

На правах рукописи



Бутусов Денис Николаевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВСТРАИВАЕМЫХ
СИСТЕМ**

Специальность: 05.13.12 Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена на кафедре систем автоматизированного проектирования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В. И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель:

д.т.н, профессор кафедры САПР
СПбГЭТУ

Герасимов Игорь Владимирович

Официальные оппоненты:

д.т.н, профессор кафедры
информационно-измерительной
техники Санкт-Петербургского
Государственного Политехнического
Университета

Малыхина Галина Федоровна

к.т.н., доцент кафедры

вычислительной техники СПбГЭТУ

Курдинов Борис Александрович

Ведущая организация:

Институт проблем транспорта
Российской Академии Наук им.
Соломенко (ИПТ РАН)

Защита состоится «19» апреля 2012 г. в 16³⁰ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.02 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ.

Автореферат разослан 16 марта 2012 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

Д 212.238.02



Сафьянников Н.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность исследования:

Широкое распространение методологии модельного проектирования в качестве эффективного инструмента при автоматизированной разработке технических систем различной физической природы приводит к необходимости модернизации способов математического моделирования, лежащих в основе построения компьютерных моделей.

Современная элементная база для реализации средств вычислительной техники сделала возможным использование подходов, применявшихся ранее для моделирования на аналоговых вычислительных машинах (АВМ). Эффективность таких подходов заключается в том, что они обеспечивают более высокую степень адекватности между моделируемой непрерывной системой и моделирующей цифровой системой.

Одной из разновидностей динамических систем являются моделирующие и управляющие встраиваемые системы. Одним из способов математического описания таких систем являются дифференциальные уравнения. При построении компьютерных моделей таких систем необходимо применять численные методы интегрирования. Большинство существующих численных методов интегрирования разрабатывалось без учета возможности их реализации быстродействующими средствами вычислительной техники. Все они имеют ряд недостатков при реализации на ЭВМ с фон-неймановской структурой: методы высокого порядка требуют существенных вычислительных/временных затрат, что делает их практически неприменимыми для задач моделирования и управления в реальном времени. Методы низких порядков не обеспечивают требуемую точность вычислений. Использование методов, имеющих порядок точности выше второго, сопряжено также со значительными трудностями распараллеливания вычислительного процесса.

Областью исследования настоящей работы является методика автоматизированного проектирования в технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР а также разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений.

Основной задачей настоящей работы является разработка научных основ построения подсистем САПР, предназначенных для проектирования встраиваемых моделирующих и управляющих систем. Для таких подсистем необходимо создать новое методическое, математическое и программное обеспечение. Для решения

поставленной задачи используются методы теории подобия и моделирования, численные методы интегрирования и методы теории управления, методологии модельного проектирования. Задача разработки методического, математического и программного обеспечения подсистем САПР встраиваемых моделирующих и управляющих систем с использованием аппаратно-детерминированных численных методов и подходов модельного проектирования является актуальной с позиций современной науки.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы - исследование и разработка научных основ построения подсистем САПР встраиваемых моделирующих и управляющих систем с применением аппаратно-детерминированных методов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений.

Объектом исследования являются встраиваемые моделирующие и управляющие системы.

Предмет исследования – методическое, математическое и программное обеспечение подсистем САПР встраиваемых моделирующих и управляющих систем.

Задачи диссертационной работы

Исходя из поставленной цели в процессе выполнения работы необходимо решить следующие **научно-технические задачи**:

1. Обоснование архитектуры подсистем САПР встраиваемых моделирующих и управляющих систем. Выбор аппаратно-детерминированного численного метода интегрирования.
2. Разработка и апробация методики автоматизации проектирования встраиваемых моделирующих и управляющих систем управления.
3. Разработка вычислительных моделей универсального цифрового интегратора с возможностью коррекции методической погрешности интегрирования квантованных во времени сигналов на основе аналитических выражений погрешности.
4. Разработка алгоритмов и программного обеспечения подсистемы автоматической генерации кода для целевого процессора.

Основные методы исследования

Для решения поставленных задач в диссертационной работе используются методы теории подобия и моделирования, теории численных методов, теории автоматического управления, положения теории построения САПР, методика модельного проектирования и технология виртуальных инструментов.

