



# Высокопроизводительные вычислительные системы с реконфигурируемой архитектурой, построенной на ПЛИС

Артём Коновальчик

В статье рассмотрены особенности построения высокопроизводительных систем на основе ПЛИС последнего поколения. Подробно раскрыты вопросы организации архитектуры комплекса, позволяющей заметно превосходить отечественные и зарубежные аналоги, а также существенно расширить спектр решаемых задач.

## Введение

Задача построения суперкомпьютеров с каждым днём приобретает всё большую актуальность и становится приоритетной в передовых разработках науки и техники, что вызвано растущим спросом на высокопроизводительные вычисления со стороны коммерческих, государственных и научных организаций.

Ключевой тенденцией в решении важнейших научно-технических задач становится непрерывное увеличение производительности вычислительных комплексов. Производительность однопроцессорных компьютеров практически достигла предела. Возможности дальнейшего роста производительности с помощью уменьшения технологических норм практически исчерпаны. Кроме того, при увеличении плотности размещения транзисторов на кристалле значительно возрастает сложность процессоров, поэтому прирост производительности не пропорционален затрачиваемым аппаратным ресурсам и энергии. Не помогает дальнейшее наращивание объёмов кэш-памяти микропроцессоров, а также числа одновременно выполняемых команд. Заявленные производителями пиковые характеристики процессоров практически недостижимы без низкоуровневого программирования. Большинство трудоёмких вычислительных задач выполняется на массовых микропроцессорах с низкой эффективностью, составляющей не бо-

лее 10–20% [1]. Если десять лет назад компьютерному сообществу казалось, что вычислительная техника может неограниченно развиваться, совершенствуя микропроцессорные схемотехнические и технологические решения, то сейчас ясно, что без кардинальной перестройки архитектуры вычислительной техники сохранить темп роста её производительности невозможно.

Одним из способов повышения производительности вычислительных систем является распараллеливание вычислительных процессов. В то же время реальная производительность многопроцессорных вычислительных систем, которые ориентированы на традиционные методы организации параллельных вычислений и представляют собой механически соединённые традиционные микропроцессоры, зачастую не превышает 10–15% от заявленной пиковой производительности вследствие необходимости реализации множества процедур межпроцессорного обмена, а также синхронизации последовательных процессов, выполняемых в процессорах системы [2]. Основная причина этого – несоответствие между жёсткой архитектурой вычислительной системы (ВС) и информационной структурой решаемых задач, из-за чего существующие суперкомпьютеры и работают столь неэффективно. Данный недостаток позволяет устранить способ построения ВС с гибкой, динамически пе-

рестраиваемой (программируемой) архитектурой [3], подстраиваемой под информационную структуру конкретной задачи. Практическое внедрение данной концепции сдерживалось отсутствием необходимой для её реализации реконфигурируемой элементной базы. В последние годы такая элементная база на рынке появилась – это программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) высокой степени интеграции. На основе ПЛИС возможно без привлечения больших финансовых затрат создавать высокопроизводительные вычислительные системы с программируемой архитектурой, существенно опережающие существующие аналоги по многим ключевым характеристикам.

## ПЛИС – основной элемент суперкомпьютера

По этому пути уже идут ведущие мировые производители. В то же время западные и отечественные производители используют ПЛИС, как правило, только в качестве сопроцессоров к стандартным вычислительным узлам – универсальным микропроцессорам. Концепция же построения ВС с программируемой архитектурой предполагает использовать ПЛИС в качестве базы для создания реконфигурируемых вычислительных систем, адаптируемых к структуре решаемой задачи. В качестве основного вычислительного элемента используют-

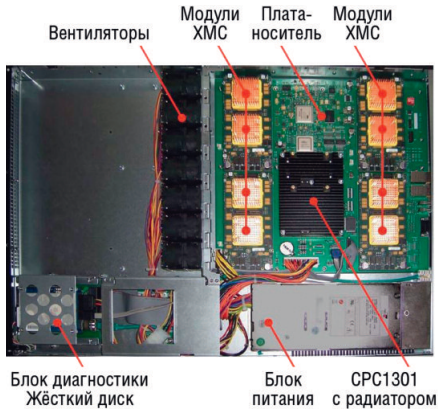


Рис. 1. Общий вид БВР-01

ся вычислительные структуры, созданные в поле логических блоков ПЛИС, в то время как небольшое количество универсальных микропроцессоров выполняют вспомогательные функции: загрузку конфигураций ПЛИС, обмен данными, управление, тестирование, загрузку исходных данных, визуализацию результатов и т.п.

