

**Высокопроизводительная гетерогенная вычислительная платформа «ГРИФОН» для построения встраиваемых систем****П.В. Галаган (ЗАО «НПФ «Доломант»)**

*Представлены архитектурные и функциональные особенности и возможности отечественной высокопроизводительной гетерогенной вычислительной платформы ГРИФОН, предназначенной для создания встраиваемых решений, работающих в жестких условиях эксплуатации.*

*Ключевые слова: высокая производительность, гетерогенность, вычислительная платформа, встраиваемые решения, жесткие условия эксплуатации, открытая архитектура, модульность, масштабируемость, система ввод/вывода.*

**Введение**

По ряду экспертных оценок, доля применяемых западных средств вычислительной техники (ВТ) для встраиваемых систем в российских изделиях весьма высока и в отдельных отраслях экономики достигает 90%. На фоне уже введенных санкционных ограничений и сохраняющейся вероятности их дальнейшего ужесточения подобная ситуация вызывает определенные опасения. В связи с этим актуальной является задача создания отечественных встраиваемых средств ВТ.

Наиболее важное значение для отечественной экономики имеют встраиваемые системы, ориентированные на сложные технологические объекты и решение ответственных задач. Это, прежде всего, объекты атомной энергетики и нефтегазовой отрасли, области вооружения и военной техники, транспорта, систем управления опасными процессами в промышленности, сфера телекоммуникаций.

Прикладные задачи, решаемые на таких объектах, требуют значительных вычислительных ресурсов для организации высокопроизводительных вычислений и наличия мощных аппаратных средств. Специально для успешного решения подобных ответственных задач на базе встраиваемых систем специального назначения в компании ЗАО «НПФ «Доломант» была разработана новая отечественная высокопроизводительная гетерогенная вычислительная платформа ГРИФОН (ВГВП «ГРИФОН»).

Высокопроизводительные вычислительные задачи, реализуемые на встраиваемых платформах, выделяют в отдельный сегмент НРЕС (High Performance Embedded Computing). В мировой практике для построения эффективных решений данного класса применяются следующие основные принципы и подходы:

- наличие открытой архитектуры;
- массово-габаритные ограничения и энергоэффективность;
- возможность применения в жестких условиях эксплуатации;
- создание многопроцессорных конфигураций;
- малая задержка отклика и высокоскоростной обмен данными между вычислителями;

- высокая вычислительная плотность — максимальная производительность на кубический сантиметр (FLOPS per cubic cm);

- разнообразные ресурсы ввода/вывода данных как в цифровом, так и в аналоговом виде;
- гетерогенность вычислительной среды

Платформа ГРИФОН — это современное НРЕС-решение отечественного производства, построенное с учетом всех современных требований. Рассмотрим каждый из этих подходов подробнее.

**Открытая архитектура**

Для максимально оперативного и рентабельного построения встраиваемых вычислительных систем (НРЕС-систем), объединяющих зачастую большой объем разнородных вычислительных ресурсов, как правило, используются унифицированные модульные стандарты. От выбора стандарта зависит цикл жизни прикладной системы, ее модернизационный потенциал, обратная совместимость и стоимость серийного производства изделий, построенных на его базе. Именно по этим причинам одним из головных принципов построения НРЕС-решений является применение открытых технологических стандартов и спецификаций.

Особую актуальность для отечественных предприятий это приобретает сегодня, когда современная внешнеполитическая обстановка характеризуется высокой степенью нестабильности, что напрямую отражается на многих отраслях отечественной промышленности. Прогнозировать перспективы отношений с западными поставщиками электроники не берется никто. Поэтому отечественным предприятиям, применяющим специальное оборудование для решения ответственных задач, в этих условиях как никогда необходимо иметь уверенность в выборе применяемой электроники на ближайшую и среднесрочную перспективу. Эта уверенность может быть укреплена посредством применения отечественных решений, построенных на максимально открытых стандартах.

