

# К СОЗДАНИЮ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОПЕРЕЖАЮЩИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ АРХИТЕКТУР

Ю.С. Затуливетер<sup>1</sup>, Е.А. Фищенко<sup>1</sup>, С.Е. Аргамонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИПУ РАН, г.Москва

<sup>2</sup> ООО «ИДМ», г.Зеленоград

## Введение

Развитие массовых компьютерно-сетевых технологий привело к формированию глобально сильносвязного информационного пространства с метрикой "всё зависит от всего и сразу". Носителем этого пространства стали миллиарды связанных сетями компьютерных устройств, которые образуют системно разнородную компьютерную среду из мобильных и стационарных компьютеров различных классов – от интеллектуальных датчиков, смартфонов и ПК до суперкомпьютеров.

В условиях глобальной сильносвязности функционирование и развитие мировой социосистемы сопровождается экспоненциальным ростом потоков и объёмов распределённой информации. Она накапливается в глобальной компьютерной среде (ГКС) и, потенциально, должна во всё большей мере отражать текущее состояние практически неограниченного числа взаимосвязанных компонентов социосистемы в целом и её частей. Однако всё большая её часть остаётся своевременно не переработанной, что ведёт к опережающему росту информационных шумов и неконтролируемому росту новых неуправляемых "степеней свободы".

В отсутствие средств и методов полномасштабной, системно целостной переработки информации, сопровождающей функционирование и развитие социосистем в условиях роста сфер влияния ГКС и глобальной сильносвязности, резко снижается качество социально значимых процессов управления. Непрерывная череда кризисов с нарастающей амплитудой – тому подтверждение.

Для устойчивого функционирования и развития мировой социосистемы в условиях растущей сильносвязности всего многообразия её компонентов необходима своевременная переработка экспоненциально растущих потоков и объёмов глобально распределённой информации (с учётом наиболее значимых степеней свободы и текущего состояния социосистемы и её частей). Для этого необходима полномасштабная консолидация быстро растущего совокупного функционального и вычислительного потенциала ГКС, в которой эта информация циркулирует.

## Новые требования и подходы

В настоящее время основу промышленных средств функциональной интеграции сетевых ресурсов посредством систем распределённых вычислений составляют различные стандарты Grid-систем и, в большей степени, Cloud-технологий. Следует отметить, что они нацелены на интеграцию вычислительных ресурсов в изначально разнородных вычислительных средах. Успешно решая отдельные классы задач распределённой обработки, такие системы и технологии в силу фундаментальных причин принципиально ограничены в возможностях функциональной интеграции совокупных ресурсов сколь угодно больших сетей и формирования в них единого алгоритмического пространства. В условиях сильносвязности без такого пространства невозможно вести коррелированную переработку сверхбыстро растущей глобально распределённой информации.

Проблемы интеграции структурно разнородных вычислительных и информационных ресурсов, как известно, многовариантны. Поэтому в рамках существующих технологий по мере увеличения масштабов задач функциональной интеграции (посредством создания сетевых систем обработки распределённой информации) главным препятствием становится разнородность компьютерной среды, требующая решения задач композиции, имеющих комбинаторную сложность. Барьеры комбинаторной сложности становятся причиной неприемлемого роста трудоёмкости/себестоимости создания и массового распространения систем распределённой обработки информации в ГКС.

Глобальные масштабы сетей и задач переработки распределённой информации требуют новых подходов к решению задач построения больших и сверхбольших распределённых систем сильносвязных объектов/субъектов и управления в них. Взаимодействие компонентов таких систем сопровождается опережающим ростом потоков и объёмов быстро меняющейся структурно сложной информации. Для устойчивого функционирования и развития мировой социосистемы в условиях глобальной сильносвязности необходима своевременная и полномасштабная переработка этой информации.

Для этого требуется неограниченное увеличение масштабов применения систем переработки распределённой информации, циркулирующей в едином информационном пространстве ГКС. Однако

разнородность компьютерной среды в условиях сильносвязности становится фундаментальным фактором, ограничивающим развитие функциональной интеграции на основе существующих технологий.

