

УДК 004.2; 004.3; 681.5

Н.В. НЕСТЕРЕНКО*, В.В. ЕРЕСЬКО*, Ю.С. ЯКОВЛЕВ*

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛИС ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

*Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, Киев, Украина

Анотація. Розглядається застосування ПЛИС для створення різного роду контролерів (у тому числі вбудовуваних), інтерфейсів та інших засобів обчислювальної техніки, а також побудова на їх основі розподілених обчислювальних систем, у тому числі спеціального застосування. Наведено найбільш пріоритетні та перспективні напрями використання ПЛИС.

Ключові слова: застосування ПЛИС, розподілені обчислювальні системи на ПЛИС.

Аннотация. Рассматривается применение ПЛИС для создания различного рода контроллеров (в том числе встраиваемых), интерфейсов и других средств вычислительной техники, а также построение на их основе распределенных вычислительных систем, в том числе специального применения. Приведены наиболее приоритетные и перспективные направления использования ПЛИС для этих целей.

Ключевые слова: применение ПЛИС, распределенные вычислительные системы на ПЛИС.

Abstract. The practical applications of FPGA to create different kinds of controllers (including embedded), interfaces and other computing equipment are considered in this paper. Development of FPGA-based distributed computing systems (including special applications) is described as well. The highest priority and perspective areas of FPGAs using for these purposes are given in this article.

Keywords: application of FPGA, FPGA-based distributed computing systems.

1. Введение

В различных устройствах и системах сегодня широко используются ПЛИС как для решения «нетрадиционных» для универсальных процессоров задач (например, задач, связанных с цифровой обработкой сигналов и данных) путем реализации «жесткой логики» и ряда других применений, так и для реализации функционирования устройств и систем в динамично обновляющихся условиях технологических и пользовательских требований, например, для портативных устройств массового производства (гаджетов).

При этом, учитывая, что требования к последнему типу систем и устройств изменяются достаточно быстро, это повышает риски для разработчиков специализированных микросхем. И даже несмотря на то, что использование в таких устройствах специализированных и заказных СБИС оказывается более выгодным (по разным причинам: выше быстродействие, дешевле компоненты и т.д.), велика вероятность, что специализированные микросхемы для решения отдельных задач могут вообще не появиться на рынке из-за риска получить морально устаревшее изделие.

Одним из важных факторов использования ПЛИС является также наличие специальных требований к системе, в первую очередь, таких, как реконфигурируемость и быстрая адаптация к требованиям заказчика. В частности, обеспечение возможности гибкой реакции на изменяющиеся требования заказчика и выявляемые в процессе разработки особенности объектов, подлежащих анализу и управлению, например, в системах промышленной автоматизации [1]. Поэтому ПЛИС широко используются в качестве альтернативы микроконтроллерам и чипсетам во встраиваемых системах с гибко программируемым набором периферийных устройств, интерфейсов различного типа и др. В ПЛИС также могут

использоваться встраиваемые аппаратные процессоры (например, типа PowerPC, ARM, MIPS и др.), что дает возможность реализовать на базе логических ячеек сопроцессор, выполняющий специфические команды, отсутствующие в базовом ядре, но являющиеся ключевыми для решаемой задачи, а также позволяет реализовывать на кристаллах ПЛИС выполнение интерфейсных и иных функций [2–5].

Также сегодня производителями ПЛИС, либо сторонними разработчиками, наряду с аппаратными компонентами – собственно ПЛИС разрабатываются и предоставляются в распоряжение пользователей так называемые софт-процессоры или IP (Intellectual Properties)-ядра, которые позволяют наиболее просто и эффективно ориентировать ПЛИС на выполнение определенных задач, освобождая разработчиков систем и устройств от трудоемких разработок для этих целей.

Необходимо отметить, что использование в аппаратуре пользователя стандартных микроконтроллеров из-за их «универсализма» не дает возможности создания уникального аппаратного состава системы, и конкурентные преимущества достигаются другими способами: более эффективной программной обработкой, низкой ценой, высоким качеством, удачным дизайном и т.п. В то же время ПЛИС, в отличие от такого подхода, предоставляет возможность реализовать уникальную аппаратную схему, обеспечивая конкурентоспособность продукта на рынке.

2. Применение ПЛИС

Традиционно широкое применение ПЛИС нашли в системах цифровой обработки сигналов (ЦОС), что определяется большим удельным весом ресурсов, пригодных для ЦОС. При этом практически все производители ПЛИС сегодня располагают умножителями в виде аппаратных модулей на кристалле (который полностью аналогичен умножителю в сигнальном процессоре или микроконтроллере). В то же время ПЛИС обладают не только максимальными абсолютными показателями производительности в задачах цифровой обработки, но и лучшим соотношением производительности и цены, чем современные сигнальные процессоры, выполненные по аналогичной технологии. Например, ПЛИС способны параллельно выполнять десятки и даже сотни операций, что представляет проблему для большинства сигнальных процессоров, так как разработчику могут потребоваться несколько отличных операций для различных каналов, в связи с чем сигнальный процессор с большим числом модулей, работающих строго параллельно, может оказаться невостребованным [6]. При этом возможность реконфигурации (репрограммируемости) ПЛИС не ограничивает использование вычислительных ресурсов. Блоки преобразователя ЦОС можно объединять, перегруппировывать между несколькими потоками данных, распределять между разными процессорами и модулями и т.д. В настоящее время здесь также приобретает популярность структура «сигнальный процессор + ПЛИС», в которой ПЛИС выполняет роль мощного параллельного вычислителя, выполняющего основной объем несложных операций, а сигнальный процессор служит аппаратной основой для реализации сложных алгоритмов верхнего уровня – постобработки, управления, мониторинга, интерфейсных функций и т.п.

