

На правах рукописи

Андреев Валерий Сергеевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

Специальность: 05.13.12 Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2013

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-измерительных
систем и технологий СПбГЭТУ

Авдеев Борис Яковлевич

к. т. н., доцент кафедры «Подъемно-
транспортные, путевые и
строительные машины»

Петербургского государственного
университета путей сообщения

Быков Владислав Павлович

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество
«Концерн «Океанприбор»

Защита состоится «24» декабря 2013 г. в _____ на заседании диссертационного совета 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 22 ноября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.02

к.т.н., доцент

Сафьянников Н.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность исследования:

Неотъемлемым этапом проектирования современных электронных устройств является компьютерное моделирование в инструментальных пакетах, таких как MATLAB/Simulink, National Instruments LabVIEW, Mentor Graphics DxDesigner / SystemBuild, Cadence и т.д. Как правило, в качестве математического аппарата, лежащего в основе дискретных моделей данных пакетов, применяются линейные многошаговые методы численного интегрирования, дискретное преобразование Лапласа, аппарат разностных уравнений. При этом исходная непрерывная модель проектируемой системы сводится к модели в виде системы алгебраических уравнений, которая и решается средствами вычислительной техники. Повышение степени адекватности данной компьютерной модели является важной научно-технической задачей.

За последние десятилетия достигнут существенный прогресс и в области разработки вычислительных систем. Растут разрядность и быстродействие вычислителей, широко распространены многоядерные и распределенные системы. Архитектура многих аппаратных платформ (напр., программируемые логические интегральные схемы, CUDA и др.) напрямую предполагает распараллеливание вычислительного процесса. При этом в современных САПР до сих пор используется математическое обеспечение, разработанное в начале XX в. и не учитывающее архитектурные особенности современных аппаратных платформ. В то же время, возрастающий порядок математических моделей объектов проектирования и увеличение частоты дискретизации вводят дополнительные требования к численным моделям, реализуемым на ЭВМ. В работах Newman M. J., Holmes D. G, Д. Н. Бутусова, К.Г. Жукова и других исследователей показано, что при уменьшении частоты дискретизации цифровая модель системы, полученная путем применения дискретного преобразования Лапласа к непрерывной модели, не приближается по своим свойствам к последней, а становится неустойчивой. Это создает ряд трудностей при компьютерном моделировании высокочастотных устройств. Кроме проблемы устойчивости, в последнее время все большее значение приобретают точностные характеристики создаваемых систем: повышение разрядности аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, появление прецизионных актуаторов и жестких объектов управления, требуют достижения соответствующей точности проектируемых бортовых вычислителей.

Известен прием разбиения математической модели динамической системы, представленной в виде передаточной функции, на последовательно соединенные звенья не выше второго порядка (Second-Order Sections). Это позволяет достичь

устойчивости всей системы за счет некоторого увеличения трудоемкости процесса разработки. С математической точки зрения ничто не препятствует декомпозиции передаточной функции на параллельные звенья второго порядка. Для этого достаточно перейти к параллельной форме Жордана с последующим объединением звеньев 1го порядка, содержащих комплексно-сопряженные коэффициенты, в искомые звенья 2го порядка. Однако в составе инструментальных пакетов проектирования отсутствуют соответствующие функции. В настоящей работе представлена практическая реализация алгоритма разбиения передаточной функции на параллельные звенья второго порядка для сред MATLAB и LabVIEW.

В качестве одного из способов перехода от модели в виде дифференциальных уравнений или передаточной функции к эквивалентной системе алгебраических уравнений в современных САПР широко применяются численные методы интегрирования. Для обеспечения высокой степени эквивалентности моделей и устойчивости при малых шагах дискретизации порядок метода должен быть относительно высоким (>2 го, в зависимости от точностных требований). Известно, что численные методы интегрирования высокого порядка обеспечивают большую степень эквивалентности между непрерывной системой и ее дискретной моделью в более широком диапазоне шагов дискретизации, нежели z -преобразование. В то же время, цифровые модели, полученные с применением численных методов интегрирования высокого порядка, имеют большое число машинных операций на каждом шаге вычислений. Алгебраические уравнения, описывающие поведение системы, носят рекуррентный характер и плохо поддаются распараллеливанию. Данные недостатки существенно ограничивают применение методов интегрирования высокого порядка при аппаратной реализации, особенно на вычислителях с представлением данных в виде чисел с фиксированной точкой. Из работ К.Г. Жукова и Д.Н. Бутусова известен аппаратно-ориентированный численный метод интегрирования второго порядка точности, позволяющий распараллеливать вычислительный процесс при реализации на платформе соответствующей архитектуры. Однако по точностным характеристикам данный метод сопоставим с широко применяемыми методами трапеций, Рунге-Кутты и дискретной подстановкой Тастина, что несколько нивелирует его практическую ценность. Наиболее соответствующими современным требованиям к точности моделирования являются методы 3го и 4го порядков, но их аппаратно-ориентированные версии неизвестны.