Платформа ГРИФОН построена на базе полностью открытого модульного технологического стан-

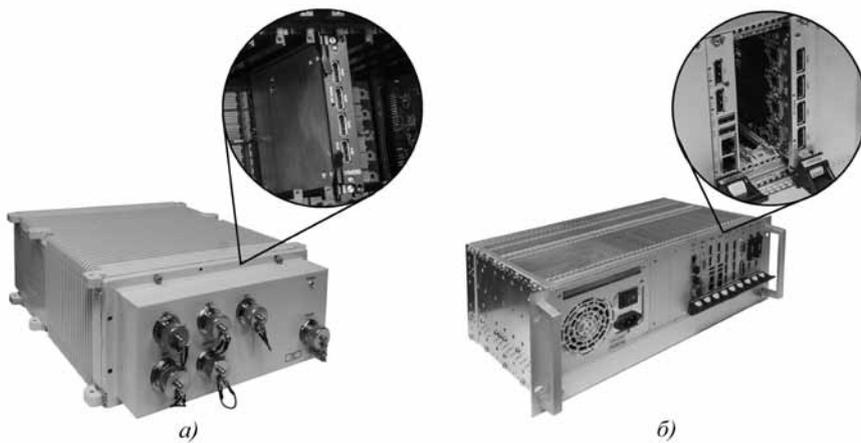


Рис. 1. ГРИФОН-К (а), ГРИФОН-С (б)

дарта CompactPCI-Serial [1], а в качестве основного транспортного протокола используется открытый стандарт PCI-Express [2].

Существенным преимуществом спецификации CompactPCI-Serial является доступная и прозрачная документация. Спецификация CompactPCI-Serial четко и однозначно определяет назначение всех элементов от описания механической конструкции до назначения всех типов контактов. Спецификация описывает в том числе и логический уровень взаимодействия, например, топологию применяемых в стандарте интерфейсов (PCIe, Ethernet, SATA, USB и т. д.). Тогда как ряд также широко применяемых модульных стандартов (VPX, OpenVPX, MicroTCA и т. п.) представлен набором спецификаций и системных профилей, более сложно задокументированных и не всегда открытых для отечественного производителя.

Спецификация CompactPCI-Serial предлагает широкие возможности по применению модулей из семейства предшествующих спецификаций PICMG 2.0, 2.30, 2.16. По ряду оценок стандарт будет актуален на следующие 15...25 лет, что обеспечивает не только высокую совместимость, но и долгий жизненный цикл изделий на базе платформы ГРИФОН.

Последовательная шина PCI-Express третьего поколения используется в качестве основного транспортного протокола при межмодульном взаимодействии. Кроме высокой пропускной способности и низких задержек, PCI-express не имеет лицензионных ограничений на использование и масштабируемость в отличие от ряда других аналогичных интерфейсов.

Кроме того, сегодня PCI-express является самым распространенным открытым интерфейсом, встроенным в подавляющее большинство микропроцессоров, что обеспечивает дополнительные преимущества:

- по применению максимально расширенной элементной базы для изготовления вычислительных модулей;

- позволяет применить отечественную элементную базу (процессоры с архитектурой Эльбрус, Байкал) наряду с зарубежной в одной вычислительной системе;

- при попадании той или иной номенклатуры электронных компонентов под ограничения ввоза на территорию РФ сохраняется возможность изыскать требуемые компоненты из максимально широкого перечня, не попавшего под эти ограничения и оперативно провести планирование и переход на аналоги.

С учетом современной внешне-политической обстановки очевидно, что применение открытых стандартов сегодня является гарантией совместимости аппаратных вычислительных ресурсов и длительного жизненного цикла прикладных систем, построенных с их применением.