Говоря об использовании ПЛИС в различных отраслях деятельности и сферах применения, следует отметить, что по данным ведущих производителей ПЛИС в мире – фирм Altera и Xilinx, почти 80% дохода в 2008 году приходилось на телекоммуникации (43% – Altera и 45% – Xilinx соответственно) и промышленную электронику (35% и 30%) (более свежих данных нет), а 15% и 17% – на сложную бытовую технику (в основном Hi-end телевизоры) [7, 8].

Что касается применения ПЛИС для создания компьютерных систем различного назначения, то их доля в общем объеме продаж компаний составила 7% и 8%. Как правило, основными потребителями в этом сегменте являются страны Северной Америки, в то вре-

мя как в Европе основные потребители ПЛИС – производители промышленной электроники.

Рассматривая опыт использования ПЛИС в вычислительных системах, в частности, в распределенных, многопроцессорных и других подобных системах, где ПЛИС нашли наиболее широкое применение, обратимся к использованию ПЛИС в суперкомпьютерах, в том числе для решения графовых задач [9]. Как отмечается в работе [9], сегодня обработка графов является одним из быстро развивающихся направлений, что связано, в первую очередь, с необходимостью решения ряда новых задач: анализа социальных сетей, задач биоинформатики и бизнес-аналитики, реализации семантических баз данных, создания систем обеспечения национальной безопасности и др. При этом считается, что приложения, использующие графовые алгоритмы, потенциально самые «тяжелые» как по объему обрабатываемых данных, так по режиму доступа (плохая пространственно-временная локализация) и т.п.

При реализации графовых суперкомпьютеров все более широко используются ПЛИС. Так, например, компания Convey Computer (производитель ускорителей на ПЛИС) создала систему Convey HC-1ex на базе FPGA с уникальной подсистемой памяти, оптимизированной под нерегулярный доступ. При этом многофункциональная реконфигурируемая система Convey HC-1ex – второе поколение встраиваемых в сокет Intel LGA 775 сопроцессоров на базе FPGA, выпускаемых компанией Convey Computers. На плате Convey HC-1ex две микросхемы FPGA (Xilinx Virtex5 LX110) используются для интерфейса с центральным процессором и декодирования команд, четыре (Virtex6 LX760) – для выполнения пользовательской программы (эти платы также называют Application Engines, AE), остальные восемь (Virtex5 LX155) реализуют контроллеры памяти. Для перепрограммирования пользователю доступны четыре AE, в которые можно загружать либо собственную прошивку, либо одну из предоставляемых производителем, специализированных под различные области приложений (финансовый анализ, биоинформатика, распознавание речи, графовые задачи и др.).

Еще одним примером такой системы является система обеспечения параллельного выполнения программ SWARM, разрабатываемая в рамках программы DARPA UNPC и предназначенная для поддержки времени выполнения в больших гетерогенных вычислительных системах (компания ET International). Система построена на базе многоядерных процессоров и различного рода ускорителей, в том числе на базе ПЛИС.

Среди зарубежных разработок также представляет интерес вычислительный комплекс Novo-G (Флоридский университет, США), один из самых высокопроизводительных суперкомпьютеров с изменяемой конфигурацией в мире [10, 11]. В основу системы Novo-G положены ПЛИС. В отличие от широко распространённых процессоров с «жесткой» архитектурой, конфигурацию ПЛИС можно менять, адаптируя тем самым систему для решения конкретного типа задач. Novo-G насчитывает в общей сложности 192 вентиляльные матрицы Altera Stratix-III E260, каждая из которых содержит 768 умножителей (18×18), 254 тыс. логических элементов, 204 тыс. регистров и имеет 4,25 Гб памяти. Матрицы размещены на 48 платах GiDEL ProcStar-III и управляются 26 четырёхъядерными процессорами Intel Xeon.

Аналогичные работы проводятся и в России. Так, в ОАО «НИЦЭВТ» развернуты исследования (с 2005 г.) по созданию мультитредового графового суперкомпьютера с глобально адресуемой памятью или суперкомпьютера стратегического назначения (СКСН). Результатом работы стало создание макета конвейера команд ядра мультитредового процессора J7 на FPGA, разрабатывается новый макет на FPGA, который будет включать конвейер команд и подсистему памяти. Для отработки схемотехнических решений, принятых при проектировании микроархитектуры J7, было запланировано создание серии макетов на FPGA с поэтапным введением блоков процессора в FPGA.

В настоящее время в рамках программы «СКИФ-ГРИД» разработана платформа для суперкомпьютеров СКИФ ряда 4 – СКИФ-Аврора [12]. Суперкомпьютеры СКИФ-Аврора производит компания «РСК СКИФ», партнерами «РСК СКИФ» являются итальянская фирма Eurotech и компания Intel. В 2009 г. состоялась первая поставка этого суперкомпьютера в Южно-Уральский госуниверситет (ЮУрГУ), в 2011 г. суперкомпьютер «СКИФ-Аврора-ЮУрГУ» занял 87-е место в 37-й редакции рейтинга 500 самых мощных суперкомпьютеров мира и в 2013 г. – 8-е место в 19-й редакции рейтинга самых мощных суперкомпьютеров СНГ [13]. Поскольку в суперкомпьютере использована собственная системная плата, производящаяся в России, то, помимо процессоров Intel Xeon, в системе используются ускорители для спецвычислений на ПЛИС (аналогичное решение имеет место в суперкомпьютерах Cray серий XD). Система находится в стадии развития.