### **Новый подход**

Преодоление барьеров комбинаторной сложности ресурсов разнородных сетей только технологическими методами невозможно. Для полномасштабного решения задач интеграции совокупных вычислительных ресурсов ГКС требуется устранение первопричин непрерывного воспроизводства структурной разнородности вычислительных и информационных ресурсов компьютерных сред.

Одной из стратегических целей развития компьютерно-сетевых технологий является формирование в ресурсах сколь угодно больших сетей математически однородного алгоритмического пространства параллельных и распределённых вычислений [1], которое в едином формализме исчисления древовидных структур [2] сможет охватить разнородные вычислительные ресурсы глобальных сетей, связывающие воедино компьютерные устройства и системы всех классов. Такое пространство открывает возможности для создания в сетевых ресурсах сколь угодно больших распределённых систем переработки экспоненциально растущих потоков информации, консолидирующих совокупный вычислительный потенциал ГКС – от носимых компьютерных устройств до высокопараллельных суперкомпьютеров.

Сети общего назначения в большей своей части составлены из универсальных компьютеров с микропроцессорными архитектурами, построенными на основе модели Дж. фон Неймана. Она представляет собой классическую аксиоматику универсальных машинных вычислений, которая несёт в себе два принципиальных ограничения [2].

Во-первых, свойство универсальной программируемости реализуется только во внутренних ресурсах изолированных компьютеров, что не позволяет регулярным образом распространять свойство "бесшовной" программируемости на совокупные ресурсы компьютеров связанных сетями.

Во-вторых, отсутствует структурная регламентация способов инженерного воплощения аппаратных средств и форм представления информации в памяти, что является причиной непрерывного воспроизводства разнородности компьютерных архитектур и форм представления данных, программ, процессов и систем. Отсюда произрастают фундаментальные причины структурной разнородности ГКС и комбинаторной сложности функциональной интеграции её ресурсов.

Модель фон Неймана де-факто стала единым логическим стандартом массового производства компьютеров и программ. Микропроцессорные архитектуры можно рассматривать как индустриальное воплощение классической модели. Микропроцессоры как элементная база (ЭБ) составляет основу всего разнообразия современных универсальных компьютерных устройств и технологий. Это означает, что все системы, построенные на основе микропроцессорной ЭБ, наследуют указанные выше ограничения, делающие невозможным полномасштабную интеграцию сетевых ресурсов.

Для полномасштабного решения задач функциональной интеграции сетевых ресурсов необходима ЭБ с новыми компьютерными и сетевыми архитектурами. Она должна обеспечить формирование в сколь угодно больших сетях единого, "бесшовно" программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства распределённых и параллельных вычислений [1,3]. В нём на уровне аксиоматики устраняется фактор разнородности (комбинаторной сложности функциональной интеграции). Кроме того, посредством ЭБ в виде однокристалльных компьютеров с высокоэффективной, структурно масштабируемой многопроцессорной архитектурой с массовым параллелизмом обеспечивается практически неограниченное наращивание вычислительной производительности в узлах сетей [4,5].

### **Предпосылки к созданию новой ЭБ**

Элементная база для формирования единого алгоритмического пространства параллельных и распределённых вычислений должна развиваться по двум основным направлениям.

Одно из направлений – индустриальное производство и широкое применение многопроцессорных компьютерных систем высокой и сверхвысокой производительности. Для кардинального снижения импортозависимости в производстве таких систем необходимо с опорой на производственные возможности РФ (и стран-партнёров) в кратчайшие сроки разработать и на доступных СБИС-технологиях 90-45 нм освоить серийное производство отечественной элементной базы (ЭБ), которая на архитектурном уровне обладает достаточной конкурентоспособностью на широких классах задач с массовым параллелизмом вычислительных операций [4-6].

Другое направление – разработка опережающей ЭБ с компьютерно-сетевой архитектурой, которая предназначена для формирования в существующих сетевых ресурсах единого, "бесшовно" программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства, которое обеспечит достижение качественного превосходства в массовой организации распределённых вычислений в сетевых ресурсах [1,2,3].