#### Массово-габаритные ограничения для применений в жестких условиях эксплуатации

Для НРЭС-систем, работающих в составе бортовой аппаратуры объектов вооружения, кроме высоких требований к вычислительным ресурсам, предъявляются также существенные ограничения по массово-габаритным характеристикам аппаратной составляющей прикладной системы. При этом система подвергается воздействию внешних неблагоприятных факторов окружающей среды: постоянные или периодические вибрационные/ударные нагрузки, расширенный температурный диапазон применения и др.

Платформа ГРИФОН ориентирована на применение в жестких условиях эксплуатации. Стойкость ГРИФОН к неблагоприятным внешним воздействующим факторам окружающей среды соответствует требованиям ГОСТ РВ 20.39.304–98, что позволяет применять эту аппаратуру как для стационарного, так и для бортового базирования.

Базовый вычислительный блок представлен в двух конструктивных исполнениях:

- ГРИФОН-К — бортовое исполнение (рис. 1 слева), характеризуется кондуктивным отводом тепла от функциональных модулей с использованием клиновидных зажимов с дальнейшим конвекционным охлаждением корпуса. Составные части ГРИФОН-К не имеют подвижных частей или элементов, а сами модули встроены в теплосъемную кассету, что позволяет применять ГРИФОН-К в составе аппаратуры борта;

- ГРИФОН-С — промышленное исполнение (рис. 1 справа); блок может быть установлен в стандартную телекоммуникационную стойку 19-дюймов. Для отвода тепла используется метод принудительного воздушного охлаждения функциональных модулей и самого корпуса ГРИФОН-С.

Для НРЭС-решений характерна высокая вычислительная плотность, то есть на минимальный объем аппаратуры приходится максимальная производительность вычислительной системы. Это может

приводить к превышению допустимого порога суммарной рассеивающей способности бортовой аппаратуры. Кроме того, для некоторых бортовых систем, например, для аппаратуры подводных судов, актуальны требования допустимого уровня шума работы аппаратуры. Учитывая данные факторы и согласно поэтапному плану реализации концепции ГРИФОН, в настоящее время ведутся работы по созданию конструктивного исполнения с использованием жидкостной системы охлаждения. Это позволит существенно улучшить рассеивающую способность вычислительных блоков ГРИФОН и минимизировать уровень шума при работе бортовой аппаратуры.

Наличие нескольких вариантов конструктивных исполнений и соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.39.304–98 покрывает потребности для всех областей использования: делает возможным применять изделия на базе ГРИФОН как для объектов автоматизации стационарного базирования с заявленными требованиями стойкости к воздействиям окружающей среды, так и для аппаратуры мобильного базирования (сухопутного, морского или воздушного).

#### **Возможность создания многопроцессорных конфигураций и высокоскоростной обмен данными**

Все НРЕС-решения являются встраиваемыми, но не все встраиваемые системы можно отнести к области НРЕС. Так, существуют встраиваемые системы для эксплуатации в суровых условиях, выполняющие строго определенный набор функций. При этом к ним не предъявляются требования по реконфигурируемости или решению на их базе задач высокопроизводительных вычислений.

Прикладные же НРЕС-задачи, как правило, более трудоемки и требуют наличия существенно больших ресурсов и возможностей по организации сложных вычислительных процессов в рамках системы.

ГРИФОН — это многоцелевая магистрально-модульная НРЕС-платформа (рис. 2).

Модульный подход позволяет оперативно создавать проблемно-ориентированные конфигурации ГРИФОН за счет выбора и установки в вычислительный блок необходимого набора прикладных модулей, исходя из потребности при решении той или иной прикладной задачи.

Для наращивания аппаратных ресурсов и вычислительной мощности предоставляется возможность масштабировать решение путем объединения блоков ГРИФОН через высокоскоростные интерфейсы обмена данными (10GbEthernet, PCI-Express).