Также среди больших российских проектов с оригинальной архитектурой использования ПЛИС можно выделить разработку «Реконфигурируемая вычислительная система РВС-7» (разработчики – НИИ многопроцессорных вычислительных систем Южного федерального университета) [14–16].

РВС предназначена для решения задач обработки больших массивов (потоков) данных по фиксированному алгоритму в темпе их поступления (в реальном времени). В частности, авторами приводятся следующие примеры потоковых задач, решаемых РВС: радиолокация, гидролокация, молекулярное моделирование, символьная обработка (криптография), кодирование и декодирование телевизионного сигнала ультравысокой четкости, дистанционное зондирование Земли, слежение за космическими объектами, мониторинг компьютерных сетей и др.

Особенностью данной системы является то, что программирование РВС отличается от программирования супер-ЭВМ традиционной архитектуры, поскольку включает организацию не только параллельных процессов и потоков данных, но и программирование структуры вычислительной системы в поле логических ячеек ПЛИС. В рамках реализации системы разработаны платы с вычислительными полями из ПЛИС и вычислительные модули на их основе («Орион-5», «Саиф», «Ригель», «Орфей» и др.).

При этом основным отличием данной разработки от других аналогичных систем, в том числе и в представленных выше, является способ использования ПЛИС. Так, например, в отличие от американских суперкомпьютеров Jaguar-Cray XT5-HE и в MaxWell, в которых ПЛИС используются как дополнение (в том числе как ускоритель) к микропроцессорам, выполняющее трудно- или неэффективно реализуемые на универсальных микропроцессорах фрагменты вычислений, в РВС компоненты ПЛИС используются как основной вычислительный элемент.

Для целей выполнения задач разработан язык структурно-процедурного программирования Argus (низкоуровневый язык – ассемблер), предназначенный для описания процедурной составляющей прикладной параллельной программы РВС. Программа на языке Argus организует потоки данных на уровне команд контроллеров распределенной памяти, обеспечивая их синхронизацию. Разрабатываемый комплекс программного обеспечения системы позволит создавать эффективные прикладные программы для РВС при решении задач различных предметных областей, обеспечивая удобство программирования и сокращая время разработки прикладного решения, что, с учетом высоких показателей удельной производительности, до 10 раз превосходящей кластерные супер-ЭВМ на широком классе задач, позволяет считать РВС перспективным направлением развития высокопроизводительной вычислительной техники и средством создания супер-ЭВМ нового поколения.

Здесь следует отметить, что разработка суперкомпьютеров в России во многом зависит от поставок элементной базы, в частности, мощных микропроцессоров и заказных СБИС, с поставками которых могут возникать (и уже возникают) проблемы. Кроме того,

учитывая высокую вероятность использования в зарубежной элементной базе так называемых «закладок», которые позволяют не только считывать информацию, но и вмешиваться в процессы управления (что неприемлемо для решения, например, военных задач). Использование ПЛИС для собственных разработок является одним из перспективных путей создания мощных вычислительных систем в России, что показывает опыт разработки РВС.

Приведем еще несколько российских разработок в направлении создания мощных вычислительных систем, в которых нашли широкое применение ПЛИС. В частности, в ОАО «НИИ супер-ЭВМ» и «НИИВК им. М.А. Карцева» разработан гетерогенный вычислительный комплекс (ЦВК) на базе 4-процессорного ВК «Эльбрус 90 микро» и спецвычислителя на базе ПЛИС [17]. Спецвычислитель обеспечивает предварительную обработку – формирование пространственно-частотных спектров сигналов и построен на базе принципов параллельной и конвейерной обработки информации со встроенной аппаратной реализацией алгоритмов. При этом предусмотрена модернизация спецвычислителя как на заказные СБИС, так и на ПЛИС нового поколения. Также предусматривается создание системы автоматизированного перевода спецвычислителя и ячеек существующего прототипа в заказные СБИС или в микросхемы ПЛИС нового поколения.

Необходимо отметить, что для самого ВК «Эльбрус-90 микро» также был разработан целый ряд системных и периферийных контроллеров на базе ПЛИС. При этом одним из основных критериев был принцип обеспечения стопроцентной совместимости с аналогами, в качестве которых использовались контроллеры для рабочих станций фирмы Sun – Sparcstation 10/Sparcstation 20 [18]. При этом необходимо отметить, что попытки создания самих универсальных микропроцессоров на базе ПЛИС для ВК «Эльбрус 90 микро» оказались неудачным. В частности, разработчики микропроцессора «Багет-супер-М» попытались переложить его в ПЛИС фирмы Xilinx. Полученные характеристики (тактовая частота – около 40 МГц при эквивалентном числе транзисторов порядка двадцати миллионов на технологии 0,15 микрон) значительно уступали характеристикам, полученным с помощью полузаказного проектирования МП «Багет-Супер М» (150 МГц и около трех миллионов транзисторов на технологии 0,35 микрон). В работе [18] отмечается, что реализация универсальных микропроцессоров на ПЛИС для массового применения оказывается неэффективной.

В Украине также имеется опыт применения ПЛИС в системах, в частности, в системах специального назначения. Так, НПП «Радий» (Украина) разработана ПЛИС-платформа «Радий» [19]. На базе этой платформы на ряде украинских атомных электростанций были установлены информационные и управляющие системы (ИУС), кроме того, платформа используется для создания других АСУ ТП. Платформа построена на базе IBM-рабочих станций и информационно-управляющей логики на базе ПЛИС. При этом платформа выполняет критические для безопасности функции по принципу «жесткой логики» (в структуре ПЛИС для каждого алгоритма определены свои технические средства) без применения ПО.