Исходя из вышесказанного, представляется актуальным создать методическое, программное и математическое обеспечение подсистемы автоматизированного построения параллельной структуры цифровых моделей динамических систем на основе аппаратно-ориентированного численного метода высокого (больше второго) порядка точности. Включение данной подсистемы в состав современных САПР существенно сократит время разработки цифровых

устройств, повысит их точностные характеристики, решит ряд проблем, связанных с устойчивостью дискретных моделей.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы - повышение производительности труда разработчиков цифровых систем обработки сигналов с одновременным улучшением характеристик объектов проектирования за счет создания методического, программного и математического обеспечения подсистемы автоматизированного построения цифровых моделей динамических систем с параллельной архитектурой.

Объектом исследования являются программно-аппаратные комплексы цифровой обработки сигналов.

Предмет исследования – методическое, математическое и программное обеспечение подсистем САПР программно-аппаратных комплексов цифровой обработки сигналов.

Задачи диссертационной работы

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

1. Разработка и апробация методики автоматизированного проектирования цифровых систем управления и обработки сигналов с параллельной архитектурой.
2. Обоснование архитектуры подсистем САПР программно-аппаратных комплексов цифровой обработки сигналов с параллельной реализацией вычислительного процесса. Разработка алгоритмов и программного обеспечения подсистемы автоматизированной генерации кода.
3. Модификация численного метода интегрирования высокого порядка для программно-аппаратной реализации.
4. Разработка вычислительных моделей типовых звеньев динамических систем на основе предложенного численного метода интегрирования.

Основные методы исследования

Для решения поставленных задач в диссертационной работе используются методы теории подобия и моделирования, теории численных методов интегрирования, 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. Разработана и внедрена новая методика автоматизированного проектирования цифровых систем управления и обработки сигналов с параллельной архитектурой.

2. Обоснована новая архитектура подсистем САПР цифровых систем управления и обработки сигналов с параллельной реализацией вычислительного процесса. Сформулированы требования к численным методам, применяемым в составе таких подсистем.
3. Проведена экспериментальная оценка точностных и временных характеристик нового численного метода интегрирования третьего порядка, модифицированного для аппаратной реализации.
4. Разработаны вычислительные модели типовых звеньев динамических систем и программное обеспечение для автоматизированного построения компьютерных моделей по математическому описанию исходной системы.

Достоверность научных результатов

Подтверждается результатами компьютерного моделирования в инструментальных средах и инженерной практикой решения задач проектирования систем управления и обработки сигналов с параллельной организацией вычислительного процесса.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Методика автоматизированного проектирования цифровых систем управления и обработки сигналов на основе типовых интегрирующих звеньев с параллельной организацией вычислительного процесса.
2. Аппаратно-ориентированная модификация численного метода интегрирования третьего порядка точности с экспериментальной оценкой его погрешности и вычислительных затрат.
3. Вычислительная структура типовых интегрирующих звеньев динамических систем на основе разработанного численного метода.
4. Алгоритмы программного комплекса, образующего подсистему автоматизированного построения компьютерных моделей динамических систем на основе синтезированных типовых интегрирующих звеньев.

Практическая ценность

Значение результатов диссертационной работы для практического применения заключается в следующем:

1. Разработанная методика автоматизированного проектирования цифровых систем управления и обработки сигналов может применяться для решения крупных научных и технических задач численного моделирования, требующих выполнения больших объемов вычислений в реальном масштабе времени.
2. Разработанная подсистема автоматизированного программирования цифровых моделей для САПР систем управления и обработки сигналов может быть использована при создании изделий электронной промышленности, авиационно-космической отрасли и других отраслей, решающих задачи управления и обработки сигналов в реальном времени.

3. Цифровые интегрирующие звенья, основанные на предлагаемых аппаратно-ориентированном численном методе интегрирования с параллельной структурой вычислительного процесса, обеспечивают улучшение характеристик встраиваемых систем управления и обработки сигналов.

Практическая реализация и внедрение результатов работы

Разработанная подсистема автоматической генерации кода исполняемых моделей внедрена в научно-исследовательском институте командных приборов (ФГУП НИИ КП) при проектировании изделий ракетно-космического комплекса. Разработанная методика автоматизации проектирования на основе параллельных вычислительных интегрирующих структур внедрена в учебный процесс кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ. Факт внедрения подтвержден актами, приложенными к диссертационной работе.

Результаты диссертационной работы использовались:

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 направлению «Компьютерные технологии инжиниринга».

