

УДК 004.382.2

*А.И. Дордопуло<sup>1</sup>, Ю.И. Доронченко<sup>2</sup>, И.А. Каляев<sup>3</sup>, И.И. Левин<sup>2</sup>,  
Семерников Е.А.<sup>1</sup>, Раскладкин М.К.<sup>2</sup>*

## **РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПЕТАФЛОПСНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ**

### **СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛИС\***

Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону,  
Россия<sup>1</sup>

ООО «Научно-исследовательский центр СуперЭВМ и  
нейрокомпьютеров», г. Таганрог, Россия<sup>2</sup>

НИИ многопроцессорных вычислительных систем имени академика  
А.В. Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог, Россия<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*scorpio@mvs.tsure.ru*, <sup>2</sup>*doronchenko@superevm.ru*,

<sup>3</sup>*kaliaev@mvs.tsure.ru*, <sup>2</sup>*levin@superevm.ru*, <sup>1</sup>*semernikov@mvs.tsure.ru*,  
<sup>2</sup>*raskladkin@superevm.ru*

## **1. Введение**

Растет число отечественных [1] и зарубежных производителей суперкомпьютеров, всё больше обращающих своё внимание на программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и использующих их для построения высокопроизводительных вычислительных систем, предназначенных для решения задач различных предметных областей. Например, компания Microsoft в последние годы успешно использует гибридные системы на базе серверов, оснащённых центральным процессором Intel Xeon и платой с кристаллом ПЛИС. Система получила название Catapult [2] и позволила сократить в среднем вдвое время обработки поисковых запросов в поисковой системе Bing.

Помимо компании Microsoft, большой интерес в использовании ПЛИС для ускорения работы микропроцессоров проявляют многие ведущие мировые производители суперкомпьютеров. Такие фирмы как Nallatech [3] и Pico Computing [4] выпускают ряд ускорителей и несущих плат с небольшим числом (до четырёх) кристаллов ПЛИС, которые используются в создании серверов и гибридных кластерных систем фирмами HP и IBM. Компании Convey [5], Maxeler Technologies [6] и

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по Соглашению о предоставлении субсидии №14.578.21.0006 от 05.06.2014, уникальный идентификатор RFMEFI57814X0006.

SRC [7] создают гибридные суперкомпьютеры на основе собственных гетерогенных кластерных узлов, в состав которых входят кристаллы ПЛИС.

Однако платы с реконфигурируемым вычислительным ресурсом, выпускаемые данными компаниями, используются либо в построении гибридных вычислительных систем, где кристаллы ПЛИС используются в качестве сопроцессора к универсальным микропроцессорам, либо в ускорителях, для решения узкоспециализированных задач цифровой обработки сигналов из таких областей как телекоммуникация, обработка радиосигналов, медицина, радио- и оптической локации и др.

Содружеством специалистов Южного научного центра Российской Академии наук, научно-исследовательского центра суперЭВМ и нейрокомпьютеров (НИЦ СЭ и НК, г. Таганрог) и научно-исследовательского института многопроцессорных вычислительных систем Южного федерального университета разрабатываются и производятся реконфигурируемые вычислительные системы (PBC) класса суперЭВМ[8-12], где основным вычислительным ресурсом являются не микропроцессоры, а множество кристаллов ПЛИС, объединенных в вычислительные поля высокоскоростными каналами передачи данных. PBC такой архитектуры находят применение при решении вычислительно трудоемких задач в различных областях науки и техники, поскольку обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с многопроцессорными вычислительными системами кластерной архитектуры: высокими реальной и удельной производительностями, высокой энергоэффективностью и др.

## **2. PBC на основе ПЛИС Xilinx семейства Virtex-7**

В 2013-2014 гг. в НИЦ СЭ и НК был разработан ряд вычислительных систем на основе вычислительного модуля (BM) «Тайгета» [10] высотой 2U, предназначенного для создания высокопроизводительных PBC. BM «Тайгета» содержит четыре платы 8V7-200, встроенную управляющую ЭВМ, систему питания, систему управления, систему охлаждения и другие подсистемы. Платы в составе BM «Тайгета» соединяются LVDS-каналами, работающими на частотах до 1000 МГц. На плате вычислительного модуля (ПВМ) 8V7-200 располагаются 8 ПЛИС типа XC7VX485T-1FFG1761, содержащих по 48,5 миллионов эквивалентных вентилях, 16 микросхем распределенной памяти SDRAM типа DDR2 общим объемом 2 Гбайт, интерфейсы LVDS и Ethernet и другие компоненты. Производительность одной ПВМ 8V7-200 составляет 667 Гфлопс при обработке 32-разрядных данных с

плавающей запятой, а производительность ВМ «Тайгета» составляет соответственно 2,66 Тфлопс. Производительность одной стойки РВС при комплектации 18 ВМ «Тайгета» составляет 48 Тфлопс при обработке данных с плавающей запятой одинарной точности и 23 Тфлопс при обработке 64-разрядных данных с плавающей запятой.