Среди разработок вычислительных систем для специальных применений можно также отметить разработанную в Научно-исследовательском физико-техническом институте Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (в 2008–2010 гг.) распределенную систему обработки радиосигналов, позволяющую обнаруживать радиосигналы различных типов и определять их параметры [20]. Обработка сигналов в этой системе распределена между ПЛИС и блэйд-серверами Hewlett Packard Proliant BL460c.

Коммуникационные процессоры в системе, ответственные за ранние стадии обработки, такие как фильтрация, выделение частотных каналов, цифровое преобразование частоты, вынесены в ПЛИС. После обработки в ПЛИС сигнально-информационные потоки

упаковываются в RTP-пакеты и передаются подсистеме маршрутизации, основной задачей которой является передача сигнальных потоков блокам обработки с учетом планирования использования ресурсов.

Всего в системе задействовано 4 блока обработки на базе ПЛИС и 16 – на базе процессоров общего назначения Intel Xeon. Масштабируемость системы достигается посредством наращивания количества приемных блоков и блоков предобработки, увеличения количества блэйд-серверов.

Еще одной разработкой для специальных применений является разработанный ЗАО НТЦ «Реагент» и Институтом проблем механики РАН прототип распределенной бортовой вычислительной системы (БВС) для управления космическим аппаратом и комплексом научной аппаратуры, устойчивой к отдельным сбоям, предназначенной для космического аппарата или авиационного носителя с комплексом дистанционного гиперспектрального мониторинга Земли [21]. Вычислительный модуль имеет два вычислительных ядра: DSP Texas Instruments и ПЛИС XILINX, что позволяет создавать аппаратную платформу, независимую от типа задачи, которую будет выполнять модуль. В частности, в системе могут присутствовать несколько однотипных модулей, применяемых для решения разных задач, таких как первичная обработка, сжатие гиперспектральных данных, запись данных на магнитный носитель, взаимодействие с модулем цифрового съема видеоданных, взаимодействие с модулем сопряжения фотоприемных устройств и др. В основу концепции модуля заложен так называемый принцип масштабируемости, в соответствии с которым плата может работать как в режиме вычислителя, так и в режиме коммутатора.

Как уже отмечалось, весьма обширным рынком для применения ПЛИС является рынок встраиваемых систем, автоматизированных систем управления технологическими процессами и т.п. В частности, на этот процесс влияет, например, внедрение новых технологических стандартов и технологий, что приводит к существенным трудностям, связанным с модернизацией подобных систем. Так, например, в настоящее время выводится из эксплуатации шина PCI, являющаяся ранее стандартом для более ранних процессоров. Это представляет серьезную проблему для всей отрасли промышленной электроники, так как в современных поколениях процессоров обеспечивается поддержка только PCI Express. При всех преимуществах новых приложений от внедрения новых технологий «прямой перевод» систем (управления технологическими процессами в первую очередь), установленных за последние 20 лет и построенных на базе шины PCI (с производительностью на уровне МП 32-бит/66-МГц), на интерфейсы следующего поколения – PCI Express или Gigabit Ethernet – представляется нереальным [1]. В этом случае FPGA обеспечивает оптимальное решение, позволяя разработчикам реализовать нужный интерфейс для требуемой системы ввода/вывода, не занимая вычислительных ресурсов и сведя к минимуму модернизационные, в том числе конструктивные, изменения в системах. Компанией Kontron, например, предлагаются эффективные решения с использованием ПЛИС, в частности, встраиваемые компьютеры на базе процессора x86-архитектуры с ПЛИС, которые позволяют разработчикам программировать требуемые интерфейсы и функции. Единая аппаратная платформа позволяет сократить количество компонентов системы, в первую очередь, за счет исключения чипсетов. Кроме того, уменьшаются текущие эксплуатационные издержки, так как разработчики могут переконфигурировать FPGA на той же самой аппаратной платформе, меняя только IP-ядра в соответствии с требованиями различных протоколов, разрабатывая новые приложения и избегая полной переработки конфигурации системы, в том числе и на уровне конструктивов.

3. Перспективы развития ПЛИС и их применения

Если рассматривать перспективы и тенденции в части использования ПЛИС как компонентной базы для будущих применений, в частности, в вычислительных системах, то здесь

можно выделить два основных направления как в части использования ПЛИС в вычислительных системах, так и в части развития архитектуры и функциональных возможностей самих ПЛИС.

Так, в работе [22] прогнозируется, что в предстоящие 5–10 лет будут созданы суперкомпьютеры экзафлопсной производительности и начнется развертывание работ по созданию суперкомпьютеров зетта- и йотта-масштаба.

При этом выделяются два направления развития суперкомпьютеров: эволюционное и инновационное. При эволюционном развитии будет происходить постепенное улучшение существующих суперкомпьютеров на так называемых легких и тяжелых суперскалярных процессорных ядрах. Причем улучшение вторых более доступно и популярно и основывается на применении графических и др. сопроцессоров (например, типа Xeon Phi) и ускорителей на ПЛИС, что позволит достаточно быстро создать суперкомпьютеры пусть и с нерегулярной, но хотя бы с пиковой экзафлопсной производительностью на узком круге задач.

В то же время инновационный путь развития – это поиск новых решений и технологий для создания эффективных и отказоустойчивых суперкомпьютеров с реальной экзафлопсной производительностью на широком круге задач.