### **Элементная база для вычислений с массовым параллелизмом**

В настоящее время отечественные разработчики высокопроизводительных систем не имеют собственной ЭБ в виде однокристалльных компьютеров-ускорителей с существенно многоядерной архитектурой,

сопоставимых с зарубежными разработками. Особые опасения вызывает зависимость российских разработчиков и производителей высокопроизводительных систем от зарубежной ЭБ.

Стратегический тренд компьютерного рынка в области высокопроизводительных вычислений представлен однокристальными многоядерными компьютерами-ускорителями для задач с массовым параллелизмом. В условиях "теплого барьера", остановившего рост рабочих частот и производительности микропроцессоров, компьютерные архитектуры с десятками, сотнями и тысячами ядер (процессорных элементов - ПЭ) на кристалле стали главным резервом увеличения абсолютной и удельной (в расчёте на ПЭ) производительности применительно к системам всех классов – от смартфонов и встраиваемых компьютеров, до облачных дата-центров и суперкомпьютеров.

Современные многоядерные однокристальные ускорители ведущих производителей (nVIDIA, AMD, Intel и др.) предоставляют пиковую производительность от 0.3 Тфлопс/чип (для компактных мобильных устройств) до 2-4 Тфлопс/чип и более. Они составляют основу ЭБ для высокопроизводительных систем общего и специального назначения.

В настоящее время это быстро развивающаяся, остроконкурентная рыночная площадка с многомиллиардными оборотами. Конкуренция ведётся не столько за счёт кардинального улучшения качества многоядерных архитектур, сколько посредством привычной гонки СБИС-технологий во всё более дорогостоящей борьбе за глубокие нанометры и увеличение количества транзисторов на кристалле. Новейшие ускорители, имеющие более 1000 ядер, изготавливаются по технологиям 28 и 22 нм.

Важно отметить, что современные архитектуры графических многоядерных ускорителей общего назначения (GP GPU) ведущих производителей (nVIDIA, AMD), а также иные многоядерные решения других производителей, ещё далеки от эффективного использования всех архитектурных резервов наращивания массового параллелизма вычислений. В этой рыночной нише отсутствует явно лидирующая (с большим отрывом по качеству) архитектура (эффективная производительность на широких классах задач в расчёте на транзистор, ватт потребления и единицу стоимости). В гонке за глубокие нанометры в отсутствие высокоэффективных на широких классах задач структурно масштабируемых архитектур полезная отдача транзисторов, по мере их количественного роста на чипе, только падает.

Надо сказать, что в количественном росте транзисторов предел возможного прогресса индустриальных СБИС-технологий уже близок (~10-5нм) и будет достигнут в ближайшие 4-5 лет. В дальнейшей конкуренции решающее значение будет иметь качество многоядерных архитектур, определяемое их эффективностью на как можно более широких классах задач с массовым параллелизмом.

В целях снижения импортозависимости в сферах разработки и производства высокопроизводительных компьютеров и систем предлагается проект создания отечественной ЭБ в виде однокристальных многоядерных компьютеров-ускорителей ПС-2000М [4-6].

Архитектура компьютеров ПС-2000М разрабатывается как развитие в ориентации на однокристальное воплощение в глубоком нанометровом диапазоне 90-10 нм промышленно реализованной и хорошо зарекомендовавшей себя архитектуры не имевших аналогов отечественных компьютеров ПС-2000 [4]. Научные основы оригинальной многопроцессорной архитектуры с массовым параллелизмом разработаны в ИПУ РАН и успешно реализованы в выпущенном большой промышленной серией компьютере ПС-2000. Данная архитектура воплощает фундаментальные принципы отображения структур задач с массовым параллелизмом на уровне вычислительных операций на эффективную многопроцессорную структуру вычислительной среды и поэтому не привязана к особенностям быстро устаревающей компонентной и конструкторской базы.