Результаты диссертационной работы использовались при разработке моделей цифрового регулятора в НИР «Исследования и разработки электронного блока (ЦЭБ) комплекса командных приборов» (договор № 13-2/САПР-75 от 10.04.2013), выполненной совместно кафедрой САПР СПбГЭТУ и научно-исследовательским институтом командных приборов (ФГУП НИИ КП). Результаты диссертационной работы также использовались в двух научно-исследовательских работах по теме «Создание высокопроизводительных вычислительных технологий для интеллектуальных систем оперативной обработки и визуализации гидроакустической информации» (соглашение № 14.В37.21.0589) и по теме «Мониторинг широкого частотного диапазона с использованием банков цифровых фильтров на высокопроизводительной аппаратно-программной базе» (соглашение № 14.В37.21.1240), проводившихся в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на 10-й и 11-й международных конференциях "Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments", (Москва,

Конгресс-центр МТУСИ, 2011-2012), а также ежегодных конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2010-2013 гг.

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 9 научных трудах, из них по теме диссертации 9, среди которых 4 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК и 5 публикаций в сборниках трудов международных и прочих конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами и заключения. Она изложена на 172 страницах машинописного текста, включает 107 рисунков, 11 таблиц, 2 приложения и содержит список литературы из 72 наименований, среди которых 67 отечественный и 5 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, приводятся основные научные и практические результаты, обосновывается их новизна. Приводится содержание и краткое описание глав диссертации.

Первая глава диссертационной работы посвящена аналитическому обзору существующих средств автоматизации проектирования цифровых систем управления и обработки сигналов. Дается оценка состояния и перспектив развития современных вычислительных платформ, пригодных для создания цифровых систем управления и обработки сигналов. Показано, что наиболее перспективными высокопроизводительными вычислительными платформами являются те, которые обеспечивают поддержку параллельных вычислений. Для решения современных задач моделирования, управления и обработки сигналов все чаще используют ПЛИС, поскольку в суммарной производительности они не уступают, а иногда даже и превосходят устройства, построенные на базе микроконтроллеров и многоядерных систем. Дополнительным преимуществом ПЛИС является их универсальность, отказоустойчивость и архитектура, обладающая естественным параллелизмом.

В работах Каляева И.А. показано, что реальная производительность кластерных суперкомпьютеров составляет, как правило, 5...15 % от их пиковой производительности при решении широкого класса задач, в то время как реконфигурируемые системы на базе ПЛИС имеют возможность адаптации своей архитектуры к структуре решаемой задачи или ее фрагмента, за счет чего обеспечиваются высокая реальная производительность, близкая к пиковой (не

ниже 60%), и линейный прирост производительности при наращивании аппаратного ресурса.

В главе проводится аналитический обзор современных сред проектирования Altera Quartus II, Xilinx ISE, National Instruments LabVIEW, MATLAB/Simulink. Анализ инструментальных пакетов показывает, что в настоящее время на рынке практически отсутствуют программные пакеты, реализующие весь цикл проектирования высокопроизводительных цифровых систем. Наиболее продвинутые системы автоматизации проектирования используют преимущества комплексирования нескольких сред проектирования, объединенных при помощи различных интерфейсов. Это приводит к росту цены выпускаемого конечного продукта, в силу необходимости покупки нескольких программных пакетов для реализации полного цикла проектирования. Структура проекта при этом усложняется, вследствие чего появляется потребность в коллективе специалистов, имеющих опыт работы с каждой комплексированной средой. В рамках выбранной предметной области целесообразно выбрать единую систему, которая обладает как средствами синтеза и анализа моделей динамических систем, так и средствами автоматизации построения решений на базе ПЛИС. Наибольшую степень соответствия предъявляемым требованиям показывает инструментальный пакет NI LabVIEW. На основе алгоритмов, вычислительных моделей и методов проектирования, разработанных в диссертационной работе, создается программная подсистема для данного программного комплекса. Глава завершается постановкой задач исследования и их обоснованием.

Во второй главе диссертационной работы рассматриваются существующие методы математического описания дискретных систем. Рассматривается дискретное преобразование Лапласа и способы перехода от непрерывных динамических систем к цифровым, использующие замену комплексной переменной S ее дискретным отображением различного порядка точности. Подтвержден главный недостаток z -преобразования, а именно: при стремлении периода дискретизации к нулю корни системы в z -области стремятся к единице. Динамическая характеристика такой цифровой системы не повторяет характеристику непрерывной и может существенно отличаться от нее, что несомненно снижает степень эквивалентности моделируемой системы ее дискретному отображению.

С позиций точностных характеристик проанализирован математический аппарат дельта-преобразования, который лишен вышеописанного недостатка. При уменьшении периода дискретизации динамическая характеристика такой цифровой системы стремится к характеристике непрерывной. Производится оценка существующих численных методов интегрирования с точки зрения их эффективности при аппаратной реализации. Характер вычислений всех классических методов численного интегрирования, применяемых на практике,

является рекуррентным. Соответственно, применение современных цифровых устройств с параллельной вычислительной архитектурой не даст никакого выигрыша в скорости вычислений при решении задач САУ и ЦОС, требующих интегрирования.