Новые научные результаты

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Обоснована новая архитектура подсистем САПР встраиваемых моделирующих и управляющих систем на базе подходов аналоговой техники, обеспечивающих более высокую степень адекватности моделирующей системы моделируемой.
2. Разработана и внедрена новая методика автоматизации проектирования встраиваемых систем с применением аппаратно-детерминированного численного метода интегрирования, позволяющего распараллелить вычислительный процесс.
3. Впервые получены аналитические выражения погрешности интегрирования квантованных во времени сигналов цифровым интегратором. Разработан новый универсальный цифровой интегратор, реализующий, в отличие от известных аналогов, методы средней и двойной средней точки с возможностью коррекции его погрешности для заданных входных сигналов.
4. Разработано новое программное обеспечение подсистем САПР для генерации компьютерных моделей по математическому описанию динамической системы. В отличие от имеющихся аналогичных программных средств оно позволяет полностью автоматизировать генерацию кода для целевого процессора.

Достоверность научных результатов

Подтверждается результатами математического и компьютерного моделирования в инструментальных средах и инженерной практикой решения задач проектирования встраиваемых моделирующих и управляющих систем.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Методика автоматизированного проектирования встраиваемых систем, созданная на основе принципов модельного проектирования с применением технологии виртуальных инструментов.
2. Подсистема автоматической генерации кода исполняемых моделей.
3. Универсальный цифровой интегратор. Аналитические выражения погрешности интегрирования известных входных сигналов разомкнутым цифровым интегратором и способы ее коррекции.

Практическая ценность

Значение результатов диссертационной работы для практического применения заключается в следующем:

1. Разработанная методика автоматизированного проектирования встраиваемых систем может применяться при создании «аппаратных ускорителей» персональных компьютеров для моделирования в реальном масштабе времени.
2. Разработанная подсистема автоматической генерации кода САПР встраиваемых моделирующих и управляющих систем может быть использована при создании САПР изделий электронной

промышленности, авиационно-космической отрасли, автомобильной промышленности и др.

3. Универсальный цифровой интегратор обеспечивает возможность разработки автономных систем управления на основе динамически реконфигурируемых интегрирующих структур с коррекцией погрешности.

Практическая реализация и внедрение результатов работы

Разработанная методика автоматизации проектирования внедрена в учебно-научном центре «Компьютерные технологии инжиниринга», авторизованном компанией National Instruments. Разработанная подсистема автоматической генерации кода исполняемых моделей внедрена в структуру лабораторных работ кафедры ТОЭ СПбГЭТУ. Внедрение подтверждено двумя актами, приложенными к диссертационной работе.

Результаты диссертационной работы использовались:

В госбюджетной НИР на тему «Исследование и разработка методов моделирования динамических систем», проводившейся в 2009-2011 гг. в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (шифр ФИЕТ/САПР-46 тем. плана СПбГЭТУ 2009 г.).

Применение разработанной методики и программно-аппаратных средств в учебном процессе обеспечивает поддержку дисциплины «Компьютерные технологии виртуализации».

Результаты диссертационной работы используются в учебной практике Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) на кафедре «Системы автоматизированного проектирования» для подготовки магистров по направлениям «Информационное и программное обеспечение САПР» и «Компьютерные технологии инжиниринга».

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на 8й, 9й и 10й международных конференциях "Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments", (Москва, РУДН, 2009-2011).

Результаты работы также докладывались на конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2009-2011 гг.

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 20 научных трудах, из них по теме диссертации 20, среди которых 6 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 10 публикаций в сборниках трудов международных и прочих конференций и 4 программы, зарегистрированные в федеральном Реестре программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами и заключения. Она изложена на 186 страницах машинописного текста, включает 105 рисунков, 9 таблиц, 3 приложения общим объемом 23 страницы и содержит список литературы из 77 наименований, среди которых 71 отечественный и 6 иностранных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются цели и задачи исследования, а также объект и предмет исследования. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Дается краткая характеристика новизны полученных результатов, подтверждение их обоснованности, научной достоверности и практической ценности.

Первая глава диссертационной работы посвящена описанию методологии модельного проектирования встраиваемых систем. Проводится аналитический обзор современных сред модельного проектирования National Instruments LabVIEW, MATLAB/Simulink, Mentor Graphics IDE. Рассматривается зарубежный опыт использования методик Model-Based Design и Model-Driven Development в различных САПР.

