

ОТЗЫВ НА АВТОРЕФЕРАТ

диссертационной работы Ляхова Павла Алексеевича «Методы высокопроизводительной цифровой обработки сигналов на основе вычислений в системе остаточных классов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5 - «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»

В последние десятилетия наблюдается экспоненциальный рост объемов многомерных сигналов и повсеместное внедрение ресурсоемких моделей искусственного интеллекта, требующих триллионов операций умножения с накоплением (МАС). С другой стороны, темпы роста производительности традиционных вычислительных систем, базирующихся на позиционных системах счисления (ПСС) и фон-неймановской архитектуре, существенно отстают от этих потребностей, приближаясь к физическим и архитектурным пределам миниатюризации кремниевых. Ключевым ограничением традиционных ПСС является необходимость последовательного распространения переноса между разрядами при выполнении арифметических операций. Это формирует длинный критический путь в логике процессора, что линейно увеличивает задержку вычислений с ростом разрядности данных и приводит к непропорциональному росту динамического энергопотребления. Для систем цифровой обработки сигналов (ЦОС), работающих в режиме жесткого реального времени, таких как интраоперационная медицинская визуализация или бортовые системы беспилотных комплексов, эти ограничения являются критическими. В диссертационной работе П.А. Ляхова решается задача обеспечения требуемого уровня производительности систем ЦОС при сохранении требуемых показателей точности и качества восстановления данных за счет разработки научно обоснованных математических моделей, методов и программного обеспечения параллельной обработки данных на основе системы остаточных классов (СОК). Таким образом, диссертационная работа направлена на решение актуальной научной проблемы — разработка методологического аппарата и технологии высокопроизводительной цифровой обработки сигналов на основе СОК, что имеет важное народно-хозяйственное значение для развития отечественной микроэлектроники, телемедицины, компьютерного зрения и систем искусственного интеллекта.

К несомненным достоинствам работы относится комплексный подход к решению поставленной цели, включающий разработку математических моделей и создание сквозной технологии аппаратно-программного синтеза.

Научная новизна подтверждается разработкой обобщенной модели ЦОС в СОК, обеспечивающей комплексное повышение производительности систем ЦОС; архитектур цифровых фильтров с использованием усеченных МАС-блоков и модулей специального вида 2^k , $2^k - 1$; методов высокоскоростной вейвлет-фильтрации сигналов, обеспечивающего ресурсоэффективную реализацию многоуровневых преобразований, и немодулярной арифметики на основе Китайской теоремы об остатках с дробными величинами (КТОд), что позволило кратно снизить аппаратные затраты; алгоритмов блочной обработки и масштабирования коэффициентов вейвлет-фильтров, адаптированных под модулярную арифметику.

Разработанные методы верифицированы в современных САПР на платформах FPGA и ASIC. Особую ценность представляет адаптация предложенных решений для реализации сверточных нейронных сетей, где автор демонстрирует прирост производительности до 58-66% и снижение аппаратных затрат. Наличие 129 публикаций, 5 патентов на изобретения и 12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ подтверждает высокий уровень и завершенность исследования.

Несмотря на научную и практическую ценность работы, ряд вопросов и аспектов требует дополнительного обсуждения или пояснения:

1. Использование КТОд для немодульных операций значительно ускоряет вычисления. Однако дробные величины требуют усечения. В автореферате упоминается анализ шума квантования, но требуется уточнение: как именно накапливается погрешность усечения дробных величин при многоуровневом обратном вейвлет-преобразовании, и существуют ли формальные гарантии того, что эта погрешность не выйдет за пределы допустимого динамического диапазона на глубоких уровнях декомпозиции?

2. Аппаратные затраты на коммутации в методе Винограда. Блочная обработка данных методом Винограда позволяет заменить операции умножения на сложение. В СОК сложение действительно эффективно, однако метод Винограда существенно увеличивает объем операций пересылки данных и коммутации на кристалле. Учитывалась ли в UGM-модели задержка и энергопотребление, связанные с физическими межсоединениями при реализации матриц преобразования на кристаллах FPGA?

Вышеперечисленные замечания не снижают общей научной значимости работы соискателя ученой степени доктора технических наук.

По объему, научной новизне и значимости результатов, представленная работа удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к

докторским диссертациям, а ее автор, Ляхов Павел Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5 - «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Профессор кафедры «Горная
электромеханика» ФГАОУ ВО
«Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», докт. техн. наук,
доцент

Николаев А.В.

«21» 09 2026 г.

614990, Россия, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический
университет»

Тел.: +7 (342) 2-198-788

E-mail: avnikolaev@pstu.ru

Я, Николаев Александр Викторович, даю согласие на включение моих
персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного
совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Николаева А.В.
заверяю.

Макаревич В.И., Ученый
секретарь Ученого совета
ПНИПУ, канд. ист. наук,
доцент