Для устранения этого недостатка в рамках диссертационной работы была разработана модификация метода численного интегрирования, обладающая параллелизмом вычислительного процесса. Рассмотрим описание метода на примере решения задачи Коши при следующих начальных условиях:

$$y' = f(t, y), y(t_0) = y_0 \quad (1)$$

Значение искомой функции $y(t)$ в следующей точке при шаге дискретизации T_0 будет вычисляться по формуле:

$$y[(k+1)T_0] = \frac{y_{tr}[(k+1)T_0] + 2y_{mp}[(k+1)T_0]}{3}, \quad (2)$$

где $y_{tr}[(k+1)T_0]$ - значение функции y на следующем шаге интегрирования, полученное методом трапеций по формуле:

$$y_{tr}[(k+1)T_0] = T_0 * \frac{f(x[kT_0], y[kT_0]) + f(x[(k+1)T_0], y[(k+1)T_0])}{2}, \quad (3)$$

а $y_{mp}[(k+1)T_0]$ - значение функции y на следующем шаге интегрирования, полученное методом Эйлера в средней точке по формуле:

$$y_{mp}[(k+1)T_0] = T_0 * f(x[(k+0.5)T_0], y[(k+0.5)T_0]) \quad (4)$$

Предлагаемая модификация метода Симпсона имеет третий порядок алгебраической точности, т.е. итоговая ошибка на конечном интервале интегрирования имеет порядок $O(h^3)$. Это подтверждается результатами компьютерного эксперимента. Из выражения (2) видно, что входящие в уравнение расчетные величины не связаны друг с другом, что свидетельствует о возможности распараллеливания вычислительного процесса. Применение данного метода позволяет сократить временные затраты на вычисления за счет параллельности их структуры при реализации на аппаратной платформе с поддержкой параллелизма.

В главе дается описание способов декомпозиции динамических систем при переходе от математического описания в виде передаточных функций к блок-диаграмме компьютерной модели. Показано, что известная схема параллельного программирования применима лишь к частным случаям передаточной функции системы, в которых все нули и полюса являются действительными. В общем случае при нахождении нулей и полюсов динамической системы можно получить их в виде комплексно-сопряженных пар. Очевидно, что численная реализация таких систем средствами вычислительной техники затруднена наличием комплексных коэффициентов. Целесообразно улучшить данный способ декомпозиции.

Приводится аналитический обзор типовых звеньев динамических систем, в ходе которого показано, что любая передаточная функция может быть получена путем последовательной или параллельной композиции типовых звеньев не более второго порядка. Сделан вывод о том, что типовыми звеньями, параллельная

комбинация которых позволяет получить любую передаточную функцию высокого порядка, будут являться пропорциональное звено, звено первого порядка и звено второго порядка. Далее приводится описание разработанных в диссертационной работе универсальных цифровых процессоров, реализующих интегрирующие звенья первого и второго порядка. Каждый цифровой процессор реализует набор численных методов, в числе которых находится разработанный в данной работе аппаратно-ориентированный метод 3го порядка точности. На рисунке 1 показана блок-диаграмма виртуального прибора (ВП), который представляет собой универсальный цифровой процессор, реализующий разработанные модели типового звена второго порядка различными численными методами.