В главе дается оценка состояния и перспектив развития модель-ориентированного проектирования встраиваемых систем. Ежегодные аналитические отчеты фирмы EMF, посвященные проектированию встраиваемых систем свидетельствуют, что невысокая скорость разработки программного обеспечения приводит к задержкам более чем в 80% случаев при реализации сложных проектов. Причиной этого является то, что целый ряд объективных обстоятельств (неопределенность спецификаций и ошибки начального этапа проектирования) возникают в процессе проектирования и выявляются только на конечной стадии. Традиционные методы разработки программно-аппаратного обеспечения для встраиваемых систем уступают подходу, известному как Model-Based Design (Модельное проектирование). В традиционных процессах проектирования, проектная информация представлена в виде текстовых описаний и руководств. Код программы создается вручную на основе документов спецификации и требований, которые являются трудоёмкими для изучения и способствуют появлению ошибок.

Модель-ориентированное проектирование (далее модельное проектирование, Model-Based Design, MBD) - методология разработки разнородных технических систем, использующая математические модели системных компонентов и их взаимодействий с окружающей средой. Это высокоуровневый подход, при котором на каждом этапе проектирования имеется модель в виде исполняемой спецификации. Модели многократно используются в процессе проектирования,

включая системное моделирование, анализ стабильности, создание алгоритма управления, а также являются спецификацией для автоматической генерации кода целевого процессора.

Модельное проектирование выполняется следующим образом:

- полная модель системы представляется в виде блок-схемы, а диаграмма состояния описывает ее функциональные связи;
- оцениваются варианты реализации проекта и прогнозируется работа системы при помощи компьютерного моделирования;
- алгоритм и поведенческая модель системы оптимизируются и тестируются, представляя в конечном итоге полностью проверенную спецификацию;
- Автоматическая генерация кода используется для создания программного обеспечения, подлежащего испытаниям в реальном масштабе времени на целевой аппаратной платформе. Развертывание системы происходит на основе проверенной спецификации;

Это гарантирует проектировщикам:

- Быстрые проектные итерации, обеспечивающие выполнение необходимого объема работ без ущерба для их качества;
- большую предсказуемость циклов проектирования;
- уменьшение сроков проектирования и стоимости изделия.

Важной особенностью модельного проектирования является возможность повторного использования предварительно проверенного и созданного кода всей модели или ее частей. Существующие проекты, могут быть модифицированы или расширены, без повторения компьютерного моделирования. Другими словами, разработчику предоставляется возможность выбора способа внесения изменений в проект на основе модели. На рисунке 1 приведена схема процесса проектирования, выполняемого в форме MBD.



Рисунок 1 - Схема процесса проектирования в рамках Model-Based Design

Наиболее полная форма модельного проектирования реализуется при наличии единой среды разработки, которая дает возможность разработчикам использовать единственную общую модель системы для анализа данных, визуализации состояний модели, тестирования и проверки правильности принятых решений и создания конечного изделия с применением автоматической генерации кода для выбранной целевой платформы.

На практике, особенно при проектировании разнородных технических систем и устройств, охватывающих различные области техники, как правило, используются несколько сред одновременно. Существует целый класс систем проектирования, обеспечивающих связь между различными пакетами. К таким системам можно отнести среду SystemVision фирмы Mentor Graphics.

Как только модель построена и полностью проверена, происходит автоматическое создание программного кода (исполняемого в реальном масштабе времени), таким образом производится экономия времени и уменьшаются затраты по сравнению с традиционным ручным кодированием. Модельное проектирование с автоматическим созданием кода может также использоваться в «быстром прототипировании», предоставляя различные варианты системы, которые будут быстро проверены и оптимизированы.

Программные инструментальные средства фирмы National Instruments практически не уступают по функциональной полноте средствам MathWorks. Значительные преимущества им дают высокотехнологичные аппаратные средства собственного производства и тесное сотрудничество с ведущими фирмами (Freescale, Electronics Workbench, Texas Instruments, Xilinx). Особого внимания в качестве аппаратной платформы при реализации встраиваемых моделирующих и управляющих систем заслуживают реконфигурируемые модули ввода-вывода CompactRIO с процессорной частью, реализуемой на базе ПЛИС (FPGA).

Среда разработки виртуальных приборов NI LabVIEW ускоряет процесс разработки систем управления на базе промышленных компьютеров, ПЛИС и промышленных контроллеров благодаря графическому способу программирования. Инженер может сфокусировать свое внимание на разработке алгоритма управляющей системы, а не на сложном низкоуровневом программировании. Код для ПЛИС непосредственно генерируется из блок-диаграммы LabVIEW FPGA, и в дальнейшем может быть загружен на целевую платформу для осуществления быстрого прототипирования устройств управления, или внедрен на платформы PXI и CompactRIO для создания надёжных промышленных систем. Кроме того, с помощью модуля Labview Embedded Development Module возможно переносить алгоритмы управления, разработанные в LabVIEW, на 32-разрядные микропроцессорные платформы. Анализ и синтез линейных стационарных систем выполняется модулем NI Control Design на основе

классических методов теории автоматического управления. Анализ систем возможен во временной и частотной области.