В работе [22] отмечается, что в 2011 году в России была опубликована концепция федеральной программы «Развитие технологии высокопроизводительных вычислений на базе супер-ЭВМ экзафлопсного класса (2012–2020 гг.)», в рамках которой одним из проектов, реализуемых в РАН, является создание моделирующей гетерогенной вычислительной системы (МГВС) для использования в рамках работ по созданию в России суперкомпьютеров со сверхвысоким уровнем распараллеливания с производительностью на уровне 10^{18} FLOPS. Проект МГВС открыт для участия сторонних организаций, и на сегодняшний день в нем задействованы ИПМ РАН, ФГУП «НИИ «Квант»», Центр инженерной физики МГУ, СПбГПУ. В настоящее время начаты инициативные проекты, ориентированные на использование установки МГВС, в том числе создание гетерогенного суперкомпьютера в облаке суперскалярных ядер, ускорителей на спецпроцессорах и ПЛИС и др.

В этом плане, как отмечается в [23], сегодня одним из важнейших направлений в области исследований и разработок российских НИР и ОКР на ближайшую перспективу (до 6 лет) должна стать перспективная архитектура вычислительных узлов: перспективные процессоры, ускорители вычислений, в том числе и на базе ПЛИС, и др.

Интересен, как уже отмечалось выше, и опыт разработки PVS [14, 15], в первую очередь способом использования ПЛИС, которые используются не как дополнение к процессорам, а как основной вычислительный элемент. Хотя о перспективности нового российского подхода к созданию таких вычислительных систем можно будет судить по результатам дальнейшего развития системы. При этом следует помнить и о перспективах самих ПЛИС, по крайней мере тех из них, которые могут быть ориентированы на создание сложных вычислительных устройств и реализацию тех или иных вычислительных алгоритмов, и не только в части влияния для архитектурно-структурного развития PVS, но и для всей отрасли.

Представляются достаточно интересными новые разработки компании Intel. В конце прошлого года компания объявила, что расширяет деятельность по созданию специализированных процессоров для Интернет-сферы (eBay, Facebook и др.), позволяющих поднимать быстродействие Интернет-сервисов, в частности, облачных вычислений [24]. При этом такой спецпроцессор представляет собой комбинированный чип, содержащий в одном корпусе серверный процессор Xeon и ПЛИС, на которой исполняются алгоритмы, разработанные специально для нужд конкретного заказчика. И хотя такой подход к объединению процессора с ПЛИС уже известен, его новизна заключается как в детерминации на определенный класс задач (в нашем случае вычислительный), так и в новом уровне тех-

нологий. По оценке Intel, при выполнении определенных приложений матрицы ПЛИС позволяют увеличить быстродействие на порядок по сравнению с обычными Xeon. В 2015 г. в Intel планируют создать уже больше 30 уникальных конструкций чипов.

Особенностью таких чипов является то, что, в отличие от применяющихся сегодня ПЛИС (как ускорителей) как дискретных компонентов на системной плате, соединенных с процессором по шине PCIe, размещение ПЛИС в одном корпусе с процессором, с которым матрица связана интерфейсом Intel QIP, позволит получить ПЛИС доступ к встроенному кэшу Xeon и его основной памяти. В результате производительность, обеспечиваемая ПЛИС, удваивается по сравнению с использованием ПЛИС как отдельного компонента.

Такого типа комбинированные устройства-чипы будут эффективны для Интернет-приложений, где имеется относительно небольшой набор приложений, обслуживающий большое число пользователей (например, единственная рабочая задача может выполняться на десятках тысяч серверов), что определяет выгоду оптимизации процессора только для определенного приложения. При этом сервис-провайдер, приобретая серверы на двухчиповой сборке, программирует матрицу в зависимости от рабочей задачи, которую нужно оптимизировать.

Аналогичный шаг предприняла и компания Microsoft, которая в 2014 г. завершила тестирование серверов с чипами ПЛИС Altera, настроенных для обслуживания сервиса Bing (поисковая система, разработанная Microsoft, в настоящее время сайт Bing занимает 2-е место в списке самых популярных поисковых сайтов по объему трафика) [25]. В пилотной программе было задействовано более 1,6 тыс. серверов с ПЛИС. После успешного завершения программы в Microsoft было принято решение в начале 2015 г. оснастить такими серверами действующие дата-центры Microsoft. Первоначально эти серверы будут обслуживать Bing, а затем предполагается обслуживать и другие службы Microsoft. Правда, в отличие от вышерассмотренного этот проект основан на использовании сервера (с процессором Xeon) и платы с ПЛИС. При этом платы с чипом FPGA во всех серверах были объединены в «машинную поисковую сеть» Catapult, которая обрабатывала запросы с сайта Bing, перехватывая эту функцию у центральных процессоров.

В то же время, говоря о перспективах использования ПЛИС в вычислительных системах, следует отметить, что значительное влияние на последние окажет технологическое развитие самих ПЛИС, связанное, прежде всего, с переходом на 14-, 16-, 20-нанометровые технологии, значительно и кумулятивно улучшающие характеристики ПЛИС, и, как следствие, вычислительных систем с их использованием [25–30]. При этом следует отметить, что технологический переход на новые технологические нормы производства ПЛИС происходит вкупе с архитектурно-структурным развитием ПЛИС. Так, ведущие производители ПЛИС в 2013 году вывели на рынок новые поколения своих ПЛИС [31–33], открывающие новые возможности в развитии вычислительных систем. В частности, ПЛИС нового поколения уже использованы в российской системе РВС-7 [15].

