маничев В.Б., Фельдман Э.О. Задачи изотопной кинетики на полном базисе выхода продуктов деления — Атомная Энергия, т.124, вып.1, 2018. С. 54–57.
- [21] 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 нанoeлектронных систем(МЭС). 2018. Выпуск 1. С. 97-102.
- [22] Michael Wetter, Wangda Zuo, Thierry S. Noudui & Xiufeng Pang (2014) Modelica Buildings library, Journal of Building Performance Simulation, 7:4, 253-270.
- [23] Жук Д.М., Кожевников Д.Ю., Маничев В.Б. Проблемы разработки математического ядра для программ моделирования динамики технических систем// Проблемы разработки перспективных микро-и нанoeлектронных систем (МЭС). 2020. Вып. 4.С. 31-38.
- [24] URL : <https://github.com/manichev/pa10project> (дата просмотра 30.07.2021)
- [25] МЗК Маничев В.Б., Жук Д.М., Кожевников Д.Ю., Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2017617779, 12.07.2017 г. Заявка № 2017617779 от 19.04.2017г.

Object-Oriented Approach for the Development of Modern Software Packages for Heterogeneous Technical Systems Simulation

Zhuk D.M., Kozhevnikov D.Yu., Manichev V.B., Tsvetkovskaya T.A.

Bauman Moscow State Technical University, manichev@bmstu.ru

Abstract — Demands from end-product organizations are continually increasing for quick and accurate assessment of

the adopted design decisions. In this case, it is the required accuracy of the assessment that is extremely important, since

the cost of errors in making design decisions at the early stages of design is extremely high. Simulation with Software Packages (SPs), associated with the solution of ODE-DAE systems, allows you to get accurate results in an acceptable time without using large computing resources. Therefore, such modeling is increasingly used in the design of industrial products in the early design stages. These SPs includes SPs for circuitry modeling of electronic circuits based on the SPICE solver, SPs for modeling mechanical systems MSC.ADAMS, SPs for modeling multi domain technical systems Wolfram System Modeler, Maplesim, SimulationX, Open Modelica and SPs of the PAX series, etc. The existing SPs for electronic circuit simulation, with rare exceptions, do not provide the ability to simulate systems consisting of physically different subsystems. Meanwhile, the relevance of the modeling of micro-mechatronic products is increasing, for example, the design of MicroElectroMechanical Systems or for short MEMS - MicroElectroMechanical Systems. For example, the time constants in microelectronics are already estimated at 10^{-12} - 10^{-15} seconds, and the time constants in mechanics are usually measured in seconds, so the super stiffness of ODE systems in mechatronics will be of the order of 10^{12} . In this regard, the requirements can be formulated that must be satisfied by the currently developed SPs for modeling such multi domain systems:

- complex modeling of technical objects consisting of various physical subsystems - electrical, mechanical, hydraulic, thermal, etc.
- reliability and high accuracy of mathematical kernels of such SPs, the possibility of easy replacement and expansion of the mathematical kernel;
- availability of interactive tools for creating models by users, while the user should not be required to have special knowledge in the field of programming and / or numerical methods;
- availability of tools for parallel work of model developers, the ability to perform calculations on a specially dedicated server or cluster;

To solve these problems, it is necessary to create a new generation of SP for modeling dynamic processes in technical systems. Taking into account the above requirements, as well as the experience gained in the development of the PA4, PA6, PA7, PA9 programs, it is planned to develop SP PA10.

As a model development language, you can use one of the OO programming languages directly. At the same time, the choice should be made both in C++ and among the most modern languages such as Java, C#, Python, which have a simple and clear syntax at a glance, and at the same time powerful capabilities.

None of the considered SPs of circuit modeling and none of the considered SPs of object-oriented modeling for multi domain technical systems cannot solve super stiff ODE-DAE systems – Vander Pol equations (oscillator) with a condition number $MU > 10^7$. All PA10 ODE-DAE system solvers solve this test for MU up to 10^{16} .

Keywords — computer-aided design of electronic circuits, mathematical modeling, engineering analysis systems, dynamic systems, ordinary differential equations (ODE), differential algebraic equation (DAE).

REFERENCES

- [1] URL: <https://www.mscsoftware.com/product/msc-nastran> (access date 30.07.2021)
- [2] URL: <https://www.ansys.com/> (access date 30.07.2021)
- [3] URL: <https://www.comsol.ru/> (access date 30.07.2021)
- [4] URL: <http://www.mscsoftware.ru/products/adams> (access date 30.07.2021)
- [5] URL: <https://modelica.org/modelicalanguage.html> (access date 30.07.2021)
- [6] URL: <http://plmpedia.ru/wiki/SPICE> (access date 30.07.2021)
- [7] URL: <https://eda.sw.siemens.com/en-US> (access date 30.07.2021)
- [8] URL: https://www.cadence.com/en_US/home/tools/customic-analog-rf-design/circuit-simulation.html (access date 30.07.2021)
- [9] URL: <https://www.ni.com/en-us/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html> (access date 30.07.2021)
- [10] URL: <https://symica.ru/> (access date 30.07.2021)
- [11] URL: <https://www.synopsys.com/implementation-and-signoff/ams-simulation/primesim-hspice.html> (access date 07/30/2021)
- [12] URL: <https://www.synopsys.com/verification/virtual-prototyping/saber.html> (access date 30.07.2021)
- [13] Kolesov Yu. B. Component modeling of complex dynamical systems: textbook. allowance / Yu. B. Kolesov, Yu. B. Senichenkov. - SPb. : POLYTECH-PRESS, 2020. -- 208 p.
- [14] URL: <https://www.uml.org/> (access date 30072021)
- [15] URL: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html> (access date 30.07.2021)
- [16] URL: <https://www.20sim.com/> (access date 30.07.2021)
- [17] Akinshin A.A., Zhuk D.M., Ilnitskiy A.O., Kozhevnikov D.Yu., Manichev V.B. Method of modeling the dynamics of technical systems on the basis of formal schemes // Problems of the development of advanced micro- and nanoelectronic systems (MES), IPPM RAN, 2005. pages 19-24.
- [18] URL: <https://www.esi-group.com/products/system-simulation> (access date 30.07.2021)
- [19] URL: <https://www.wolfram.com/system-modeler/> (access date 30.07.2021)
- [20] Mitenkova EF, Solovieva EV, Manichev VB, Feldman EO Problems of isotope kinetics on a complete basis of the yield of fission products - Atomic Energy, vol. 124, issue 1, 2018. pp. 54–57.
- [21] Zhuk D.M., Kozhevnikov D.Yu., Manichev V.B. Reliability and Accuracy of ODE Systems Solution for Modeling Environment of Heterogeneous Dynamic Systems PA10 // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018. Issue 1. P. 97-102. doi:10.31114/2078-7707-2018-1-97-10
- [22] Michael Wetter, Wangda Zuo, Thierry S. Noudui & Xiufeng Pang (2014) Modelica Buildings library, Journal of Building Performance Simulation, 7: 4, pp. 253-270.
- [23] Zhuk D.M., Kozhevnikov D.Yu., Manichev V.B. Problems of developing a mathematical core for modeling the dynamics of technical systems // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2020. Issue 4. P. 31-38. doi:10.31114/2078-7707-2020-4-31-38
- [24] URL : <https://github.com/manichev/pa10project> (access date 30.07.2021).
- [25] MZK Manichev V.B., Zhuk D.M., Kozhevnikov D.Yu., Certificate of registration of a computer program 2017617779, 12.07.2017.