Так, базовый вычислительный блок ГРИФОН оснащен стандартной объединительной платой

CompactPCI-Serial, рассчитанной на девять посадочных мест для размещения функциональных модулей. При этом первый слот является системным, остальные слоты комплектуются модулями произвольно. В качестве транспортного протокола при межмодульном взаимодействии используется последовательная шина PCI-Express третьего поколения (gen3.0).

ЗАО «НПФ «Доломант» разработала для платформы ГРИФОН набор функциональных модулей. Например, отметим коммутационный модуль PCI-Express — KIC551, который устанавливается в системный слот и позволяет задействовать для коммутации все порты PCI-express кросс-платы по всей ширине их контактов, а именно: 2x8 портов + 6x4 портов шины PCI-express gen3.0. При этом суммарная максимальная теоретическая пропускная способность внутри базового вычислительного блока ГРИФОН составляет до 640 Гб/с. Таким образом, на базе платформы ГРИФОН впервые задействован весь потенциал интенсивности межмодульного взаимодействия стандарта CompactPCI-Serial в реализации 3U.

Соединение модулей с подключением через сетевой коммутатор PCI-Express на физическом уровне соответствует топологии «звезда», при этом на логическом уровне модули могут взаимодействовать между собой в режиме прямого доступа к памяти с поддержкой транзакций «каждый с каждым» (peer-to-peer).

Такой подход, наряду с применяемой высокоскоростной последовательной шиной PCI-Express, позволяет строить различные мультипроцессорные вычислительные контуры и организовывать параллельно-конвейерную обработку данных любой сложности.

#### **Высокая вычислительная плотность и ресурсы ввода/вывода**

Ключевой характеристикой современных суперкомпьютеров является пиковая производительность, выражаемая в FLOPS (FLoating-point Operations Per