Высокая (околопиковая) эффективность масштабируемой архитектуры и системы команд компьютера ПС-2000 на широких классах задач с массовым параллелизмом доказана более чем десятилетней практикой эксплуатации парка из сотен вычислительных комплексов в разнообразных сферах промышленной и специальной обработки данных.

Новая архитектура ПС-2000М [4-6], сочетая высокую гибкость программирования и высокую эффективность многопроцессорной реализации массовых вычислений, в полной мере наследует достоинства ПС-2000. По сравнению с зарубежными решениями в сфере однокристальных многоядерных ускорителей с массовым параллелизмом она позволяет в более широких диапазонах возможных приложений получать в разы большую производительность в расчёте на транзистор и ватт энергопотребления. Свойство структурной масштабируемости позволяет по мере перехода к более совершенным СБИС-технологиям (90-10 нм) вместе с увеличением числа транзисторов на кристалле и, соответственно, ядер (128-16К) пропорционально наращивать вычислительную производительность, объём и пропускную способность внутренней оперативной памяти, а также пропускную способность каналов ввода/вывода.

Относительная конкурентоспособность предлагаемой к реализации ЭБ ПС-2000М на доступных отечественных СБИС-технологиях 90-45 нм в отношении зарубежных многоядерных ускорителей ведущих производителей, реализуемых на технологиях 28-22 нм, достигается за счёт принципиальных преимуществ оригинальной многопроцессорной архитектуры. Изначально она балансируется на широких классах задач с массовым параллелизмом таким образом, что позволяет с высокой (околопиковой) эффективностью использовать главные резервы параллелизма задач, существующие на уровне неделимых вычислительных

операций, которые в недостаточной степени раскрываются представленными на рынке многоядерными архитектурами. Более полное использование в архитектуре ПС-2000М массового параллелизма задач на уровне неделимых операций позволяет существенно снизить аппаратные затраты на управление и в разы поднять удельную производительность в расчёте на транзистор и ватт энергопотребления.

Конкурентоспособность в отношении представленных на мировом рынке многоядерных графических ускорителей общего назначения (nVIDIA, AMD), а также другими решениями (Intel, IBM), состоит в том, что предлагаемая архитектура изначально разрабатывается и на структурном уровне балансируется под широкие классы задач с массовым параллелизмом, раскрываемым на уровне вычислительных операций посредством большого количества ядер (сотни и тысячи). В этом её преимущества в эффективности перед однокристалльными ускорителями GP GPU (nVIDIA, AMD) с таким же порядком количества ядер (сотни и тысячи). Их первоначальная структура, как известно, оптимизировались под специфические наборы алгоритмов обработки 2D/3D графики для ПК. Другие архитектуры ускорителей ориентированы на классы задач с ограниченными уровнями раскрываемого параллелизма (десятками ядер).

Прогресс полупроводниковых технологий открывает возможности полного раскрытия архитектурного потенциала структурно масштабируемой архитектуры ПС-2000М и вывода на рынок однокристалльных компьютеров с массовым параллелизмом, обладающих на широких классах задач высокими (околопиковыми) показателями эффективности. По мере доступа к технологиям глубокого нанометрового диапазона (32 нм и менее) она даёт прочную основу высокого потенциала конкурентоспособности по отношению к зарубежным архитектурным решениям.

Элементная база в виде однокристалльных компьютеров-ускорителей ПС-2000М позволит сформировать универсальную компьютерную платформу для индустриального производства высокопроизводительных и высоконадёжных вычислительных систем двойного назначения (от смартфонов и встраиваемых устройств до суперкомпьютеров), оснащённых технологиями создания совместимого программного обеспечения.

Сферы применения: сложные научные и инженерные расчёты, моделирование физических, химических, биологических и др. систем и объектов, природных и социальных явлений, высокопроизводительная обработка массивов данных и сигналов в реальном времени, построение стационарных и встраиваемых систем сетецентрического управления разнообразными объектами, базами данных, большими распределёнными системами и др.