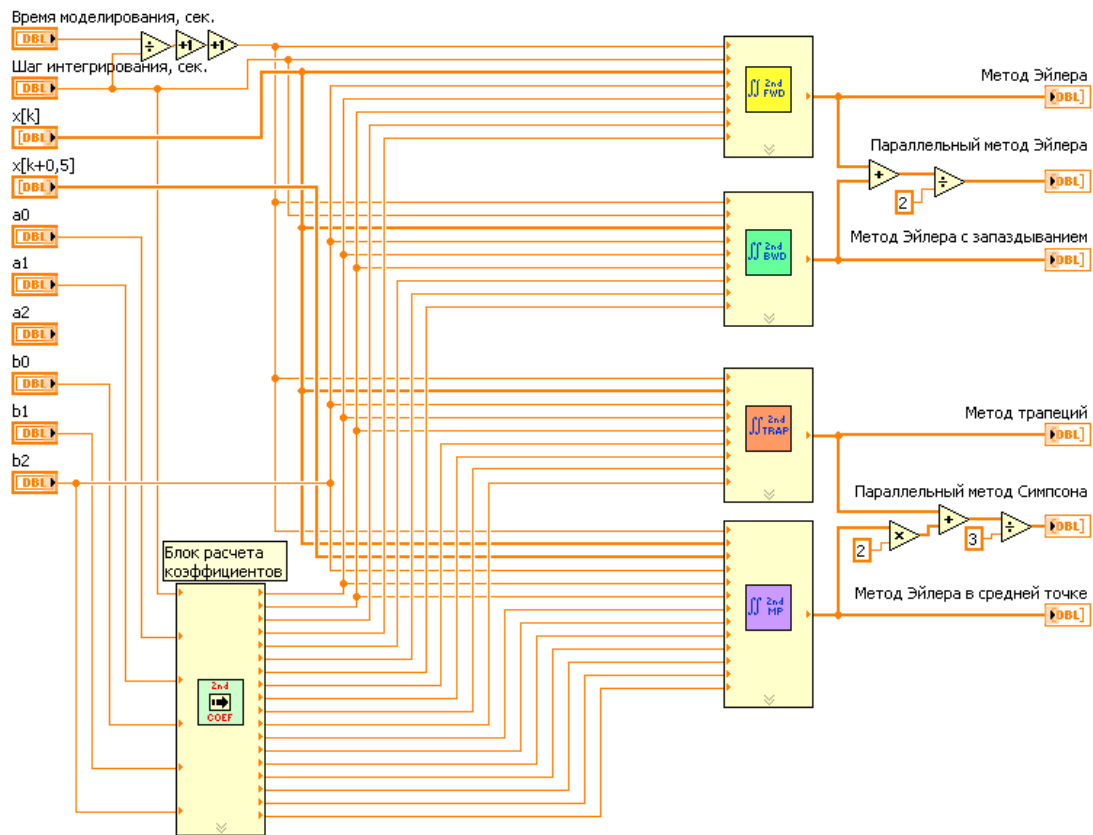


Рисунок 1 – Блок-диаграмма ВП, реализующего цифровую модель типового звена второго порядка методами Эйлера, трапеций и средней точки

В качестве математического описания универсального цифрового процессора выбраны параллельные модификации методов Эйлера и Симпсона, построенные на базе методов меньшего порядка точности. Определяющее уравнение каждого используемого метода оптимизируется по количеству вычислительных операций путем его приведения к стандартному виду:

$$y = \sum_{i=0}^n (a_i * x_i) \quad (5)$$

где y и x_i – переменные величины, а коэффициенты a_i являются параметрами.

Кроме очевидного выигрыша в количестве вычислений форма представления (5) также является естественной для масштабирования уравнений с целью их дальнейшего переноса на вычислительные устройства, поддерживающие только целочисленные типы данных.

Третья глава описывает предлагаемую методику автоматизированного проектирования цифровых систем управления и обработки сигналов с параллельной организацией вычислительного процесса.

В основе разработанного методического обеспечения лежит концепция перехода от непрерывной модели системы, описанной в операторной форме или в виде набора нулей и полюсов, к эквивалентной дискретной модели, обладающей параллельной архитектурой вычислительного процесса.

В соответствии со свойствами дробно-рациональных функций любую передаточную функцию можно представить в виде суммы элементарных звеньев (6), что широко используется при аналитическом интегрировании.

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \sum_{i=1}^k \frac{r_i}{(s-p_i)} + K, \quad (6)$$

где B и A – полиномы с вещественными коэффициентами, причем степень B меньше степени A . Коэффициенты p_i – вещественные или комплексные. Комплексные коэффициенты образуют сопряженные пары. Коэффициенты r_i – вещественные постоянные, а K является пропорциональным звеном, значение которого может быть равно нулю. Поскольку аппаратная реализация вычислительного алгоритма с использованием комплексных чисел затруднительна, необходимо привести звенья к виду, когда они не содержат комплексных коэффициентов. Суммируем звенья с комплексно-сопряженными корнями числителя и знаменателя $r_i p_i$, и получим передаточные функции вида:

$$H_i(s) = \frac{l_i s + r_i}{s^2 + m_i s + p_i}, \quad (7)$$

где l_i, r_i, m_i, p_i – вещественные числа.

Таким образом, с помощью описанного алгоритма любую передаточную функцию можно представить в виде суммы отдельных передаточных функций, порядок которых не превышает второго (8). При этом все коэффициенты суммы являются вещественными числами, что важно при аппаратной реализации численных моделей таких систем.

$$H(s) = \sum_{i=1}^n H_i(s) + K, \quad (8)$$

где $H_i(s)$ – передаточная функция с вещественными коэффициентами либо первого порядка (6), либо второго порядка (7).

При реализации математической модели в форме (8) рост порядка передаточной функции будет оказывать незначительное влияние на общее время вычислений при реализации на платформах, поддерживающих параллельные вычисления, таких как ПЛИС или многоядерные системы, поскольку каждое интегрирующее звено из общей суммы может вычисляться независимо от

остальных. Таким образом, можно достичь улучшения свойств модели путем увеличения порядка передаточной функции, при этом избегая роста временных затрат на вычисления за счет параллельной структуры.

Для перехода к цифровой реализации исходной системы необходимо заменить полученные непрерывные звенья первого и второго порядка на цифровые процессоры, основанные на численных методах интегрирования. При этом представляется целесообразным использовать численные методы, ориентированные на аппаратную реализацию, т.е. обладающие малым числом действий, выполняемых на каждом шаге интегрирования, и подразумевающие распараллеливание вычислительного процесса. Такие методы описаны во второй главе диссертации.

