

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации

Хилько Дмитрия Владимировича

на тему «Исследование и разработка потоковой рекуррентной архитектуры для эффективной реализации параллелизма в области цифровой обработки сигналов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.2 – «Вычислительные системы и их элементы».

Практическая значимость и актуальность работы

В диссертационной работе Хилько Д.В. рассмотрена актуальная задача разработки средств эффективной реализации параллелизма в области цифровой обработки сигналов (ЦОС). Как правило, задачи ЦОС реального времени могут быть решены при помощи высокопроизводительных цифровых процессоров сигналов (DSP). Архитектура большинства современных высокопроизводительных DSP процессоров сочетает в себе эффективность специализированных процессоров с возможностью эффективного программирования на языках высокого уровня, что позволяет существенно снизить стоимость и время разработки конечных систем. Однако развитие таких систем идет эволюционным путем. Значительное улучшение таких характеристик как производительность на единицу потребляемой энергии и снижение площади кристаллов на единицу производительности возможно только при переходе на принципиально новую архитектуру или технологический процесс.

Вопросом развития новых архитектур DSP процессоров и посвящена диссертация Хилько Д.В. Разработка полностью отечественной архитектуры и ПО таких процессоров позволит также создавать доверенные вычислительные системы, особенно актуальные для России в настоящее время. В основе предлагаемой архитектуры лежит идея использования потоковой и параллельной архитектуры. Ее ключевой принцип – инициация выполнения инструкции при условии готовности операндов, позволяет использовать параллелизм алгоритма естественным образом, в отличие от предварительной выборки инструкции и последующей необходимостью ожидать данные в традиционной фон-неймановской архитектуре. В России подобную архитектуру потоковых процессоров предложил академик Бурцев В.С. и при его жизни она активно развивалась. В настоящее время ведутся активные исследования в области разработки потоковых архитектур в ряде институтов РАН. Одной из перспективных разработок является многоядерная потоковая рекуррентная архитектура (МПРА). Ключевые особенности МПРА, подробно описанные автором диссертации и предложенные им теоретические, алгоритмические, программные и модельные решения позволяют решить ряд известных проблем потоковых архитектур, которые не дали возможность продвинуться исследованиям в данной области дальше прототипов.

Потенциально, исследуемая Хилько Д.В. рекуррентная архитектура, может быть использована не только для разработки высокопроизводительных специализированных вычислительных систем, но и процессоров общего назначения. Поэтому, тема диссертационного исследования, безусловно, актуальна.

Характеристика содержания диссертационной работы

Диссертация Хилько Д.В. состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы из 116 наименований. Объем диссертации составляет 200 стр., из которых 156 стр. основного текста.

Во **введении** представлена краткая характеристика потоковых архитектур и проблем их реализации. Автором обозначены направления российских исследований в этой области. В частности, приводится описание ключевых преимуществ рекуррентной архитектуры и обосновывается актуальность разработки ее прототипа. Также автором формулируются цель и задачи работы, перечисляются методы исследования, приводятся: обоснование научной новизны; научная и практическая значимость; сведения о реализации результатов.

В **главе 1** автор представляет результаты исследования и анализа предметной области параллельных вычислительных систем. Приводится классификация способов реализации параллелизма. Рассматриваются принципы потоковых архитектур и проблемы их реализации. Также Хилько Д.В. осуществляет подробный анализ ключевых принципов новой рекуррентно-потоковой модели вычислений и рекуррентной архитектуры, а также функциональных возможностей ее прототипа – гибридной архитектуры рекуррентного обработчика сигналов (ГАРОС). Согласно результатам представленного анализа ГАРОС обеспечивает решение большинства известных проблем потоковых архитектур, кроме реализации высокопроизводительной микроархитектуры. Автор отдельно выделяет, что ГАРОС реализует уникальный способ описания программ – капсульный стиль программирования, для реализации которого требуется разработка специализированных методик и программных средств. В выводах к главе Хилько Д.В. конкретизирует схему решения основной задачи диссертационного исследования.