Высокопроизводительные РВС на основе ВМ «Тайгета» ориентированы на решение вычислительно трудоемких задач науки и промышленности, задач синтеза лекарств и задач символьной обработки.

Также на основе ПЛИС Xilinx семейства Virtex-7 разработан новый реконфигурируемый вычислительный блок (РВБ) «Калеано» [11] в конструктивном исполнении высотой 1U, предназначенный для обработки данных, поступающих по каналу Gigabit Ethernet без поддержки IP-протоколов.

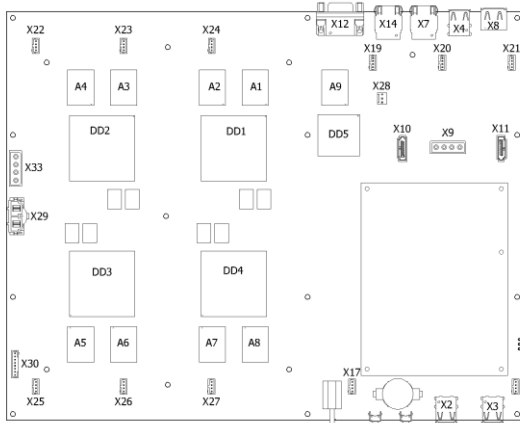
РВБ «Калеано» содержит вычислительное поле из шести ПЛИС, встроенную управляющую ЭВМ, систему питания, систему управления, систему охлаждения и другие подсистемы. Все ПЛИС вычислительного поля соединены между собой по принципу близкодействия с помощью LVDS-каналов, ко всем ПЛИС РВБ подключены модули динамической памяти емкостью 256 Мбайт каждый.

РВБ «Калеано» выпускается в двух модификациях: «Калеано-К» на ПЛИС Kintex-7 XC7K160T и «Калеано-V» на ПЛИС Virtex-7 XC7VX485T. Производительность РВБ «Калеано-К» и «Калеано-V» составляет 150 и 440 Гфлопс соответственно при обработке данных с плавающей запятой одинарной точности. При обработке 64-разрядных данных с плавающей запятой производительность РВБ «Калеано-К» составляет 75 Гфлопс, а «Калеано-V» - 220 Гфлопс.

Возможные области применения: символьная обработка, математическая физика, моделирование и вычислительный эксперимент, цифровая обработка сигналов, линейная алгебра и т.п.

### **3. РВС на основе ПЛИС Xilinx семейства Virtex UltraScale**

В 2015 году специалисты НИЦ СЭ и НК начали разработку новых реконфигурируемых вычислительных систем [12], основой для которых стала перспективная элементная база – ПЛИС Xilinx нового поколения семейства Virtex UltraScale. ПЛИС данного семейства, выполненные по технологии 20 нм, обладают пониженным энергопотреблением и повышенным быстродействием по сравнению с ПЛИС Xilinx Virtex-7. Разрабатываемый РВБ на базе Virtex UltraScale является развитием направления реконфигурируемых компьютеров «Калеано». Эскиз компоновки новой ПВМ показан на рис. 1.



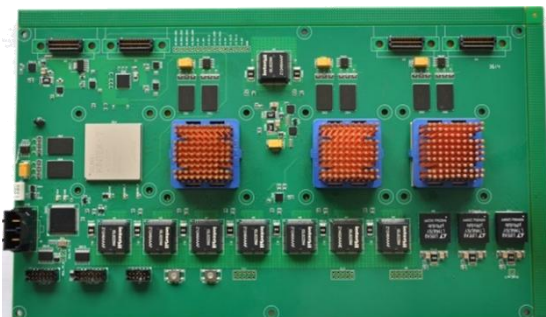
**Рис. 1.** Эскиз компоновки ПБМ «Калеано-U»

На рис. 1 обозначены:

- DD1-DD4 – вычислительные ПЛИС Xilinx UltraScale XCVU095;
- DD5 – ПЛИС контроллера ПБМ Xilinx UltraScale XCKU040;
- A1-A9 – модули распределенной памяти;
- X2-X4, X7-X12 – разъемы различных типов интерфейсов.