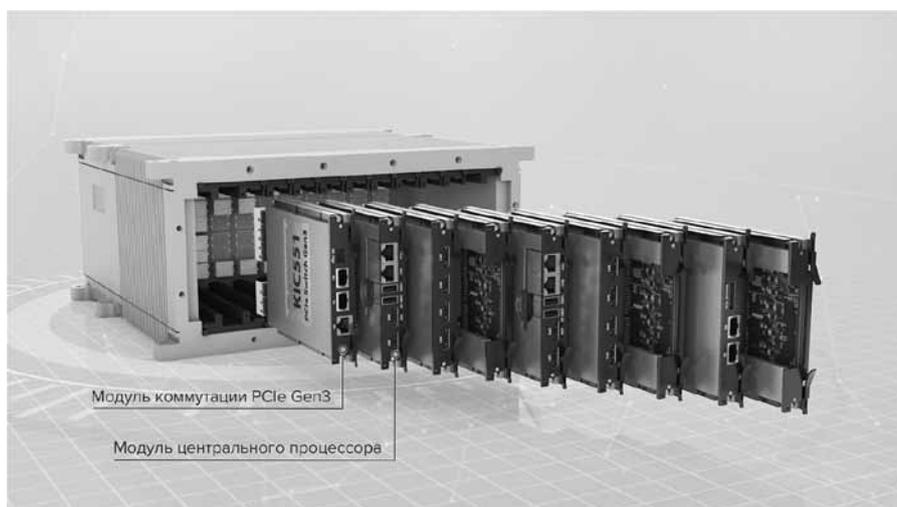


Рис. 2. Модульная структура базового вычислительного блока ГРИФОН

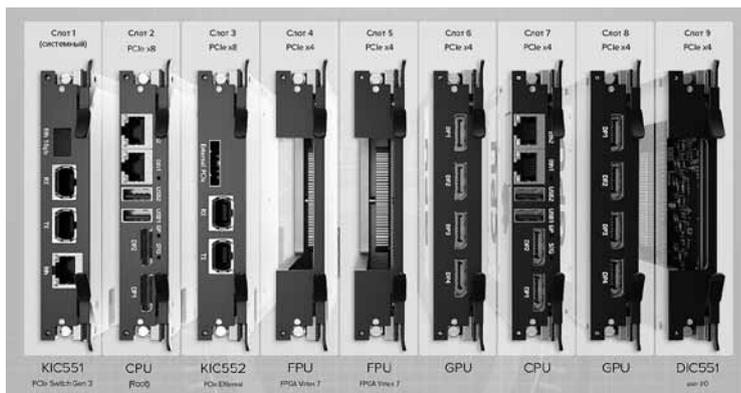


Рис. 3. Возможная конфигурация вычислительного блока ГРИФОН

Second), то есть в пиковом значении числа совершенных вычислительной системой операций с плавающей запятой за секунду. Как известно, для вычисления данного значения применяется набор тестов на базе программной библиотеки LINPACK, при этом не учитываются другие характеристики вычислительной системы, такие как возможность работы с большим объемом разнородных данных, масса, габариты или энергоэффективность вычислительной системы.

Рейтинг суперкомпьютеров TOP500 как раз и строится на базе показателей пиковой производительности. Однако для встраиваемых систем специального назначения высокая производительность также является важной характеристикой, но при этом необходимо уместить аппаратные средства, обеспечивающие максимальную вычислительную производительность, в минимальный габаритный объем, например, для бортового применения. Поэтому, учитывая назначение, для описания производительности НРЭС-решений применяются удельные характеристики как более информативные и корректные. Такой характеристикой служит значение вычислительной плотности, выраженной в FLOPS на 1 см<sup>3</sup> объема аппаратуры — FLOPS per cubic.

Для платформы ГРИФОН представляется возможным использовать широкую номенклатуру вычислительных модулей на базе современных высокопроизводительных компонентов, что позволяет получить

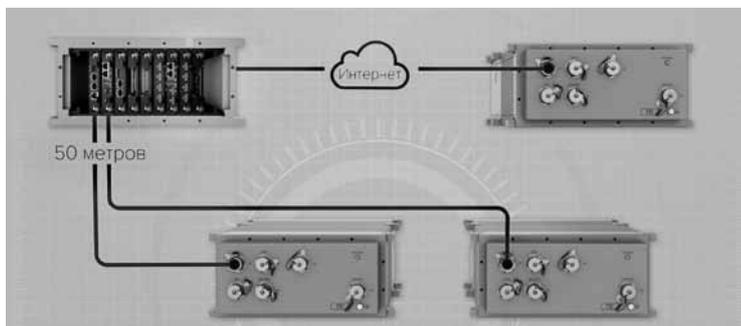


Рис. 4. Пример объединения трех вычислительных блоков ГРИФОН, разнесенных на 50 м, по линиям PCIe x8 и подключение удаленного ресурса на базе ГРИФОН через сеть Internet по 10 Gigabit Ethernet.

высокие показатели производительности вычислительных систем, построенных на базе ГРИФОН.

Конфигурация вычислительных блоков ГРИФОН зависит от потребностей в вычислительных ресурсах при решении той или иной прикладной задачи. Одна из возможных конфигураций базового вычислительного блока представлена на рис 3.

Для ввода/вывода данных в вычислительный контур изделий на базе ГРИФОН предусмотрено несколько вариантов. Простейший способ — ввод данных по сети 10 GbEthernet через коммутатор KIC551 или модуль NIM500 — двухканальный контроллер оптической или проводной сети 10 GbEthernet.

При необходимости быстрой обработки большого объема данных в цифровом или аналоговом виде может быть использован способ ввода данных в вычислительный контур изделия через интерфейсы на базе мезонинных модулей FMC. Так, для минимизации задержек и экономии ресурсов центрального процессора данные могут быть переданы непосредственно для обработки на ПЛИС без транзита по транспортной шине и обработки хостом. Во всех модулях на базе ПЛИС (FPU500 и FPU501) предусмотрен НРС-мезонинный разъем (рис. 3 слоты 4 и 5).