Предлагаемое решение позволяет в определённой мере компенсировать серьёзное отставание технологий отечественного полупроводникового производства за счёт более эффективной однокристалльной многопроцессорной архитектуры. Отечественные производители высокопроизводительных систем при уменьшении импортозависимости смогут на собственной ЭБ повышать конкурентоспособность стратегически важных видов продукции двойного назначения.

#### **Элементная база для формирования единого алгоритмического пространства распределённых и параллельных вычислений**

Вторым компонентом новой ЭБ является универсальный сетевой компьютер в однокристалльном исполнении с принципиально новой – немикропроцессорной – архитектурой [3]. Эта ЭБ предназначена для формирования "бесшовно" программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства распределённых вычислений и сетецентрического управления в сколь угодно больших компьютерных сетях, что предполагает производство массовыми тиражами.

Особенность и основа архитектуры однокристалльного сетевого компьютера – "умная" оперативная память большого объёма со встроенным "системным интеллектом". В отличие от традиционных микропроцессоров новая ЭБ на аппаратном уровне обеспечивает, прежде всего, эффективную реализацию универсального набора системных функций для автоматического управления внутрикомпьютерными машинными ресурсами, а также межкомпьютерными сетевыми взаимодействиями для выполнения "бесшовно" программируемых и кибербезопасных вычислений в едином алгоритмическом пространстве распределённых вычислений, охватывающем ресурсы сколь угодно больших сетей [1-3].

В настоящее время системные функции в универсальных компьютерах общего назначения реализуются по большей части программно – посредством громоздких операционных систем и многослойного сетевого программного обеспечения. Крайняя разнородность и неконтролируемая сложность программных реализаций системных функций управления ресурсами и процессами в быстро растущей гетерогенной компьютерной среде становится причиной опережающей роста сложности задач функциональной интеграции сетевых ресурсов и критического роста их уязвимости для кибератак [3].

Неприемлемое увеличение трудоёмкости, себестоимости и сроков реализации сетевых средств управления большими и сверхбольшими распределёнными системами становится практически непреодолимым препятствием на путях наращивания размеров и масштабов их применения. Примеры реализации крупномасштабных сетевых систем на основе существующих средств и технологий показывают непомерный рост себестоимости таких работ, которая уже исчисляется сотнями миллионов долларов и более. Для дальнейшего наращивания размеров и масштабов применения распределённых вычислений и сетецентрических

систем управления на их основе, необходимо устранение причин опережающего роста системной сложности задач функциональной интеграции разнородных сетевых ресурсов [1,2].

Такое решение найдено и закладывается в архитектуру новых сетевых компьютеров. Новая ЭБ, являясь аппаратной платформой для формирования единого "бесшовно" программируемого и кибербезопасного алгоритмического пространства распределённых вычислений в сколь угодно больших сетевых средах, устранил необходимость программной реализации системных функций обеспечения распределённых вычислений, что обеспечит кардинальное (на порядки) снижение системной сложности задач функциональной интеграции сетевых ресурсов.

Для наращивания функциональных возможностей и вычислительной производительности новых сетевых компьютеров в едином алгоритмическом пространстве могут применяться разнообразные устройства, связываемые сетями. Это – интеллектуальные датчики и исполнительные устройства (мехатронные, роботизированные и 3d-аддитивные комплексы и др.), ПК, мобильные средства (встраиваемые, индивидуальные, бортовые), суперкомпьютеры, а также, в перспективе, однокристалльные компьютеры-ускорители ПС-2000М различных конфигураций и вычислительные системы на их основе.

Данная ЭБ может использоваться в составе существующих компьютерных систем и сетевого оборудования, что позволяет формировать единое алгоритмическое пространство в ресурсах ныне действующих сетей, обеспечивая тем самым возможность интеграции в это пространство необходимых систем со всем нарабатанным программным обеспечением.

Кибербезопасное алгоритмическое пространство, охватывающее совокупные ресурсы сетей и целевого, и общего назначения становится единой, универсально и "бесшовно" программируемой технологической средой реализации минимальными затратами средств и времени любых сильно-связных систем и технологий сетевидного управления двойного назначения. В этом пространстве открываются возможности для кумулятивного раскрытия совокупного вычислительного потенциала сколь угодно больших вычислительных сред, с включением высокопараллельных суперкомпьютерных систем, в целях своевременной и полномасштабной переработки сверхбольших потоков информации, собираемых сетевыми средами.