По сравнению с предыдущей версией РВБ «Калеано-V» производительность РВБ «Калеано-U» возрастет в 1,7–1,8 раза, при увеличении потребляемой мощности - не более чем в 1,3 раза.

На данный момент был разработан прототип платы вычислительного модуля на основе Virtex UltraScale, содержащего три микросхемы ПЛИС типа XCKU040-FFVA1156, фотография которого представлена на рис. 2



**Рис. 2.** Прототип ПБМ на основе Xilinx Virtex UltraScale

На данном макете были отработаны технологии программирования ПЛИС Virtex UltraScale с помощью новой САПР Vivado Design Suite фирмы Xilinx: апробированы арифметико-логические вычислительные блоки и интерфейсные блоки на частоте 400 МГц, а также передача данных по сверхскоростным каналам LVDS на частоте от 800 до 1200 МГц.

#### **4. PBC на основе жидкостного охлаждения**

Использование воздушных систем охлаждения современных вычислителей и построенных на их основе суперкомпьютеров, в том числе реконфигурируемых, практически достигло своего предела. В современных суперЭВМ на основе новых поколений ПЛИС целесообразно использовать жидкостное охлаждение, в частности, непосредственное погружение плат вычислительных модулей в жидкостный хладагент на основе минерального масла.

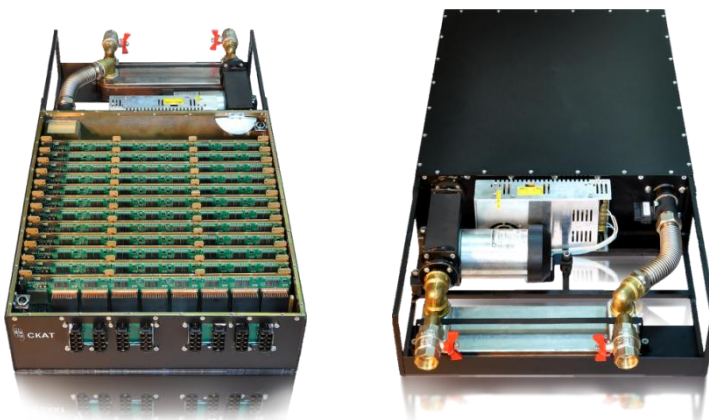
В НИЦ СЭ и НК активно развивается направление по созданию PBC нового поколения на основе жидкостного охлаждения [11-12]. Разработаны новые конструкции печатных плат и вычислительных модулей, характеризующиеся высокой плотностью компоновки. В частности, в настоящее время ведется разработка перспективных вычислительных модулей «Скат-8» для многостоечных PBC сверхвысокой производительности.

Плата перспективного вычислительного модуля спроектирована с учётом размещения восьми ПЛИС семейства Virtex UltraScale логической емкостью 100 млн. эквивалентных вентилях каждая. Вычислительный модуль состоит из двух секций. В первой секции размещается 16 плат вычислительных модулей с потребляемой мощностью до 800 Вт каждая. Платы полностью погружены в электрически нейтральный жидкостный хладагент. Во второй секции располагаются насосная группа и теплообменник, обеспечивающие проток и охлаждение хладагента. Высота конструктива ВМ составляет 3U.

Для проведения исследований PBC на основе жидкостного охлаждения в 2015 году специалистами НИЦ СЭ и НК был разработан технологический образец на основе ПЛИС Xilinx семейства Virtex-7. На рис. 3 представлена фотография ПВМ «Скат-7», содержащего восемь кристаллов ПЛИС типа XC7V585T-1FFG1761. На рис. 4 представлен технологический образец вычислительного модуля с жидкостным охлаждением, содержащего до 12 плат «Скат-7».



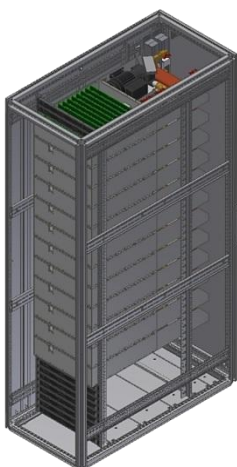
**Рис. 3.** Фотография ПВМ «Скат-7»



**Рис. 4.** Образец ВМ «Скат-7»

На изготовленном технологическом образце вычислительного модуля с жидкостным охлаждением «Скат-7» ведутся экспериментальные исследования по подбору хладагента, формы радиаторов, расположения форсунок и т.д. Результаты проводимых исследований будут использованы в построении ВМ «Скат-8» с жидкостным охлаждением на основе ПЛИС семейства Virtex UltraScale.