При меньших потребностях в оперативной обработке или «быстром» вводе/выводе данные могут быть введены с использованием модуля ввода DIC551 (Рис 5. слот 9), который также оснащен мезонинным разъемом.

Еще одним способом ввода данных могут служить слоты расширения PCIe, размещенные на модуле KIC552, предназначенного для соединения блоков, удаленных друг от друга на расстояние до 50 метров, или ввода данных по PCIe (рис. 3. слот 3).

Кроме этого, в состав платформа ГРИФОН включен широкий набора интерфейсов для подключения различных периферийных устройств. При необходимости использовать для ввода/вывод какие-либо другие интерфейсы (малораспространенные, устаревшие или нестандартные) модули могут быть оперативно дополнены нужными интерфейсами по требованиям заказчика.

Возможности по гибкому конфигурированию ГРИФОН позволяют строить малогабаритные высокопроизводительные системы с возможностью адаптивного наращивания функционала и вычислительной мощности изделий или создания распределенных систем, построенных на базе ГРИФОН, путем каскадирования блоков по PCI Express x8 или 10 Gigabit Ethernet (рис. 4).

**Гетерогенность вычислительной среды**

Решение современных вычислительных задач системами специального назначения

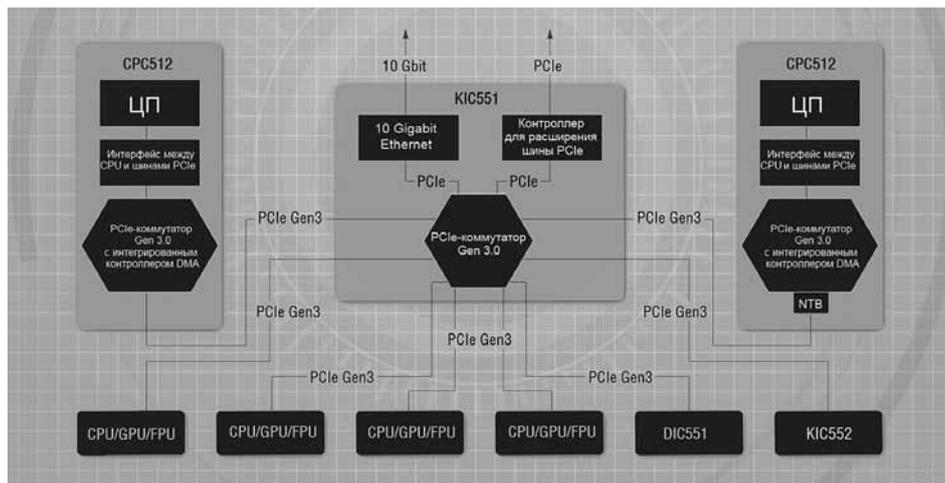


Рис. 5. Структурная схема базового вычислительного блока ГРИФОН, где CPU – центральный процессор; GPU – графический процессор; FPU – вычислительный модуль на базе ПЛИС; PCIe – высокопроизводительная шина передачи данных; NTB – контроллер «непрозрачных мостов»; DIC551 – мезонинный модуль ввода; KIC552 – модуль расширения PCIe

связанно с обработкой высокоинтенсивных потоков разнородных данных. Это и сигнальная информация, зашифрованный трафик, данные от многочисленных датчиков, потоковое видео и т.д. При этом для максимально эффективной обработки структурно-разнородной информации целесообразно использовать вычислители-обработчики различных архитектур, наиболее подходящей для каждого типа данных.

В ГРИФОН предусмотрена такая возможность за счет гетерогенности вычислительной платформы. Сегодня для организации вычислительных процессов для платформы ГРИФОН разработаны вычислительные модули на базе наиболее востребованных архитектур.

