

**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 представленной диссертационной работе Хилько Д.В. рассмотрена задача разработки высокопроизводительного вычислительного устройства на основе инновационной потоковой рекуррентной архитектуры, а также методов и инструментов его программирования и отладки. Большинство современных вычислительных устройств основано на традиционной архитектуре, предложенной фон-Нейманом. Эта архитектура показала свою универсальность и эффективность, но в ее основе реализуется последовательный вычислительный процесс. В тоже время, одним из наиболее эффективных путей повышения производительности является реализация параллельных вычислений. Хотя традиционные архитектуры реализуют внушительный набор механизмов для реализации параллелизма на различных уровнях, достигается это ценой существенной аппаратной избыточности.

Одним из возможных путей повышения эффективности реализации параллелизма является использование нетрадиционных архитектур. В частности, принцип управления вычислительным процессом по готовности данных, реализуемый в потоковых архитектурах позволяет использовать параллелизм решаемой задачи «естественному» образом, без необходимости дополнительного анализа инструкций. Разработка потоковых архитектур имеет длительную историю. Однако зарубежным исследователям удалось создать только серию прототипов, ввиду целого ряда проблем, которые не позволили снизить степень аппаратной избыточности или достичь адекватной производительности. В России же была разработана многоядерная потоковая рекуррентная архитектура (МПРА), ключевые принципы которой позволяют частично или полностью решить эти проблемы.

Основная цель работы, обозначенная автором, – разработка теоретических, алгоритмических, программных и модельных решений для создания прототипа устройства рекуррентного обработчика сигналов, который будет достаточно производительным для решения задач цифровой обработки сигналов (ЦОС) реального времени. С одной стороны, важность и необходимость эффективно решать задачи ЦОС не вызывает сомнений. С

другой – принципы потоковых архитектур хорошо сочетаются с требованиями задач ЦОС. Следовательно, потоковая рекуррентная архитектура может оказаться эффективной для применения в области ЦОС. Таким образом, направление исследований в предложенной диссертации следует признать **актуальным и важным**.

### **Характеристика содержания диссертационной работы**

Диссертация Хилько Д.В. состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и библиографического списка, включающего 116 наименований. Объем диссертации составляет 200 стр., в том числе 156 стр. основного текста.

Во введении автором: аргументируется актуальность исследований; формулируются цель и задачи работы; перечисляются методы исследования; обосновывается научная новизна, научная и практическая значимость; приводятся сведения о реализации результатов в рамках НИР и грантов.

В первой главе автор представляет результаты исследования и анализа МПРА и ее прототипа – гибридную архитектуру рекуррентного обработчика сигналов (ГАРОС). В разделе 1.1 приводится классификация параллельных вычислительных систем и способов организации параллельных вычислений. В разделе 1.2 рассматриваются принципы потоковых архитектур и основные проблемы их реализации. В разделе 1.3 Хилько Д.В. осуществляет анализ ключевых принципов новой рекуррентно-потоковой модели вычислений и рекуррентной архитектуры, а также функциональных возможностей ее прототипа ГАРОС, применительно к обозначенным в разделе 1.2 проблемам. Согласно результатам представленного анализа ГАРОС обеспечивает решение большинства рассмотренных проблем, кроме реализации высокопроизводительной микроархитектуры. В разделах 1.4-1.5 приводится описание и сравнительный анализ с ГАРОС потоковых архитектур, разработанных российскими исследователями: параллельная потоковая вычислительная система «Буран» и «Мультиклет». В разделе 1.6 соискатель формулирует основные выводы по результатам анализа и конкретизирует схему решения основной задачи диссертационного исследования.

Во второй главе Хилько Д.В. демонстрирует основные результаты разработки прототипа рекуррентной архитектуры. В разделе 2.1 выделяются 9 проблем реализации задач ЦОС в уже существовавшей реализации ГАРОС, для каждой из которых автор предлагает решения в последующих разделах. Раздел 2.2 посвящен наиболее важным результатам разработки микроархитектуры вычислительных блоков ГАРОС. Автор достаточно подробно и убедительно описал: усовершенствованную структуру

вычислительного блока; метод поддержки многозадачности и два режима суперскалярных вычислений на его основе; детали алгоритмов реализации предложенного метода. Схемы разработанных алгоритмов представлены в Приложении А. В разделах 2.3-2.6 приводится ряд архитектурных и алгоритмических решений, разработанных для решения выявленных в разделе 2.1 проблем. Раздел 2.7 посвящен другому значимому результату разработки ГАРОС. Соискатель приводит подробное описание разработанных средств аппаратной поддержки алгоритма Быстрого преобразования Фурье (БПФ). БПФ является ключевым алгоритмом ЦОС, поэтому любой современный цифровой сигнальный процессор (ЦСП) должен поддерживать механизмы эффективного вычисления данного алгоритма. Хилько Д.В. разработал метод, архитектуру средств поддержки БПФ и алгоритмы их функционирования, а также показал их эффективность. Полученное решение требует существенно меньше аппаратных ресурсов и вычисляет типовой 256-точечный БПФ на 12% быстрее имевшегося в ГАРОС решения.