Полученные результаты экспериментальных исследований и проведённые теоретические расчёты показали, что разрабатываемый вычислительный модуль «Скат-8» на основе ПЛИС семейства Virtex UltraScale обеспечит построение реконфигурируемых суперкомпьютеров петафлопсной производительности в одном вычислительном шкафу. Вычислительный шкаф 19” суперкомпьютера может содержать до 12 ВМ «Скат-8» с жидкостным охлаждением. Эскиз вычислительной стойки показан на рис. 5. Производительность и потребляемая мощность перспективной РВС приведены в таблице 1.



**Рис. 5.** Эскиз вычислительной стойки на основе ВМ «Скат-8»

Таблица 1 – Производительность и потребляемая мощность перспективной РВС

Характеристика	Значение
Производительность ВМ «Скат-8»	105 Тфлопс
Производительность вычислительной стойки на основе ВМ «Скат-8»	1,25 Пфлопс
Потребляемая мощность ВМ «Скат-8»	13 кВт
Потребляемая мощность вычислительной стойки на основе ВМ «Скат-8»	150 кВт

На основе данных конструкций будут созданы сверхпроизводительные вычислительные комплексы, в которых обеспечивается эффективное охлаждение вычислительных ПЛИС как семейства Virtex UltraScale, выполненных по технологии 20 нм, так и следующего прогнозируемого семейства ПЛИС UltraScale+, которые будут производиться с соблюдением 16 нм технологических норм.

## 5. Заключение

Разрабатываемые специалистами Южного научного центра Российской Академии наук, научно-исследовательского центра суперЭВМ и нейрокомпьютеров и научно-исследовательского института многопроцессорных вычислительных систем Южного федерального

университета вычислительные модули на основе ПЛИС семейства Virtex UltraScale и системы жидкостного охлаждения позволяют сосредоточить в пределах одного вычислительного шкафа высотой 47U мощный вычислительный ресурс и обеспечивают удельную производительность PBC на уровне лучших мировых показателей для суперЭВМ с кластерной архитектурой. Это позволяет рассматривать PBC на основе ПЛИС Xilinx как основу для создания высокопроизводительных вычислительных комплексов сверхпетафлопсной производительности.

## Литература

1. Каляев А.В., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. М.: Янус-К, 2003. 380 с.
2. <http://research.microsoft.com/en-us/projects/catapult/>(дата обращения 07.10.2015)
3. <http://www.nallatech.com/>(дата обращения 07.10.2015)
4. <http://picocomputing.com/>(дата обращения 07.10.2015)
5. <http://www.conveycomputer.com/>(дата обращения 07.10.2015)
6. <http://www.maxeler.com/>(дата обращения 07.10.2015)
7. <http://www.srccomp.com/>(дата обращения 07.10.2015)
8. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Дордопуло А.И. Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС семейства Virtex-6. В сб.: Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ-2011). Труды международной конференции, Челябинск-М.: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. С.203-210.
9. Дордопуло А.И., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы нового поколения. В сб.: Научный сервис в сети Интернет: экза-флопсное будущее. Труды международной суперкомпьютерной конференции. Москва, 2011. С. 42-49
10. Левин И.И., Дордопуло А.И., Каляев И.А., Гудков В.А. Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС VIRTEx-7. Программная инженерия. – М.: Издательство “Новые технологии”, 2014. - № 6. – С. 3-8. ISSN 2220-3397.
11. Левин И. И., Каляев И. А., Семерников Е. А., Доронченко Ю. И. Вычислительные системы с реконфигурируемой архитектурой на основе современных и перспективных ПЛИС // Труды научно-практической конференции третьего Национального



суперкомпьютерного форума (НСКФ-2014). Программные системы: теория и приложения, 2014, ISSN 2079-3316.

12. Левин И.И., Дордопуло А.И., Каляев И.А., Доронченко Ю.И., Раскладкин М.К. Современные высокопроизводительные вычислительные системы с реконфигурируемой архитектурой на основе ПЛИС Xilinx Virtex-7 и Virtex UltraScale //Труды Международной конференции "Суперкомпьютерные дни в России" Москва, 28-29 сентября 2015 г. – М.: Изд-во МГУ, 2015. – С.435-446.