В качестве модуля центрального процессора представлен процессорный модуль CPC512 на базе Intel Core i7, для решения специальных задач – модули FPGA: FPU500 на базе Virtex 6,7 и FPU501 на базе Kintex Ultrascale, для решения графических или других вычислительных задач представляется возможным использовать линейку модулей VIM556 на базе графических карт nVidia или AMD. Кроме того, в разработке находится вычислительный модуль на базе отечественной архитектуры Эльбрус с использованием процессора Эльбрус 4 С, который также можно будет применять совместно с модулями других типов в рамках гетерогенных конфигураций ГРИФОН.

Из рис. 5 видно, что вычислительные модули взаимодействуют посредством шины PCIe, при этом каждый из модулей на базе разных микроархитектур (FPGA, x86, Эльбрус, графические процессоры) имеет свои особенности взаимодействия по шине PCIe с центральным процессором, с другими вычислительными модулями. Кроме того, каждый из модулей на базе различных архитектур имеет собственную парадигму программирования под эту архитектуру, и далеко не всегда это коррелирует с компетенциями разработчиков прикладных систем.

В концепции ГРИФОН под гетерогенностью понимается не просто возможность строить конфигурации изделий с одновременным использованием модулей на базе различных архитектур, но и возможность ведения эффективной разработки прикладного ПО, неосложненной множеством особенностей и нюансов программирования гетерогенных конфигураций.

Для этого необходимо решение следующих задач:

- абстрагировать разработчиков прикладных систем от особенностей низкоуровневого взаимодействия модулей на базе различных архитектур;
- предоставить стандартные интерфейсы для организации взаимодействия между вычислителями;

- предоставить возможность по организации прямого межмодульного взаимодействия без участия центрального процессора или других вычислительных модулей.

Для решения этих задач для каждого из типов межмодульных взаимодействия были разработаны программные средства, являющиеся важной программной компонентой платформы ГРИФОН.

#### **Взаимодействие модулей на базе центрального процессора (CPU-CPU)**

Основой для построения мультипроцессорных систем на PCIe является виртуальный механизм «непрозрачных мостов» (NTB – Non-Transparent Bridge), которые позволяют работать с разделенным адресным пространством. NTB имеют две области конфигурационных регистров (для внутреннего и внешнего адресного пространства). NTB виден и со стороны внутренней, и со стороны внешней шины как отдельное периферийное устройство. Этот механизм применяется и для организации взаимодействий для платформы ГРИФОН.

Для взаимодействий модулей типа CPU-CPU реализовано три основных механизма:

1. *Сетевой драйвер с транспортом IP по PCIe.* В основе этого метода лежит принцип туннелирования IP-пакетов по шине PCIe. Разработан драйвер виртуального сетевого устройства с использованием непрозрачных мостов, осуществляющий функции трансляции адресов с транзакцией IP-пакетов по шине PCIe.

Основным преимуществом этого метода является прозрачность для приложений пользователя. Для запуска прикладного ПО на изделиях ГРИФОН не требуется его перекомпиляция. Также будут работать и библиотеки высокого уровня, такие как MPI или QT. Главным недостатком является дополнительная

нагрузка на процессор, которая возникает в связи с необходимостью формирования сетевых пакетов и обработки стека протоколов TCP/IP.

2. *Библиотека сокетов, совместимых с сокетами Беркли, с транспортом по PCIe.* Так же, как и протоколом TCP, спецификация PCIe гарантирует доставку данных в строгом порядке их отправки. Поэтому необязательно работать со стеком TCP/IP. Вызовы Sockets API перехватываются с последующим перенаправлением «чистых» данных сразу для транспорта по PCIe. Данные будут доставлены без искажений и в правильном порядке.

Преимуществом данного способа является отсутствие затрат ресурсов центрального процессора на обработку стека протоколов TCP, однако для использования потребуется пересобрать пользовательские приложения с подключением библиотек из комплекта ПО поставки ГРИФОН.