При этом, как отмечается в работе [5], сегодня наблюдается процесс так называемой «кремниевой сходимости». Если предыдущие поколения полупроводниковых устройств имели небольшую степень, и МП (микропроцессоры), спецвычислители, сложные интерфейсные контроллеры и микросхемы программируемой логики представляли собой отдельные микросхемы, то уже на полупроводниках, выполненных по технологии 90 нм, стало возможным создавать системы на кристалле (System on Chip – SoC), интегрировавшие в своем составе перечисленные элементы, за исключением программируемой логики (ПЛИС). При этом основная масса решений для реализации таких систем осуществлялась разработчиками SoC, а не разработчиками конкретных электронных устройств. Последним оставался только выбор оптимальных SoC для своих проектов, осуществляя оптимизацию за счет создания уникального ПО и подключения к SoC внешних ПЛИС, необходимых для реализации уникальных функций.

В настоящее время, считают в Altera, ситуация в очередной раз изменилась (разработчикам современных микросхем стало доступно огромное количество транзисторов) и произошло то, что специалисты Altera называют «кремниевой сходимостью».

С одной стороны, к мощным микроконтроллерам добавились специализированные аппаратные блоки, и зачастую современные микроконтроллеры напоминают заказные системы на кристалле (ASIC SoCs). С другой стороны, современные заказные и специализированные микросхемы (Application-Specific Integrated Circuit (ASIC) и Application-Specific Standard Product (ASSP)), как правило, содержат 32-разрядные процессорные ядра и выглядят как самые современные микроконтроллеры. Современные семейства ПЛИС такие, например, как SoC FPGA фирмы Altera, содержат, кроме массива программируемой логики, несколько аппаратных процессорных ядер и специализированные аппаратные блоки, что позволяет разработчикам системы реализовывать задачи программно, аппаратно или с использованием ПЛИС. Иначе говоря, оптимальным способом в каждом конкретном случае.

И ввиду того, что стоимость разработки ASIC существенно возрастает с переходом на новые проектные нормы, остается все меньше приложений, где их применение будет выгодно. В то же время за счет «кремниевой сходимости» микроконтроллеры, микросхемы ASSP и ПЛИС становятся все более и более похожими друг на друга. Однако при этом только СБИС программируемой логики (СБИС ПЛ) имеют массив программируемой логики для аппаратной реализации блоков и устройств, которые будут уникальными для разрабатываемой системы.

Altera прогнозирует [5], что в течение следующих нескольких лет «кремниевая сходимость» будет определять способы реализации систем. В одном случае самые современные микроконтроллеры и ASSP станут типовой аппаратной основой для различных систем, функционирование которых будет определяться различным ПО. В другом случае, благодаря использованию СБИС ПЛ, создаваемые системы будут отличаться на аппаратном уровне. Это расхождение путей реализации систем ускорится за счет развития двух новых технологий: 3D-сборок и гетерогенных систем программирования. Технология 3D-сборок позволяет объединить кристаллы, сделанные по различным технологиям, например, СБИС ПЛИС, МП, динамическую память и радиочастотную схему, в одном стеке.

Вторым важным фактором развития ПЛИС как элементной базы для вычислительных систем может стать выход на рынок производителей ПЛИС лидера индустрии производства чипов различного назначения – компании Intel. Как известно, в 2013 году компания подписала соглашение, согласно которому стала производить кристаллы ПЛИС для Altera. Если говорить о результатах такого сотрудничества, то следует, например, отметить появление уже в 2014 году тестовых кристаллов ПЛИС на базе 14-нм технологического процесса Tri-Gate от Intel. Новая технология позволяет обеспечивать улучшение таких показателей ПЛИС, как производительность, потребление, плотность энергии и стоимость. Так, например, ПЛИС, построенные на основе 14-нм процесса Tri-Gate Intel и предназначенные для высокопроизводительных систем с наиболее жесткими требованиями к расходу энергии, позволяют сократить энергопотребление до 70% [29, 30].

Однако, по-видимому, оставаться лишь простым производителем кристаллов для сторонних компаний Intel не посчитала нужным, и в конце марта 2015 г., по данным Wall Street Journal, стало известно, что Intel ведет переговоры о поглощении Altera [34]. В любом случае, если данная сделка состоится, появление на рынке ПЛИС такого гиганта, обладающего широким интеллектуальным потенциалом и опытом, может внести серьезные коррективы в отрасли производства ПЛИС как в архитектурном, так и в технологическом плане.

4. Выводы

Отметим, что вопросы построения самих ПЛИС не являются темой данной статьи. Однако технологическое и архитектурно-структурное развитие ПЛИС оказывает значительное влияние как на уже традиционные сферы применения, так и на их использование в различных перспективных вычислительных системах. При этом, в отличие от процессоров с «жесткой» архитектурой, конфигурацию таких блоков на ПЛИС можно менять, быстро адаптируя систему для решения новых типов задач, в том числе краткосрочных, поддерживая тем не менее уникальность самой системы и защищенность ее как от незаконного копирования, так в большинстве случаев и от постороннего влияния или проникновения. Особенно касается это, например, авиакосмической и военной сфер применения, защиты информации, критических по безопасности систем АСУ ТП, специализированных систем для Интернет-применений (Интернет-сервисов, облачных вычислений), различных систем информационной поддержки (СИП) принятия решений в реальном времени и др. ПЛИС в каждом конкретном случае могут быть ориентированы как на создание сложных реконфигурируемых вычислительных устройств и систем в целом, так и на реализацию аппаратурной поддержки конкретных вычислительных алгоритмов в составе различных систем и устройств.