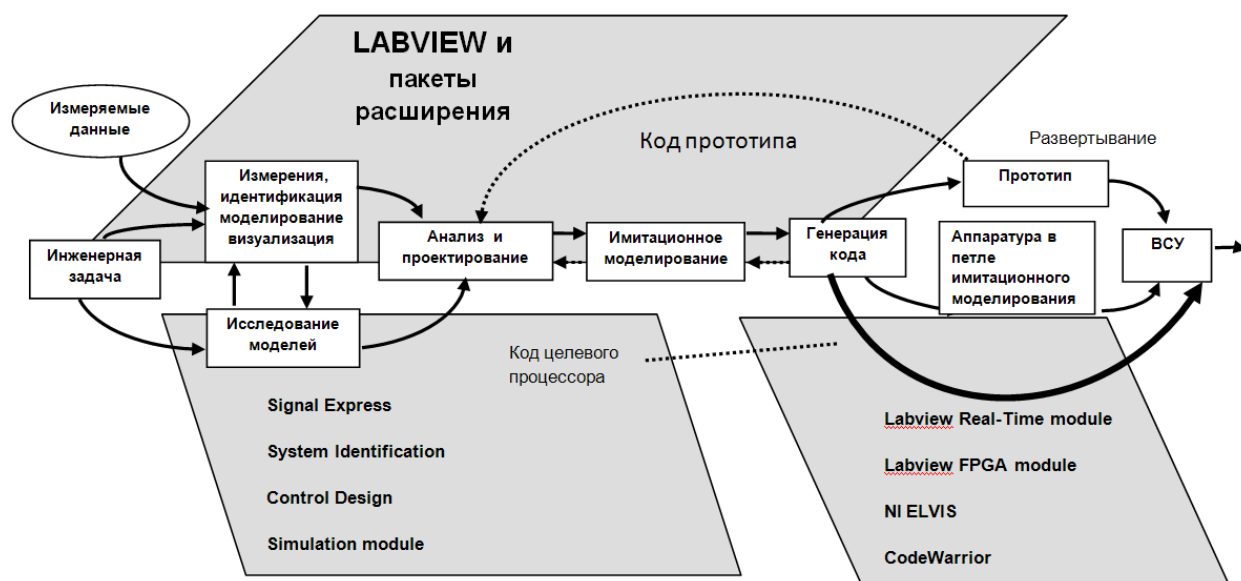


Рисунок 2 - Средства National Instruments в жизненном цикле продукта

Компьютерное моделирование выполняется операционными блоками NI Simulation module, объединенными в блок-диаграмму, являющейся графическим описанием и исполняемой спецификацией системы. Модуль также позволяет импортировать Simulink модели в Labview путем их трансляции. В блок-диаграмме модели допускается применять блоки Control Design. Имитационная модель, построенная с помощью блоков FPGA Module, может быть исследована в среде Labview, а в результате трансляции преобразована в исполняемый код прототипа (целевого процессора), выполненного на кристалле ПЛИС. Таким образом, осуществляется возможность выполнения быстрого прототипирования. С помощью рассмотренных выше инструментальных средств в LabVIEW возможно эффективное выполнение модельного проектирования систем управления.

Глава завершается постановкой задач исследования и их обоснованием.

Во второй главе диссертационной работы рассматриваются существующие численные методы интегрирования с точки зрения их эффективности при аппаратной реализации.

Одним из показателей эффективности метода принято считать количество вычислений правой части дифференциальных уравнений. По этому показателю метод Рунге-Кутты 4 уступает методам Адамса-Башфорта и Милна. Существенным недостатком последних является необходимость выполнения так называемого «участка разгона» с применением другого численного метода.