Предлагаемая методика проектирования предполагает выполнение следующих этапов, на каждом из которых проводится верификация полученной модели, оцениваются относительная погрешность и время моделирования:

1. Приведение исходного уравнения к форме единой передаточной функции.
2. Выполнение моделирования и оценка точностных и временных характеристик непрерывной модели в s -области.
3. Получение вычислительной модели при помощи подсистемы автоматизированного программирования (САП) и получение решения в системе LabVIEW.
4. Выполнение моделирования и оценка точностных и временных характеристик полученного решения.
5. Выбор шага интегрирования вычислительной модели по значению погрешности, полученному в п. 2.
6. Выполнение моделирования и сравнение полученных решений с результатами, полученными в п. 2 и 4.
7. Выполнение масштабирования и переход к реализации с «фиксированной точкой».
8. Выполнение моделирования с целью фиксации «переполнения» выбранной разрядной сетки. При наличии переполнения изменение масштабов. Сравнение полученных данных с 6.
9. Переход к реализации вычислительной модели с целочисленным типом данных (Integer с длиной машинного слова 16 бит или 32 бита). В случае недостижения требуемой точности при длине машинного слова 16 бит переход к типу Integer с длиной машинного слова 32 бита.

Исходное математическое описание системы может быть представлено в виде передаточной функции, пространства состояний, одного дифференциального уравнения высокого порядка или системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Переход от передаточной функции к предлагаемой вычислительной модели осуществляется с помощью разработанной в диссертационной работе САП.

В главе приводятся результаты анализа точностных характеристик при декомпозиции исходной непрерывной системы на сумму звеньев первого и второго порядка. Анализ производится на наборе тестовых передаточных функций различного порядка с известными и неизвестными корнями полиномов числителя и знаменателя ПФ. Показано, что при росте порядка передаточной функции происходит рост погрешности декомпозированной предлагаемым способом системы относительно исходной. Доказано, что этот эффект связан с неточностью нахождения корней исходной передаточной функции. В настоящий момент известны способы более точного нахождения корней передаточной функции, нежели тот, что реализован в функции Residue языка MathScript. Стоит отметить, что широко распространенный подход разбиения передаточной функции на последовательные звенья второго порядка (SOS) также обладает таким недостатком.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена разработке подсистемы автоматизированного программирования (САП) исполняемых компьютерных моделей в виде виртуального прибора среды LabVIEW на основе математического описания динамической системы.

Переход от исходной математической модели к предлагаемой компьютерной модели с параллельной архитектурой вычислительного процесса весьма трудоемок. При росте порядка передаточной функции исходной системы, что нередко используется проектировщиками для повышения качественных характеристик проектируемой системы, трудоемкость процесса значительно возрастает. Исходя из этого, целесообразно автоматизировать процесс перехода от математической модели к исполняемой компьютерной спецификации.

Предлагаемая САП предназначена для преобразования математической модели исходной системы в исполняемую спецификацию с параллельной организацией вычислительного процесса. Получаемая компьютерная модель пригодна для использования на дальнейших этапах процесса проектирования. Разработанная САП решает следующий круг задач:

1. Декомпозирует модель динамической системы, представленную в виде передаточной функции или набора нулей, полюсов и коэффициента передачи, на параллельные звенья 1 и 2го порядка, используя разработанные в третьей главе алгоритмы;
2. Производит автоматический расчет коэффициентов для цифровых интегрирующих процессоров, реализующих звенья 1го и 2го порядков;
3. Формирует виртуальные приборы по числу цифровых интегрирующих процессоров с учетом выбранного пользователем метода интегрирования и шага дискретизации и строит компьютерную модель системы, обладающую параллельной структурой вычислительного процесса;

4. Получение суммы выходных сигналов цифровых интегрирующих процессоров завершает построение виртуального прибора, реализующего параллельную вычислительную модель исходной динамической системы.

Структура созданной САП является модульной. Все части САП являются самостоятельными подприборами, реализующими основные этапы автоматизации программирования, описанные выше. Задан набор типовых процедур, использующихся в составе основных подприборов. Это придает системе гибкость и модульность: возможно ее расширение без изменений главного алгоритма работы, например, путем добавления новых аппаратно-ориентированных методов.

Программная часть САП выполнена в виде виртуального подприбора среды LabVIEW, и разработчик цифровых систем, использующий созданную САП, может рассматривать ее как часть программного окружения, встраивая разработанную САП в состав собственных виртуальных приборов.

В главе делаются выводы о перспективах внедрения и применения разработанной САП в составе сред прототипического проектирования. Предлагаемый подход к организации САП позволит создавать генераторы кода, исполняемого на целевых платформах (MCU, DSP, FPGA, FPAА и т.д.) без промежуточного описания на языках низкого уровня. Набор моделей динамических систем, с помощью которых проводится экспериментальная проверка теоретических результатов работы, созданы с применением САП.