Высокопроизводительные вычислительные системы (ВВС) на основе ПЛИС предназначены для решения задач, требующих обработки сверхбольших информационных массивов и потоков. Современная тенденция к высокой плотности вычислений предъявляет особые требования к архитектуре построения ВВС и акцентирует внимание на достижении максимальной производительности при таких конструктивных ограничениях, как габариты, потребляемая мощность и тепловыделение. Имеющиеся на сегодняшний день вычислители на базе ПЛИС в основном узко ориентированы на решение задач обработки по одному и тому же алгоритму большого количества наборов входных данных и до недавнего времени заметно уступали там, где требовались вычисления, связанные с высокоскоростной передачей данных как между элементами ВВС, так и при взаимодействии ВВС с другими элементами кластера.

В подавляющем большинстве случаев кластеры на основе ПЛИС приме-

няются для решения математических задач (в том числе задач криптографии и обеспечения информационной безопасности), при этом решения по объединению всех вычислительных блоков в единое вычислительное пространство заказчик принимает самостоятельно. Такой вариант вполне допустим для типовых задач. Однако круг задач, реализуемых на кластерах такого рода, значительно шире. Требования, предъявляемые к подобным системам их заказчиками, диктуют необходимость более специфического функционала, организации гораздо более сложного взаимодействия между узлами кластера, имеются существенные требования к пропускной способности каналов передачи данных. Этот список может быть расширен, однако уже на данном этапе становится ясно, что архитектурные и конструктивные требования заказчиков таковы, что элементы ВВС должны обладать значительно улучшенными функциональными характеристиками и давать возможность построения кластеров любых типов, в том числе и в зависимости от решаемой задачи.

В процессе построения любых программных систем решения о функциональных возможностях и структуре отдельных компонентов следует принимать после того, как будет разработана общая архитектура системы. Этот тезис верен в том числе и тогда, когда речь идёт о написании программного продукта для высокопроизводительных кластеров на основе ПЛИС. Наряду с написанием конфигурационных файлов ПЛИС существует необходимость в обеспечении совместного функционирования всех вычислительных модулей кластера, координации и диспетчеризации вычислительного процесса.

### АРХИТЕКТУРА СУПЕРКОМПЬЮТЕРА НА ОСНОВЕ ПЛИС

Современные ПЛИС потенциально обладают широкими возможностями

для применения в качестве основных элементов ВВС [4]. При этом главным препятствием к их использованию остаётся фактическое отсутствие адекватной архитектуры вычислителя (совокупности вычислителей – кластер), позволившей бы наиболее широко применить все потенциальные возможности.

Учитывая широкий класс задач, требующих новых подходов к высокопроизводительным вычислениям, на основе изложенных принципов перед разработчиками компании FASTWEL была поставлена задача создания вычислителя нового поколения БВР-01 (рис. 1). Вычислитель ориентирован на решение задач, требующих интенсивной обработки данных, применения методов линейной алгебры, цифровой обработки сигналов, математической физики, символьной обработки и рассчитан на использование во многих встраиваемых системах, в том числе в системах военного назначения, системах обеспечения информационной безопасности, мобильных системах транспорта. Главные его особенности – возможность гибкого конфигурирования собственной структуры и возможность объединения с другими аналогичными устройствами для создания кластерных структур.