В третьей главе рассматриваются основные теоретические результаты разработки методик, алгоритмов, моделей и программных средств, предназначенных для организации процесса программирования и отладки ГАРОС. В разделе 3.1 представлены результаты доработки модели программирования. В разделе 3.2 приводится обобщенное описание рекуррентно-потоковой методологии программирования., для которой Хилько Д.В. разработал: методики программирования, алгоритмы (блок-схемы, вербальное описание которых представлены в Приложении А). Данные результаты позволяют организовать процесс разработки специализированного программного обеспечения для ГАРОС (называемого капсулами). В разделе 3.3 описываются разработанные инструменты моделирования ГАРОС: программная имитационная и аппаратная VHDL модели. В разделе 3.4 Д.В. Хилько приводит описание разработанных программных средств, которые являются приложением к рекуррентно-потоковой 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, а их применение позволяет частично автоматизировать процесс программирования и отладки ГАРОС.

В четвертой главе представлены результаты программных, аппаратных и натурных испытаний ГАРОС и ее ПЛИС-прототипа. В разделе 4.1 дается описание эталонной задачи распознавания изолированных слов (РИС), тестовые данные которой используются для верификации и валидации ГАРОС. В разделе 4.2 автор применяет разработанные методики

программирования и декомпозириует задачу РИС на множество ключевых алгоритмов, реализуемых в виде капсул. В разделе 4.3 приводятся сравнительные результаты испытаний ГАРОС на уровне моделей с микроконтроллером dsPIC30F компании Microchip по числу циклов. Средний коэффициент ускорения относительно эталонной одноядерной реализации составил  $\sim 4,5$ . В разделе 4.4 представлены результаты синтеза и натурных испытаний ПЛИС-прототипа ГАРОС на произнесениях из библиотеки распознавания. Коэффициент ускорения относительно эталонной реализации для асинхронной реализации дисциплины взаимодействия между уровнями ГАРОС составил  $\sim 3,6$ . Автор сделал предположение о причинах расхождения с модельными результатами и обозначил возможные пути для их устранения. В разделе 4.5 приводится описание типовых алгоритмических ядер, которые используются для измерения производительности современных ЦСП. Сискатель предоставил модельные оценки производительности ГАРОС на данном наборе в сравнении с ЦСП компании Texas Instruments серии TMS C55x. Согласно полученным оценкам, ГАРОС имеет сопоставимый с C55x уровень производительности. Детали реализации капсул алгоритмических ядер рассмотрены в Приложении А.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты, представленные в диссертации, а также предложены направления дальнейших исследований для развития МПРА и ее прототипа ГАРОС.

### **Научная новизна и практическая значимость результатов**

В диссертационной работе автором предложены новые архитектурные решения, методы и алгоритмы организации суперскалярных вычислений и поддержки алгоритма БПФ, которые позволили разработать прототип МПРА, способный функционировать в двух, трех и четырех задачном режиме. Результаты испытаний прототипа подтвердили его способность решать задачи ЦОС реального времени.

Также Хилько Д.В. разработал концептуальный подход к решению проблем программируемости ГАРОС в виде совокупности методик, алгоритмов и моделей, объединенных в единую методологию программирования. А разработанное программное средство ПК ПОТОК реализует отдельные этапы данной методологии и предоставляет инструменты для частичной автоматизации процессов капсульного программирования и отладки ГАРОС.

Полученные автором результаты свидетельствуют об эффективности разработанных решений, методов и алгоритмов и определяют высокую практическую значимость

проведенной работы. Это означает, что разработанный прототип может быть использован для решения типовых задач ЦОС реального времени.

### **Достоверность основных положений и результатов работы**

Достоверность результатов обеспечивается их реализацией в рамках выполнения: 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 получены автором лично, представлены в 36 научных работах, в том числе 24 научных статьях в рецензируемых журналах, включенных ВАК в перечень ведущих периодических изданий, и обсуждались на 7 международных конференциях и 8 всероссийских конференциях с международным участием. Имеются свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. В опубликованных автором трудах отражены основные положения его диссертации. 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.

### **Необходимо отметить следующие недостатки представленной работы**

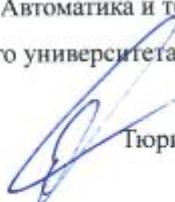
1. При оформлении некоторых рисунков автор отклоняется от общепринятых обозначений или требований ГОСТ. Например, схема алгоритма на рис. 1.9 не соответствует требованиям ГОСТ.
2. В разделе 2.7 на рисунках 2.6 и 2.7 автор привел реализацию многоцикловой инструкции fft, но не предоставил результаты преобразований уравнений для типовой операции «бабочка», из-за чего обозначения промежуточных результатов («G», «E», «H», «D» и др.) являются малопонятными и затрудняют восприятие материала.
3. В разделе 4.4 приводятся результаты испытаний ГАРОС, реализованной с использованием ПЛИС Cyclone V. Но это первая 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.

## 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. Автореферат диссертации адекватно отражает ее содержание и отвечает требованиям ВАК. Диссертация Д.В. Хилько обладает внутренним единством, 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 (20.02.14 – Вооружение и военная техника), профессор, Заслуженный изобретатель РФ, профессор кафедры Автоматика и телемеханика Пермского национального исследовательского политехнического университета.



Тюрина Сергея Феофентович

«10» ноября 2023г.

Подпись Тюрина Сергея Феофентовича заверяю:



Макаревич Владимир Иванович

Организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГАОУ ВО «ПНИПУ»)

Сайт организации: <https://pstu.ru/>

Почтовый адрес организации: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29. Телефон: +7 (342) 219-80-67, +7 (342) 212-39-27

E-mail: [rector@pstu.ru](mailto:rector@pstu.ru)

Сайт: <https://pstu.ru/>