В **главе 2** Хилько Д.В. приводит основные результаты разработки прототипа рекуррентной архитектуры. Автором представлены результаты анализа проблем реализации задач ЦОС в ГАРОС и разработки микроархитектуры вычислительных блоков ГАРОС. К ним относятся: усовершенствованная структура вычислительного блока; метод поддержки многозадачности и два режима суперскалярных вычислений на его основе; детали алгоритмов реализации предложенного метода. Также приводятся дополнительные архитектурные и алгоритмические решения, которые в совокупности позволили решить проблемы, упомянутые ранее. Другим значимым результатом разработки ГАРОС являются средства аппаратной поддержки алгоритма Быстрого преобразования Фурье (БПФ), который является ключевым алгоритмом ЦОС. Хилько Д.В. разработал метод, архитектуру средств поддержки БПФ и алгоритмы их функционирования, привел результаты синтеза в ПЛИС данных средств. Полученное решение требует существенно меньше аппаратных ресурсов и вычисляет типовой 256-точечный БПФ на 12% быстрее имевшегося в ГАРОС решения.

В **главе 3** рассматриваются результаты разработки отдельных элементов методологии программирования и отладки ГАРОС в совокупности методик, алгоритмов, моделей и программных средств. Автором представлены результаты доработки модели программирования, а также приводится обобщенное описание рекуррентно-потоковой методологии программирования., для которой Хилько Д.В. разработал: методики программирования и алгоритмы их реализации. Данные результаты значительно упрощают и систематизируют процесс разработки ПО в

капсульном стиле программирования. Также автором разработаны инструменты моделирования: программная имитационная и аппаратная VHDL модели и набор программных средств, которые являются приложением к рекуррентно-поточковой методологии программирования. К ним относятся системы: имитационного моделирования; аппаратного моделирования; автоматизированного построения граф-капсул; автоматизированной верификации и валидации ГАРОС. Данные системы были интегрированы в единый программный комплекс ПК ПОТОК. Таким образом, автору удалось решить ключевые проблемы программируемости ГАРОС.

В главе 4 представлены результаты испытаний ГАРОС и ее ПЛИС-прототипа. Соискателем приводятся результаты применения методик капсульного для декомпозиции эталонной задачи распознавания изолированных слов, которая используется для верификации и валидации ГАРОС, на множество капсул. Хилько Д.В. демонстрирует результаты модельных испытаний разработанных капсул с микроконтроллером dsPIC30F компании Microchip по числу циклов исполнения, согласно которым средний коэффициент ускорения составил $\sim 4,5$. Также в главе представлены результаты синтеза и натурных испытаний ПЛИС-прототипа ГАРОС на реальных произнесениях. Коэффициент ускорения на том же наборе капсул для асинхронной реализации дисциплины взаимодействия между уровнями ГАРОС составил $\sim 3,6$. Автор сделал предположение о причинах расхождения с модельными результатами и обозначил возможные способы решения. Наконец, Хилько Д.В. предоставил модельные оценки производительности ГАРОС на наборе типовых алгоритмических ядер ЦОС в сравнении с ЦСП серии TMS C55x компании Texas Instruments. Из данных оценок можно сделать вывод, ГАРОС имеет сопоставимый с C55x уровень производительности.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты, представленные в диссертации, а также предложены направления дальнейшей разработки рекуррентной архитектуры.

Научная новизна и практическая значимость результатов

В диссертационной работе автором предложены архитектурные решения и алгоритмы реализации суперскалярных вычислений, которые позволили разработать высокопроизводительный прототип МПРА на модельном уровне, о чем свидетельствуют результаты реализации типовых алгоритмических ядер ЦОС. Кроме того, полученный ПЛИС-прототип доказал работоспособность архитектуры как целого и показал близкий к моделям уровень производительности.

Также Хилько Д.В. разработал методический подход к организации процесса программирования и отладки ГАРОС, который включает в себя совокупность методик, алгоритмов и моделей. Кроме того, автор разработал инструментальное средство ПК ПОТОК, которое позволило частично автоматизировать процесс капсульного программирования. Совокупность всех разработанных элементов Хилько Д.В. позиционирует как рекуррентно-поточковую методологию программирования, которая может быть использована для реализации в капсульном виде задач различной степени сложности.