БВР-01 представляет собой законченный блок в виде 19" конструктива высотой 1U с управляющим компьютером (УК) СРС1301 компании FASTWEL, выполненным на базе процессора Intel Core 2 Duo, и с восемью ПЛИС Xilinx Virtex-6, соединёнными между собой современным высокоскоростным интерфейсом PCI Express Gen 2.0. На БВР-01 могут устанавливаться любые ПЛИС из семейства Xilinx Virtex-6: LX240, LX365, LX550, SX315 или SX475 (табл. 1). Модуль памяти EM-DDR3-2GB позволяет использовать память DDR3 ёмкостью 2 Гбайт на ПЛИС.

На задней панели блока расположены разъёмы внешних интерфейсов (рис. 2).

Таблица 1

Основные характеристики современных ПЛИС серии Virtex-6

Название микросхемы	Количество логических элементов	Конфигурируемые логические элементы (CLBs)		Блочная память			Интерфейсы для PCI-E	Mac-адреса для Ethernet	Количество пользовательских вводов/выводов
		Логические элементы	Распределённая память (кбайт)	Количество блоков 18 кбайт	Количество блоков 36 кбайт	Всего, кбайт			
XC6VLX75T	74 496	11 640	1 045	312	156	5 616	1	4	360
XC6VLX240T	241 152	37 680	3 650	832	416	14 976	2	4	720
XC6VLX365T	364 032	56 880	4 130	832	416	14 976	2	4	720
XC6VLX550T	549 888	85 920	6 200	1 264	632	22 752	2	4	1 200
XC6VSX315T	314 880	49 200	5 090	1 408	704	25 344	2	4	720
XC6VSX475T	476 160	74 400	7 640	2 128	1 064	38 304	2	4	840



Рис. 2. Интерфейсные разъёмы на задней панели БВР-01

Электропитание подаётся в БВР-01 через разъём питания, находящийся на задней панели. Подаваемое напряжение преобразуется до требуемого номинала интегрированными в устройство DC/DC-конвертерами собственной разработки. Обеспечивается рабочий ток более 100 А по номиналу 1 В на пару ПЛИС, что допускает использование в БВР-01 самых больших и энергоёмких кристаллов ПЛИС семейства Virtex-6.

Структурная схема БВР-01 приведена на рис. 3.

Для реализации PCI Express в БВР-01 предусмотрен коммутатор PEX8648, с помощью которого каждая из восьми ПЛИС связана друг с другом и с УК, что позволяет передавать данные по шине PCI Express Gen 2.0 с суммарной пропускной способностью на уровне 20 Гбит/с. Внешний порт PCI Express позволяет каскадировать БВР-01 с использованием медных или оптических кабелей.

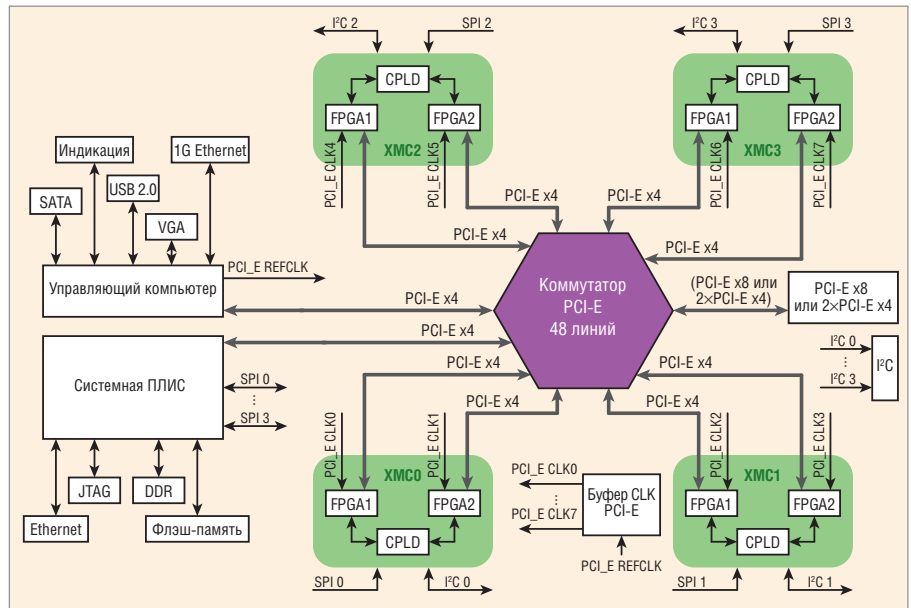
Мониторинг, диагностика, контроль данных о напряжении и температуре кристаллов ПЛИС, управление питанием БВР-01 производится с использованием специально для этого разработанного модуля диагностики (МД), который имеет отдельный сетевой выход Fast Ethernet и реализован с использованием Web-интерфейса.