Пятая глава диссертационной работы посвящена проверке полученных научных результатов путем моделирования различных динамических систем в инструментальных средах.

В главе описывается поэтапное проектирование модели цифрового регулятора с применением предлагаемого методического и программного обеспечения в процессе выполнения НИР «Построение цифрового корректирующего контура системы стабилизации», выполненной совместно УНЦ КТИ кафедры САПР СПбГЭТУ и научно-исследовательским институтом командных приборов (ФГУП НИИ КП). Исходными данными для работы, предоставляемыми заказчиком, являлось математическое описание передаточной функции:

$$W(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p} \times \frac{(T_3 p + 1)^3}{(T_4 p + 1)^3} \times \frac{1}{T_5 p + 1} \times \frac{1 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3}{1 + a_4 p + a_5 p^2 + a_6 p^3}, \quad (9)$$

где постоянные времени: $T_1=0,04$ с.; $T_2=0,04$ с.; $T_3=0,0136$ с.; $T_4=0,00194$ с.; $T_5=0,000194$ с.; $a_1=1 \cdot 10^{-4}$ с.; $a_2=5,345 \cdot 10^{-8}$ с².; $a_3=5,351 \cdot 10^{-12}$ с³.; $a_4=2,719 \cdot 10^{-4}$ с.; $a_5=7,638 \cdot 10^{-8}$ с².; $a_6=5,351 \cdot 10^{-12}$ с³.

Конечная модель цифрового регулятора представляет собой исполняемую спецификацию для ПЛИС фирмы National Instruments CompactRIO-9012, представленную в виде виртуального прибора, блок-диаграмма которой показана на рисунке 2.