Использование прототипа объекта управления или контроллера в петле с реальной аппаратурой (НП) предъявляют к численному методу интегрирования, реализуемому на целевом процессоре ряд дополнительных требований:

- возможность распараллеливания процесса вычислений;

- обеспечение необходимой точности получения решений в заданном частотном диапазоне при известной длине машинного слова целевого процессора;
- минимальные аппаратные затраты для выполнения арифметических операций;
- минимальный объем регистрового запоминающего устройства;
- автоматическая настройка структуры прототипа;
- алгоритм управления прототипом не должен приводить к усложнению процесса моделирования в целом;
- автоматическая генерация исполняемого кода.

Перечисленные выше требования имеют противоречивый характер в силу специфических свойств методов численного интегрирования. Более высокий порядок точности метода обеспечивает заданную погрешность при большем шаге интегрирования. Это приводит к тому, что на одинаковом промежутке интегрирования точные методы обеспечивают меньшее число шагов интегрирования, но при этом необходимо выполнять больший объем вычислений. На современной микропроцессорной базе (DSP, FPGA и FPOA) достижимо малое значение шага интегрирования. Одновременное выполнение базовой операции вычисления суммы произведений (MAC) выполняется за один машинный такт равный 10^{-8} сек.

Инструментальные пакеты моделирования используются на персональных, реже промышленных, компьютерах. Создание прототипа динамической системы, работающего в натуральном масштабе времени возможно только на высокоскоростных вычислительных системах. Стоимость таких систем будет определять и стоимость выполнения полного цикла модельного проектирования встраиваемых систем управления. Более эффективным является вариант построения прототипа с помощью многопроцессорной системы, выполняющей параллельную реализацию численного интегрирования. Задачи численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений не относятся к классу задач с естественным параллелизмом. Варианты распараллеливания вычислений правых частей уравнений сильно зависят от вида уравнений.

Обычно процесс распараллеливания базируется на нахождении оптимального расписания. Составление оптимального расписания работы процессоров является достаточно сложной задачей, требующей выполнения целого ряда жестких требований.

В главе исследованы численные методы интегрирования и варианты разработанных на их основе последовательно-параллельных интегрирующих структур, предназначенных для моделирования динамических систем в реальном масштабе времени. В главе рассмотрен новый метод численного интегрирования, пригодный для использования в качестве основы при разработке встраиваемых

моделирующих и управляющих систем, является новой модификацией метода Эйлера. При выполнении определенной коррекции метод становится практически тождественным по точности методам второго порядка.

Глава содержит описание дискретизации по методу замены непрерывных систем эквивалентными импульсными системами. В конце главы проводится обоснование выбора метода, пригодного для аппаратной реализации при проектировании встраиваемых систем управления и делаются выводы.

Третья глава описывает предлагаемую методику автоматизации проектирования встраиваемых моделирующих и управляющих систем.

В основе разрабатываемого методического обеспечения лежит методика перехода от непрерывной модели системы к эквивалентной дискретной модели.

Методика модельного проектирования предполагает следующую последовательность этапов, на каждом из которых проводится верификация полученной модели, оцениваются относительная погрешность и время моделирования:

1. Приведение математического описания исходной системы к нормальной форме Коши.
2. Получение исполняемой спецификации при помощи САП и получение решения в системе Matlab/Simulink.
3. Выполнение моделирования и сравнение полученного решения с аналитическим, или с решением методом высокого порядка точности.
4. Трансляция Simulink - модели в модуль NI LabVIEW Simulation Module.
5. Выполнение моделирования и оценка точностных и временных характеристик полученного решения.
6. По значению погрешности, полученному в п. 5, выбирается соответствующий шаг интегрирования.
7. Создание функциями ядра LabVIEW дифференциального анализатора.
8. Выполнение масштабирования и переход к реализации с «фиксированной точкой» при сохранении типа данных Double.
9. Выполнение моделирования. Фиксация факта «переполнения» назначенной разрядной сетки. При наличии переполнения изменение масштабов. Сравнение полученных данных с п. 8 и 5.
10. Переход к аппаратной реализации интегрирования методом ПИ.

Исходные уравнения системы могут быть представлены в виде передаточной функции, одного уравнения высокого порядка или системы уравнений в нормальной форме Коши. Переход от нормальной формы Коши к блок-диаграмме выполняется с помощью разработанной в диссертационной работе САП.

В главе описывается синтез интегратора, реализующего метод последовательного интегрирования (ПИ-интегратора) и построение универсального интегратора на его основе. Универсальный интегратор реализует

интегрирование по методу прямоугольников, трапеций, средней точки, двойной средней точки и правилу Симпсона. Универсальный интегратор выполнен в виде виртуального прибора инструментального пакета LabVIEW.