3. *Набор библиотек отображения участков памяти одного модуля на другой.* В этом случае прикладному программисту предоставляется возможности работать напрямую с памятью, отображенной через непрозрачный мост на другую PCIe шину. В этом случае разработчик имеет в своих руках все возможности организовать взаимодействие так, как ему будет угодно.

Главным преимуществом данного метода является отсутствие каких-либо издержек, связанных с реализациями двух предыдущих способов взаимодействия, но при этом придется использовать нестандартное API для разработки.

#### ***Взаимодействие модулей центрального процессора с модулями на базе графических карт (CPU-GPU)***

Модули на базе графических карт AMD и карт NVIDIA полностью совместимы с OpenCL и NVIDIA CUDA SDK. Эти средства включают весь необходимый функционал для разработки и организации взаимодействия как с центральным процессором, так и других сценариев при межмодульном взаимодействии в режиме PCIe P2P (peer — to — peer). NVIDIA CUDA SDK на данный момент широко распространено и имеет обширную документацию.

#### ***Взаимодействие модулей центрального процессора с модулями на базе ПЛИС (CPU-FPGA)***

Наиболее трудоемкая и дорогостоящая часть разработки для большинства организаций — это разработка под FPGA. В комплекте поставки для модулей на базе FPGA разработан SDK, включающий набор базовых проектов с драйверами и комплект документации. Этот набор включает наиболее востребованные сценарии и паттерны программирования, позволяющие скрыть от разработчика большинство особенностей разработки PCIe взаимодействий для FPGA.

В качестве одного из примеров можно привести базовый проект отображения всех ресурсов, имеющиеся на модуле FPU500 (FPU501) на шину PCIe, что позволяет, обратившись с хоста по конкретному адресу, получить доступ к конкретным запрашиваемым ресурсам модуля FPU500 или FPU501 (в режиме прямого ввода/вывода). Одновременно доступ к этим же ресурсам можно получить и с FPGA по стандартной шине AXI. Кроме того, области памяти могут быть отображены в адресное пространство любого процесса уровня пользователя: можно писать, читать DDR и FLASH память на модуле с FPGA, копировать данные с использованием DMA контроллеров и пр. При этом сохраняется возможность организации peer-to-peer взаимодействия между двумя модулями на базе FPGA и между CPU и FPGA.

#### **Вывод**

ГРИФОН представляет собой универсальную вычислительную платформу для решения множества задач высокопроизводительных вычислений в жестких условиях эксплуатации. Используя эту платформу, заказчик может без изменения компетенций разработчиков прикладных систем применять любые вычислительные архитектуры и любые интерфейсы и при этом с минимальными затратами гибко модернизировать или масштабировать полученный результат.

Обострение внешнеполитической обстановки, введение масштабных ограничений на поставку электронных изделий, компонентов и технологий не оставляют отечественным промышленным организациям выбора, кроме экстренного перехода на отечественные аналоги. Однако далеко не всегда эти аналоги присутствуют на рынке — зачастую их просто нет. При этом на создание конкурентных решений требуются и существенные временные, интеллектуальные и финансовые затраты. Платформа ГРИФОН является примером реального и своевременного замещения импорта отечественными образцами, так как представляет собой уже разработанное и готовое для внедрения решение, соответствующее мировому уровню развития техники и не уступающее возможным зарубежным аналогам.

#### **Список литературы**

1. Буравлев А. Спецификация CompactPCI Serial среди открытых спецификаций для построения модульных встраиваемых компьютерных систем // Современные технологии автоматизации. 2012. № 3. С. 84-94.
2. Буравлев А. Процессорные платы PC/104: новые задачи, новые стандарты, новые возможности // Современные технологии автоматизации. 2007. № 3. С. 12-15.

***Галаган Петр Владимирович — заместитель технического директора ЗАО «НПФ «Доломант».***  
***Контактный телефон (495) 232-20-33.***  
***E-mail: galagan@dolomant.ru***