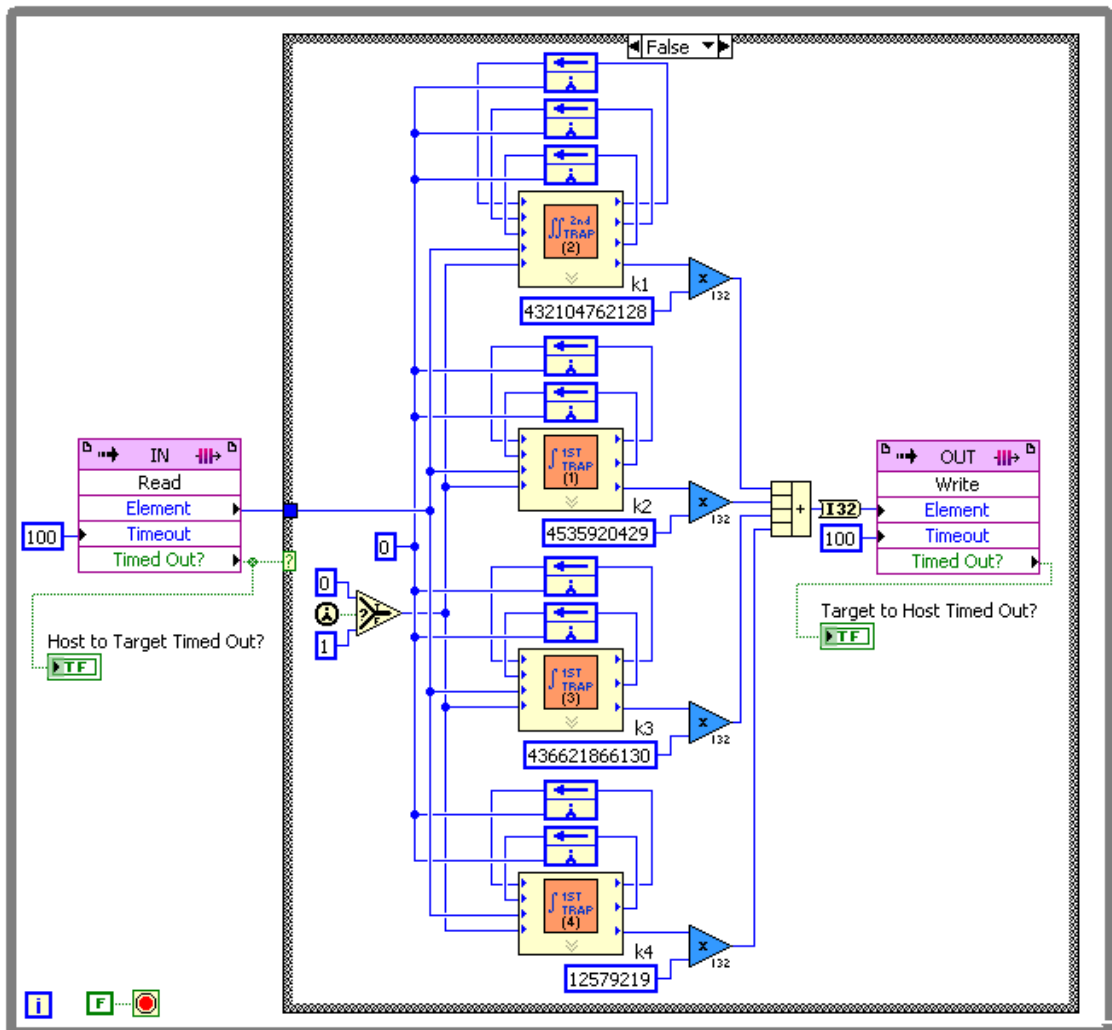


Рисунок 2 – Модель регулятора с фиксированной точкой (Integer с длиной машинного слова 32 бита), пригодная для программирования ПЛИС.

Таким образом, подтверждается эффективность разработанной методики и научная достоверность теоретических и практических результатов, полученных в ходе исследования.

В главе проверяется применимость методики прототипического проектирования цифровых систем с параллельной структурой вычислительного процесса к задачам цифровой обработки сигналов. Проводится испытание методики на наборе тестовых задач. Приводится пример поэтапной реализации прототипа цифрового фильтра высокого порядка на основе предложенной методики проектирования.

Таким образом, подтверждается эффективность разработанной методики и научная достоверность теоретических и практических результатов, полученных в ходе исследования.

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

Основные результаты работы

1. Разработана и внедрена методика автоматизированного проектирования цифровых систем управления и обработки сигналов с параллельной архитектурой на основе перехода от модели непрерывной системы к системе алгебраических уравнений, реализующей выбранный метод интегрирования.
2. Сформулированы основные требования к архитектуре подсистем САПР, ориентированных на проектирование цифровых систем управления и обработки сигналов с параллельной реализацией вычислительного процесса. Сформулированы требования к численным методам, применяемым в составе моделирующих подсистем. Произведен выбор и модификация для аппаратной реализации численного метода интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений третьего порядка точности.
3. Созданы вычислительные модели типовых звеньев, реализующие предложенный численный метод интегрирования высокого порядка, модифицированный для аппаратной реализации. Произведена экспериментальная оценка точностных и временных характеристик метода.
4. На основе выбранной структуры подсистемы автоматизированного проектирования виртуальных приборов по заданному математическому описанию разработано программное обеспечение САПР – подсистема автоматизации программирования перехода от математического описания исследуемой системы к компьютерной модели.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Андреев В.С. Модельное проектирование генератора гармонических сигналов на базе ПЛИС [Текст] / Андреев В.С., Бутусов Д.Н. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2011. – № 10. – С. 55-60.
2. Андреев В.С. Программно-аппаратные решатели уравнений в частных производных на основе метода прямых [Текст] / Бутусов Д.Н., Андреев В.С. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 4 – С. 14-21.
3. Андреев В.С. Анализ эффективности применения дельта-преобразования при моделировании звеньев второго порядка [Электронный ресурс] / Андреев В.С., Бутусов Д.Н., Каримов Т.И., Липкин С.М., Сотнин М.И. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1. – Режим доступа: www.science-education.ru/107-8128.
4. Андреев В.С. Архитектура параллельных высокопроизводительных устройств обработки сигналов [Электронный ресурс] / Андреев В.С.,

Бутусов Д.Н., Красильников А.В. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – Режим доступа: www.science-education.ru/111-10283.

Другие статьи и материалы конференций:

5. Андреев В.С. Проектирование цифровых фильтров средствами модуля NI Digital Filter Design [Текст] / Бутусов Д.Н., Романов А.Е., Андреев В.С. // Сборник материалов 63й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, 2010. – С.121-126.
6. Андреев В.С. Программно-аппаратная реализация решения уравнений в частных производных [Текст] / Бутусов Д.Н., Андреев В.С., Жуков К.Г., Решетов И.Н. // Материалы международной конференции «Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments». – М.: Конгресс-центр МТУСИ, 2011. – С. 431.
7. Андреев В.С. Исследование погрешностей численных формул интегрирования с применением универсального интегратора [Текст] / Андреев В.С., Бутусов Д.Н. // Материалы международной конференции «Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments - 2012». – М.: Конгресс-центр МТУСИ, 2012. – С. 404.
8. Андреев В.С. Лабораторный практикум дисциплины «Автоматизация проектирования встраиваемых систем» [Текст] / Бутусов Д.Н., Андреев В.С., Красильников А. В., Белов П. Е. // Материалы международной конференции «Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments - 2012». – М.: Конгресс-центр МТУСИ, 2012. – С. 173.
9. Андреев В.С. Организация курса лабораторных работ по цифровой схемотехнике в среде LabVIEW [Текст] / Андреев В.С., Островский В.Ю., Малютин М.О. // Сборник материалов 66й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, 2013. – С.148-152.