В главе содержится описание способов декомпозиции при переходе от математического описания в виде передаточных функций к блок-диаграмме компьютерной модели. Помимо известных схем прямого, параллельного и последовательного программирования, в работе предлагается также схема совместного интегрирования, при которой не требуется вычисление производных. Для повышения точности моделирования предлагается методика коррекции разомкнутого дискретного интегратора на основе полученных аналитических выражений погрешности. На основе вывода аналитических выражений погрешности производится расчет корректирующих коэффициентов ЦИП для заданных входных сигналов. Методика коррекции разомкнутого цифрового интегратора применяется для коррекции элементарных звеньев первого и второго порядка.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена разработке подсистемы автоматизированного программирования (САП) исполняемых компьютерных моделей (блок-диаграмм) на основе математического описания динамической системы.

Обычно исследуемая математическая модель представлена или в виде уравнений в переменных состояния, или в виде передаточной функции. Переход от исходной математической модели к блок-диаграмме требует определенных навыков и трудоемок, к тому же, является неоднозначным – одному и тому же математическому описанию системы может соответствовать несколько вариантов структурных схем. В связи с этим желательно исключить неоднозначность перехода от математического описания к исполняемой компьютерной модели и выполнять данный переход автоматически.

Комплекс программ САП предназначен для приведения исходной системы к виду исполняемой спецификации для дальнейшего моделирования в инструментальных пакетах. В САП можно выделить следующие составные части: лексический анализатор, блок синтаксического анализа, генератор структурных схем, расчетные программы, программы представления выходной информации, управляющую программу. Работа САП заключается в составлении блок-диаграммы на основе библиотеки решающих блоков, расчете масштабов и коэффициентов передачи операционных блоков, и моделировании в инструментальной системе.

Разработанная САП эффективно производит расчет масштабов всех переменных по максимальным значениям основных переменных, рассчитывает коэффициенты операционных блоков, определяет начальные значения переменных состояния, составляет блок-диаграмму моделируемой системы и формирует

данные для предварительного контроля цифрового интегрирующего процессора и управления САП.

В главе делаются выводы о перспективах внедрения и применения разработанной САП в составе сред модельного проектирования. Предлагаемый подход к организации САП позволит создавать генераторы кода для ПЛИС и других целевых процессоров (MCU, DSP, FPAА и т.д.) встраиваемых систем различных производителей без выполнения промежуточного описания на языке С или VHDL. Ряд моделей динамических систем, с помощью которых проводится проверки теоретических результатов работы, созданы с применением САП.

Пятая глава диссертационной работы посвящена верификации полученных результатов при помощи моделирования в инструментальных средах. Проводится верификация полученных аналитических выражений погрешности путем их компьютерного моделирования в инструментальных средах MATLAB/Simulink и National Instruments LabVIEW. Проводится сравнение реализации моделей разомкнутого интегратора в различных пакета, подтверждение научной достоверности разработанного способа коррекции интегрирования заданных входных сигналов разомкнутым интегратором (рисунки 3 и 4).