Габаритные размеры БВР-01 составляют 44×482×650 мм (В×Ш×Г), вес 25 кг.

В целом БВР-01 представляет собой современный, легко масштабируемый вычислитель на базе реконфигурируемых элементов ПЛИС Xilinx Virtex-6 (LX240, LX365, LX550, SX315 или SX475) и с общим энергопотреблением менее 800 Вт.

В основу его разработки положено объединение следующих составляющих:

- вычислительный элемент (ВЭ) — в качестве основного (минимального) ВЭ предлагается модуль ХМС с установленными на нём двумя ПЛИС Xilinx (LX550 или SX475);
- управляющий компьютер — в качестве УК предлагается COM Express-модуль CPC1301;
- плата Extended ATX — плата-носитель с установленными на ней четырьмя ВЭ, УК, коммутатором PCI Express и системной ПЛИС;



Условные обозначения:

CPLD — конфигурационная ПЛИС; ХМС 0...3 — несущие платы;

FPGA1, FPGA2 — программируемые логические интегральные схемы.

Рис. 3. Структурная схема БВР-01

- модуль диагностики — в качестве МД предлагается плата RDM, управляющая диагностируемыми параметрами БВР-01, в том числе напряжением и температурой, и имеющая в своём составе сетевой выход Fast Ethernet.

Блок вычислительный реконфигурируемый (БВР-01) объединяет в себе 4 ВЭ, УК, плату-носитель, МД и является базовым элементом построения кластера. В БВР-01 реализованы такие принципы, как:

- универсальность — возможность выполнения практически любых вычислительно-труднѐмых задач;
- масштабируемость — возможность формировать кластер из любого количества таких блоков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индустрия суперкомпьютеров за последние годы прошла огромный путь и нашла своё место в решении широкого круга задач. В то же время требования к современным вычислительным системам всё возрастают и толкают производителей, с одной стороны, к конструированию узкоспециализированных решений, ориентированных на конкретные классы задач, а с другой — к поиску универсальных и наиболее эффективных решений.

Благодаря использованию уникальных технических и программных решений, а также высокоскоростных интерфейсов передачи данных БВР-01 в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным уни-

версальным высокопроизводительным вычислителям, позволяя создавать на своей основе ПЛИС-суперкомпьютеры, превосходящие по технико-экономическим характеристикам ВВС с другой архитектурой в сегменте рынка суперЭВМ и предоставляя все основания для применения во встраиваемых системах военного назначения, требующих высокоскоростной обработки сверхбольших объѐмов информации. Этот вывод подтверждается успешными результатами первых внедрений представленного в статье изделия. ●

## ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Д. Реальность и фантазии // Открытые системы. — 2006. — № 5.
2. Аладышев О.С., Дикарев Н.И., Овсянников А.П., Телегин П.Н., Шабанов Б.М. СуперЭВМ: области применения и требования к производительности // Известия высших учебных заведений. Электроника. — 2004. — № 1. — С. 13–17.
3. Каляев А.В., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. — М.: Янус-К, 2003. — 380 с.
4. Virtex-6 Family Overview DS150 (v2.4). January 19, 2012 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds150.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds150.pdf).

Автор — сотрудник фирмы  
**FASTWEL**  
 Телефон: (495) 234-0639  
 E-mail: [info@fastwel.ru](mailto:info@fastwel.ru)