Таким образом, наиболее перспективными на ближайшее время сферами применения ПЛИС и направлениями их развития являются:

- системы цифровой обработки сигналов (ЦОС), что определяется оптимальными для ЦОС ресурсами, наличием в виде аппаратных модулей умножителей на кристалле;
- системы параллельной обработки данных (в том числе и ЦОС), различного рода мощные параллельные вычислители, в которых применяется структура «процессор (сигнальный процессор) + ПЛИС», где ПЛИС выполняет основной объем несложных операций, а процессор служит аппаратной основой для реализации сложных алгоритмов верхнего уровня – постобработки, управления, мониторинга, интерфейсных функций и др.;
- информационные и управляющие системы (ИУС) для создания на предприятиях АСУ ТП с выполнением критичных по надежности и безопасности функций;
- системы информационной поддержки принятия решений (в том числе в реальном времени) пользователями различной квалификации для различных сфер промышленности, науки, управления;
- распределенные бортовые вычислительные системы (БВС) для управления космическими аппаратами с комплексом научной аппаратуры, устойчивые к отдельным сбоям, предназначенные для космических аппаратов или авиационных носителей, например, с комплексом дистанционного гиперспектрального мониторинга Земли;
- традиционные направления использования ПЛИС в различных отраслях и сферах применения: телекоммуникации, промышленная электроника, сложная бытовая техника; различные встраиваемые системы; вычислительные узлы с перспективной архитектурой: процессоры, ускорители вычислений на базе ПЛИС и др.;
- комбинированные системы или устройства-чипы для повышения эффективности Интернет-сферы (Интернет-сервисов, облачных вычислений, eBay, Facebook и др.), где выполняется относительно небольшой набор приложений, обслуживающих большое число пользователей;
- эффективные и отказоустойчивые суперкомпьютеры с высокой производительностью на широком круге задач, сверхвысоким уровнем распараллеливания; перспективные суперкомпьютеры (в том числе графовые суперкомпьютеры) с новыми архитектурно-структурными подходами к организации вычислительного процесса, к их построению с использованием ПЛИС;
- реконфигурируемые вычислительные системы для решения задач обработки больших массивов (поток) данных по фиксированному алгоритму в темпе их поступления

ния (в реальном времени), например, для радиолокации, гидролокации, молекулярного моделирования, символьной обработки (криптографии), кодирования и декодирования телевизионных сигналов ультравысокой четкости, дистанционного зондирования Земли, слежения за космическими объектами, мониторинга компьютерных сетей и др.

В целом, что касается создания различных вычислительных средств, универсальных и специализированных вычислительных систем, то использование ПЛИС высокой степени интеграции в качестве аппаратной платформы, например, суперкомпьютеров, имеет большое преимущество и перспективы в части достижения высоких показателей производительности, что уже показывает опыт их применения как в качестве специальных сопроцессоров (ускорителей), так и в качестве основных реконфигурируемых вычислителей. В то же время достаточно широкое поле для использования ПЛИС открывается и на рынке модернизации уже существующих компьютеров для промышленных применений, в частности, систем технологической автоматизации. И, наконец, ПЛИС, которые в последние годы все более активно используются для обслуживания Интернет-сервисов, позволяют за счет их применения существенно повысить эффективность данного вида услуг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван Де Граф К. x86-процессор + FPGA: перспективы нового подхода [Электронный ресурс] / К. Ван Де Граф // Электронные компоненты. – 2011. – № 7. – Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/31584/doc/56684/>.
2. Реутов А. Тенденции рынка ПЛИС (FPGA) и новинки модульных компонентов на базе программируемой логики [Электронный ресурс] / А. Реутов // Современная электроника. – 2007. – № 5. – Режим доступа: <http://www.soel.ru/cms/f/%3F/355446.pdf>.
3. Тарасов И. Системы на кристалле на базе ПЛИС Xilinx со встроенными процессорами PowerPC. Ч. 1 [Электронный ресурс] / И. Тарасов // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. – Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2005_7_62.php.
4. Балю К. Altera. ПЛИС объединяются с ЦПУ – наступает эра СнК ПЛИС [Электронный ресурс] / К. Балю (Chris Balough). – Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2189/doc/60446/>.
5. Биран Д. «Кремниевая сходимость» и будущее проектирования электронных систем (август 2012) [Электронный ресурс] / Д. Биран (Danny Biran), Вице-президент корпорации Altera // Компоненты и технологии. – 2012. – № 8. – Режим доступа: <http://www.altera.ru/articles-reviews.html>.
6. Тарасов И. ПЛИС Xilinx как аппаратная база встраиваемых систем [Электронный ресурс] / И. Тарасов // Время электроники. – 2009. – №1. – Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/31584/doc/40444/>.
7. Тишлер М. Россия – очень важный рынок для компании Altera [Электронный ресурс] / М. Тишлер. – Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/market/2009_09_6.php.
8. ПЛИС Xilinx: сегодня и завтра [Электронный ресурс] // Электронные компоненты. – 2008. – № 1. – Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/521/doc/43915/>.
9. Суперкомпьютеры для графовых задач [Электронный ресурс] / А. Семенов, А. Фролов, Анатолий Никитин [и др.] // Открытые системы. – 2011. – № 7. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2011/07/13010498/>.
10. В США создан самый мощный в мире суперкомпьютер с изменяемой конфигурацией [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hard.compuenta.ru/594091/>.
11. UF leads world in reconfigurable supercomputing [Электронный ресурс]. – Published: February 15 2011. – Режим доступа: <http://news.ufl.edu/archive/2011/02/uf-leads-world-in-reconfigurable-supercomputing.html>.
12. Абрамов С.М. Суперкомпьютеры «СКИФ» ряда 4 [Электронный ресурс] / С.М. Абрамов, В.Ф. Заднепровский, Е.П. Лилитко // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2012. – № 1. – Режим доступа: http://www.isa.ru/jitcs/images/documents/2012-01/3_16.pdf.
13. Научно-образовательные центры ЮУрГУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.susu.ac.ru/ru/about/history/4/centers>.