Представленные автором результаты подтверждают эффективность разработанных решений, методов и алгоритмов и высокую научную и практическую

значимость проведенной работы. Разработанный прототип может быть использован для решения типовых задач ЦОС реального времени.

Достоверность основных положений и результатов работы

Достоверность результатов обеспечивается корректностью тестовых данных, а также согласованностью результатов модельных и натурных экспериментов и этих данных. Результаты работы были реализованы в рамках: НИР по государственному заданию № 0063-2019-0010; гранта РНФ № 19-11-00334; проекта № 075-15-2020-799 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Результаты диссертации представлены в 36 научных работах, в том числе 24 научных статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень, рекомендованный ВАК, и обсуждались на международных конференциях и всероссийских конференциях. Также автором были получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. В опубликованных автором трудах отражены основные положения его диссертации.

Необходимо отметить следующие недостатки представленной работы:

1. В разделе 4.4 приводятся результаты испытаний ГАРОС, реализованной с использованием ПЛИС Cyclone V. Однако это не финальная версия макетного образца ГАРОС. В работе «Аппаратная реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов в рекуррентном потоковом процессоре на ПЛИС» приводятся результаты испытаний ГАРОС, реализованной на ПЛИС Intel Arria10, но этих данных в диссертации нет.
2. В тексте диссертации утверждается, что автор опирался на свой опыт разработки программ для исходной версии ГАРОС и привел данные о его недостаточно уровне производительности. Однако данные утверждения не подкреплены ссылками на публикации или научно-технические отчеты.
3. Результаты модельных и натурных испытаний в работе представлены только в количестве вычислительных циклов. При этом для полноты сравнительно анализа необходимо также представить данные в Mips.
4. Область ЦОС, несмотря на распространенность задач из данного класса, является специализированной. Из того факта, что рекуррентная архитектура нашла свое применения для задач ЦОС, еще не следует, что вычислительная система на ее основе будет также эффективна для универсального применения.
5. В работе присутствуют небольшие ошибки оформления. В частности, на стр. 48 присутствует ссылка на формулы (3.2) и (3.3), хотя в этом разделе таких формул нет (скорее всего, имелись ввиду формулы (1.4) и (1.5)). Аналогично на стр. 134 имеет место ссылка на формулу (6.1), а должна быть (4.1).
6. Одна из основных задач создания вычислительных комплексов обработки сигналов является разработка программного обеспечения. Современные западные DSP процессоры поддерживаются языками высокого уровня, что позволяет существенно сократить время и стоимость разработки. В диссертации недостаточно рассмотрен вопрос программирования МПРА. Поскольку для универсальных систем это обязательное условие использования таких систем, было бы целесообразно рассматривать только системы обработки сигналов.

Заключение

Отмеченные выше замечания не меняют общего положительного впечатления о диссертационной работе. В ней излагаются результаты решения востребованной практикой задачи разработки прототипа высокопроизводительного ЦСП на основе принципиально новой рекуррентной архитектуры и средств его программирования. Поставленная цель диссертационного исследования достигнута и, несмотря на замечания, заслуживает положительной оценки.

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями, установленными Министерством образования и науки Российской Федерации. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Изложенные в работе материалы обладают внутренним единством и непротиворечивостью.

Диссертация Д.В. Хилько представляет результаты на актуальную тему и является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны методы, алгоритмы, методики программирования, вносящие значительный вклад в разработку вычислительных систем и их элементов.

Автор диссертации, Хилько Д.В., заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.2 – «Вычислительные системы и их элементы».

Официальный оппонент

доктор технических наук (05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления), заместитель директора Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук.



Бобков Сергей Геннадьевич

«13» ноября 2023 г.

Подпись Бобкова С.Г. заверяю.



Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук; 124365 Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3; 8 (499) 729-9890, 8 (499) 729-9323; электронная почта: ippm@ippm.ru; адрес в сети Интернет: <http://www.ippm.ru/>