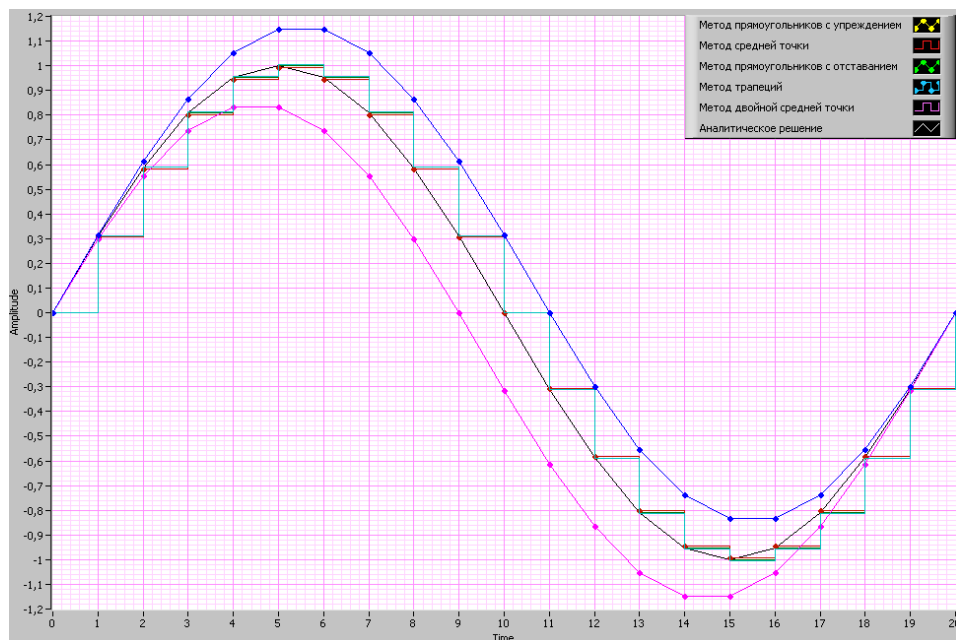


Рисунок 3 - Лицевая панель универсального интегратора и графики значений выходного сигнала до введения коррекции

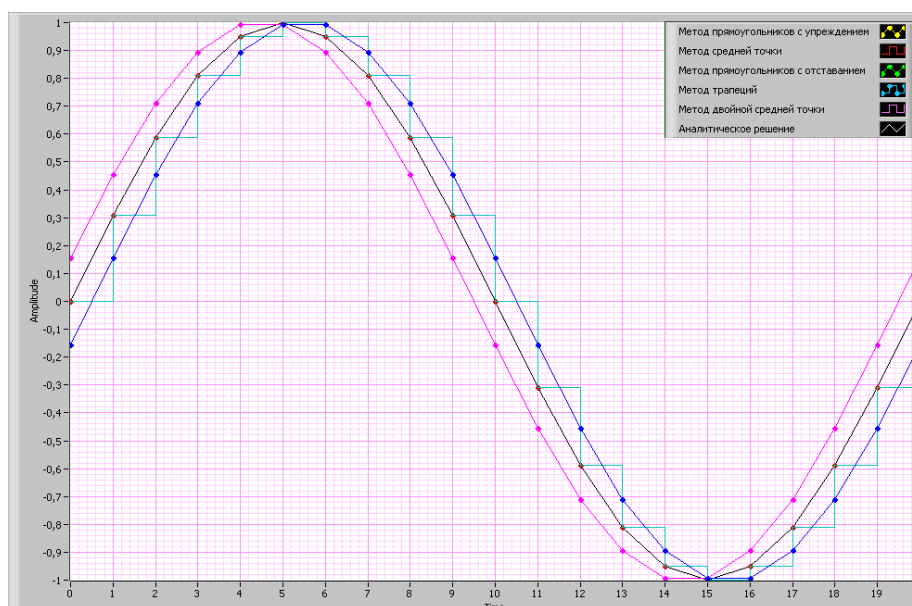


Рисунок 4 - Лицевая панель универсального интегратора и графики выходного сигнала после введения коррекции

Проверяется применимость методики коррекции разомкнутого интегратора для замкнутых схем, проводится испытание методики на тестовых задачах. В главе приводятся примеры поэтапной реализации цифрового дифференциального анализатора и фильтра на основе предложенной методики модельного проектирования встраиваемых систем на ПЛИС. Подтверждается эффективность разработанной методики и научная достоверность полученных в ходе исследования теоретических и практических результатов.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы. Делаются выводы о перспективах развития предметной области и предложения по дальнейшему внедрению результатов работы.

В приложении 1 приводятся схемы алгоритмов САП.

В приложении 2 приводятся акты о внедрении результатов работы.

В приложении 3 приведены копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты работы

1. Сформулированы основные требования к архитектуре подсистем САПР, ориентированным на проектирование встраиваемых моделирующих и управляющих систем и применяемым в таких подсистемах численным методам. Произведен выбор аппаратно-детерминированного численного метода интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений.