14. Каляев И.А. Реконфигурируемые вычислительные системы на основе полей ПЛИС [Электронный ресурс] / И.А. Каляев, И.И. Левин. – Новосибирск: НИИ многопроцессорных вычислительных систем Южного федерального университета, 12.10.2011. – Режим доступа: http://conf.nsc.ru/files/conferences/Lyap-100/presentation/72200/89064/Каляев_през.pdf.
15. Высокпроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС Virtex-6 и Virtex-7 [Электронный ресурс] / А.И. Дордопуло, И.А. Каляев, И.И. Левин [и др.]. – Режим доступа: <http://pavt.susu.ru/2012/short/068.pdf>.
16. Шейкин М. Российские суперкомпьютеры. Три года прогресса [Электронный ресурс] / М. Шейкин // Электроника НТБ. – 2013. – Вып. 1. – Режим доступа: <http://www.electronics.ru/journal/article/3554>.
17. Маликов С.Н. Гетерогенные вычислительные системы цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс] / С.Н. Маликов, В.Л. Сафонов, С.М. Чудинов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. – 2012. – Т. 22, Вып. 7–1. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/geterogennye-vychislitelnye-sistemy-tsifrovoy-obrabotki-signalov>.
18. Фельдман В.М. Микропроцессорные вычислительные комплексы отечественной разработки [Электронный ресурс] / В.М. Фельдман. – Режим доступа: http://ict.informika.ru/ft/002134/sb5_page3_15.pdf.
19. ПЛИС-платформа в критических приложениях: гарантоспособные масштабируемые решения для информационных и управляющих систем АЭС / Е.С. Бахмач, А.А. Сиора, В.В. Складар [и др.] // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 6. – С. 12 – 19.
20. Сорохтин Е.М. Распределенные программно-определяемые радиосистемы [Электронный ресурс] / Е.М. Сорохтин, С.А. Минеев. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2010. – Режим доступа: [http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99999999_West_2010_5\(2\)/65.pdf](http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99999999_West_2010_5(2)/65.pdf).
21. Бортовая распределенная вычислительная система для обработки гиперспектральных данных [Электронный ресурс] / А.А. Белов, А.П. Калинин, А.Г. Орлов [и др.]. – ЗАО НТЦ «Реагент», Институт проблем механики РАН. – Режим доступа: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/1/30.pdf
22. Горбунов В. Экзафлопсные суперкомпьютеры: достижения и перспективы [Электронный ресурс] / В. Горбунов, Г. Елизаров, Л. Эйсымонт // Открытые системы. – 2013. – № 7. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2013/07/13037342/>.
23. Абрамов С.М. Состояние и перспективы развития вычислительных систем сверхвысокой производительности [Электронный ресурс] / С.М. Абрамов, Е.П. Лилитко // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2013. – № 2. – Режим доступа: http://www.isa.ru/jitcs/images/documents/2013-02/6_22.pdf.
24. Intel расширяет проектирование «облачных» чипов на заказ [Электронный ресурс] // Открытые системы. – 2014. – № 8. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/news/articles/2014/31/13042340/>.
25. Microsoft оснащает свои сервера процессорами собственной разработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tv.net.ua/news/itnews/1050750850-microsoft-osnaschaet-svoi-servera-processorami-sobstvennoy-razrabotki.html>.
26. Компания Xilinx сообщила о выпуске первой в мире ПЛИС, выполненной с соблюдением 20-нм норм технологического процесса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kit-e.ru/news/Xilinx_22_11_13.php.
27. Altera Ships 20 nm SoCs. Altera's 2nd Generation Arria 10 SoC is Industry's Only 20 nm SoC FPGA [Электронный ресурс]. – 2015. – February 24. – Режим доступа: <http://newsroom.altera.com/press-releases/nr-a10soc-ship.htm>.
28. Степин А. Xilinx опубликовала планы по 16-нанометровым ПЛИС и процессорам [Электронный ресурс] / А. Степин. – Режим доступа: <http://www.3dnews.ru/909995>.
29. Новые ПЛИС Altera на базе 14-нм техпроцесса Tri-Gate от Intel. Тестовые 14-нм ПЛИС подтвердили все преимущества новейшей технологии производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elcomdesign.ru/news/news_3148.html?rub=11&f=1.
30. Беспрецедентное увеличение производительности в результате использования новой архитектуры HyperFlex и 14 нм трехзатворного (Tri-Gate) технологического процесса от компании Intel [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://catalog.gaw.ru/index.php?page=document&id=46422>.

31. Тарасов И. ПЛИС Xilinx серии 7 [Электронный ресурс] / И. Тарасов // Современная электроника. – 2013. – № 3. – Режим доступа: <http://www.soel.ru/cms/f/?/447909.pdf>.
32. ПЛИС FPGA фирмы Xilinx [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://promelchuvsu.ucoz.net/FPGA/plis5.ppt>.
33. Компания Altera Corporation анонсировала новое 10-е поколение своих ПЛИС FPGA и Система-на-Кристалле (SoC), позволяющих системным разработчикам выйти на качественно новый уровень производительности и энергоэффективности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://catalog.gaw.ru/index.php?page=document&id=45013>.
34. Intel намеревается проглотить Altera [Электронный ресурс] // Время электроники. – 2015. – 30 марта. – Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/news/snabworldmarket/doc/72213/>.

Стаття надійшла до редакції 21.04.2015