#### **Заключение**

Упреждающее формирование единого алгоритмического пространства параллельных и распределённых вычислений необходимо для опережающего перехода к новому технологическому укладу. Во-первых, это кардинальное снижение системной сложности ГКС, ведущее к "обнулению" опережающего роста затрат на создание сколь угодно больших сетевых систем обработки глобально распределённой информации. Во-вторых, как следствие, не менее значимое повышение кибербезопасности и снижение рисков их компрометации посредством кибератак, ведущих сегодня (в условиях крайней разнородности) к мгновенному обесцениванию стремительно растущих затрат на их создание.

Новая ЭБ позволит снизить импортозависимость в создании наукоёмкого технологического фундамента для решения важнейших задач укрепления безопасности страны, а также сформировать отечественным разработчикам и производителям собственные позиции на мировом рынке путём экспорта конкурентоспособной высокотехнологичной продукции двойного назначения в весьма значимых направлениях развития мирового компьютеростроения.

Разнообразные средства, системы и технологии, разработанные с применением новой ЭБ, станут революционным инструментом самоокупаемого и высокоприбыльного решения в едином алгоритмическом пространстве всего разнообразия сильносвязных задач. На этой основе может быть кардинально повышена эффективность всех органов и структур госуправления, управления производственными и бизнес-процессами, направленными на решение всего комплекса задач новой индустриализации, а также другими социально значимыми процессами эффективного функционирования и устойчивого развития страны в условиях растущей конкуренции в глобальном экономическом пространстве.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Ю.С. Затуливетер ExaScale: на пути к единому пространству распределённых и параллельных вычислений // Научный сервис в сети Интернет: Экзафлопное будущее: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (20-25 сентября 2010г., г. Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2011. С.10-14. –URL: <http://agora.guru.ru/abrau2011/pdf/10.pdf>
2. Ю.С. Затуливетер Компьютерный базис сетецентрического управления // Российская конференция с международным участием "Технические и программные средства в системе управления, контроля и измерения" (УКИ'10). Труды конференции. Москва, 18-20 октября 2010 г. Учреждение Российской Академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – С.17-37. URL: <http://cmm.ipu.ru/proc/Затуливетер%20Ю.С.%20.pdf>.
3. Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко Принципы формирования единого алгоритмического пространства распределённых вычислений и обеспечения его кибербезопасности // Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (23-28 сентября 2013г., г.Новороссийск). -М.: Изд-во МГУ, 2013. -589с.. С.321-326. –URL: <http://agora.guru.ru/abrau2013/pdf/321.pdf>.

4. Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко Многопроцессорный компьютер ПС-2000 (Опыт создания и пути развития). М.: ИПУ РАН, 2012. – 86 с. URL: [http://www.ipu.ru/sites/default/files/publications/16551/3477-препринт%20пс-2000\\_2.pdf](http://www.ipu.ru/sites/default/files/publications/16551/3477-препринт%20пс-2000_2.pdf)
5. С.Е. Артамонов, Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко Предпосылки к созданию однокристалльного многопроцессорного компьютера ПС-2000М производительностью 1-10 Tflops // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): труды международной научной конференции (Москва, 28 марта-1 апреля 2011г.). С.402–410. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. 730с. URL: <http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011/short/012.pdf>
6. С.Е. Артамонов, Ю.С. Затуливетер, В.А. Козлов В.А., Е.А. Фищенко Е.А. Стратегия архитектурного опережения при разработке однокристалльного многоядерного компьютера-ускорителя для задач с массовым параллелизмом // Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (23-28 сентября 2013 г., г. Новороссийск). -М.: Изд-во МГУ, 2013. -589с.. С.416-431. –URL: <http://agora.guru.ru/abrau2013/pdf/416.pdf> .