2. Разработана и внедрена методика автоматизации проектирования встраиваемых систем на основе перехода от модели непрерывной системы к эквивалентной дискретной модели.
3. Синтезирован универсальный цифровой интегратор. Доказана возможность реализации на основе цифрового ПИ-интегратора классических интеграторов: прямоугольников с упреждением (forward rectangular), прямоугольников с отставанием (backward rectangular), формулы трапеций (trapezoidal) и формулы Симпсона. Получены аналитические выражения погрешности цифровых интеграторов и выражения для коррекции погрешности при интегрировании заданных входных сигналов.
4. Доказана возможность коррекции элементарных звеньев 1 и 2 порядка на основе методики коррекции цифрового интегратора
5. На основе выбранной структуры системы автоматизированного программирования блок-диаграмм виртуальных приборов по заданному математическому описанию разработано программное обеспечение САПР – подсистема автоматизации программирования перехода от математического описания исследуемой системы к Simulink-модели.
6. Создан набор тестовых моделей динамических систем для подтверждения достоверности полученных результатов. Результаты экспериментов с компьютерными моделями подтверждают теоретические положения работы.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Бутусов Д.Н., Жуков К.Г. Реализация цифровых фильтров методом совместного интегрирования / «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета» - 2009 - №6, - С.: СПбГПУ. с 26-34.
2. Бутусов Д.Н., Жуков К.Г., Анализ и коррекция погрешности цифровых интеграторов встраиваемых систем управления / «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета» №6, - С.: СПбГПУ, 2009, с. 17-25.
3. Бутусов Д. Н., Жуков К. Г., Коррекция погрешности решения дифференциальных уравнений второго порядка // «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета» № 6(113), 2010. - С. 121-126.
4. Жуков К. Г., Бутусов Д. Н. Коррекция погрешности решения уравнения гармонического осциллятора методом последовательного интегрирования //

«Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета» - № 6(113), 2010. - С. 135-144.

5. Бутусов Д. Н., Андреев В.С. Модельное проектирование генератора гармонических сигналов на базе ПЛИС // «Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - 2011. - № 10. - С. 55-60.
6. Бутусов Д. Н., Прушенова Л.В., Решетов И.Н. Коррекция погрешности моделирования динамических систем, описываемых дифференциальными уравнениями первого и второго порядка // «Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - 2011. - № 9. - С. 109-111.

Другие статьи и материалы конференций:

7. Д.Н. Бутусов, К.Г. Жуков. Программно-аппаратное тестирование дифференциальных анализаторов в среде LabVIEW // Материалы международной конференции. «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments», М., РУДН, 2008, с. 31 -38.
8. Д.Н. Бутусов, К.Г. Жуков. Модельное проектирование дифференциальных анализаторов на базе сRIO FPGA NI // Материалы международной конференции "Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments", М., РУДН, 2008. с. 22.
9. Бутусов Д.Н., Узунян А.В., Константинов К.С. Разработка модуля автоматизированного расчета масштабов дифференциального анализатора // Материалы международной конференции. «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments», М., РУДН, 2009, с. 214-217.
10. Бутусов Д.Н., Ндома М. Автоматизация перехода от математического описания управляемых систем к блок-диаграмме // Материалы международной конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments», М., РУДН, 2009, с. 189-191.
11. Бутусов Д.Н., Жуков К.Г. Системный подход к проектированию фильтров // Материалы международной конференции. «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments», М., РУДН, 2009, с. 151-155.
12. Бутусов Д.Н., Константинов К.С. Комплекс лабораторных работ по курсу схемотехники и микроконтроллерам с удаленным доступом // Сборник материалов 62й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ., с. 152.
13. Бутусов Д.Н., Жуков К.Г.. Лабораторный практикум по дисциплине «Компьютерные технологии виртуализации» // Сборник материалов XV Международной Конференции «Современное образование: содержание,

технологии, качество», секция Инновационные процессы в Российской образовательной системе, с. 87.

14. Бутусов Д.Н., Романов А.Е., Андреев В.С. Проектирование цифровых фильтров средствами модуля NI Digital Filter Design // Сборник материалов 63й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ.
15. К.Г. Жуков, Д.Н. Бутусов. Реализация итеративных дифференциальных анализаторов средствами NI // Материалы международной конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments», М.:, РУДН, 2010, с. 356.
16. Д.Н. Бутусов, К.Г. Жуков, М. Ндома. Модуль программирования итеративного многопроцессорного дифференциального анализатора // Материалы международной конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments», М.:, РУДН, 2010, с. 362.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011611892. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и знакам / Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. Программа автоматизации перехода к блок-диаграмме. Заявка №2011610240, дата поступления: 12.01.2011, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 28.02.2011
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011611893. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и знакам / Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. Программа формирования m-файла автоматической генерации Simulink-модели. Заявка №2011610241, дата поступления: 12.01.2011, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 28.02.2011
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610122. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и знакам / Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. Программа расчета корректирующих коэффициентов для интегрирования экспоненциального входного сигнала. Заявка №2011617854, дата поступления: 24.10.2011, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 10.01.2012
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610123. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и знакам / Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. Программа расчета корректирующих коэффициентов для интегрирования экспоненциального входного сигнала. Заявка №2011617875, дата поступления: 24.10.2011, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 10.01.2012