

РАЗВИТИЕ ИМПОРТОНЕЗАВИСИМОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ТЕХНОЛОГИЙ «ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ» (НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧ АСУ ТП АЭС)

Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, г. Москва ул. Профсоюзная, д.65

zvt@ipu.ru, fish@ipu.ru

Аннотация: для развития технологий «цифровых двойников» АСУ ТП АЭС требуются импортонезависимые вычислительные системы высокой производительности. Предлагается создать на существующей отечественной технологии 90 нм многопроцессорный компьютер-ускоритель, основанный на отечественной архитектуре ПС-2000, сопоставимый по производительности с зарубежными ускорителями, реализованными по технологии 40 нм.

Ключевые слова: «цифровые двойники», гибридные вычислительные системы, многопроцессорный компьютер-ускоритель, импортонезависимые компьютерные архитектуры и СБИС-технологии.

Введение

Одним из перспективных направлений развития атомной энергетики является создание «цифровых двойников» АСУ ТП АЭС, которые представляют собой системно-интегрированную совокупность цифровых моделей узлов и подсистем реальных объектов, связанных интерфейсами обмена данными [1]. Функционирование «цифровых двойников» узлов и подсистем осуществляется одновременно и совместно с реальными узлами и подсистемами путём обмена данными в реальном времени. При этом цифровой двойник – это программно-аппаратный комплекс, в котором цифровая часть в той или иной степени адекватности контролирует аппаратно-программную реализацию объекта.

Такие технологии позволяют осуществлять непрерывный контроль функционирования объекта на разных этапах его жизненного цикла. Цифровая виртуализация реальных объектов позволяет с минимальными затратами прогнозировать развитие нештатных ситуаций, а также осуществлять поиск и оптимизации маршрутов выхода из критических ситуаций. С большим эффектом технологии виртуализации используются для обеспечения безопасности в ходе проведения необходимой модернизации программно-аппаратных средств АСУ ТП АЭС [1].

«По данным исследовательского агентства MarketsAndMarkets, мировой рынок «цифровых двойников» в 2020 году составил 3,5 млрд. долл. США, а по прогнозу до 2024 года возрастет до 12-18 млрд. долл. США. Российский сегмент этого рынка в 2020 году достиг 200 млн. долл. США» [2].

«Сегодня на различных уровнях энергоблока действуют разные подсистемы АСУ ТП, данные из них собираются в отдельные информационные системы, аккумулируются в едином центре — системе верхнего блочного уровня. Но это происходит не в режиме реального времени и не в полном объеме. При этом любой энергоблок — это сложный технологический объект, состояние которого меняется практически каждую секунду, создавая огромный поток данных. Система управления должна в режиме реального времени отслеживать все, что происходит на энергоблоке, вовремя оповещать об этом эксплуатационный персонал и транслировать полученную информацию на верхний уровень» [3].

«Применение «цифрового двойника» позволит:

- прогнозировать с существенно более высокой степенью достоверности состояние объекта, возможные нештатные ситуации, оперативно на них реагировать, снижая угрозы безопасности, здоровью людей и окружающей среде;
- увеличить глубину понимания процессов, происходящих в объекте и продукте, за счет наработки расширенной статистики «виртуальной» эксплуатации объектов;
- более точно рассчитывать экономику проекта и управлять ею;
- выявлять слабые звенья и улучшать конструктивные особенности энергоблоков;
- сократить время внедрения необходимых изменений [3].»

В ИПУ РАН имеется большой опыт по разработке и внедрению верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС [4], а также развивается направление по созданию «цифровых двойников» АЭС [1, 4 - 6].

Существенными трудностями при создании моделей «цифровых двойников» являются:

- ограниченная производительность существующих отечественных вычислительных средств, например, для отдельных алгоритмов, требующих большого объема вычислений;

- полноценное моделирование аппаратных компонент затруднительно, т.к. производители, как правило, не раскрывают деталей их работы.

В работе анализируются возможности создания высокопроизводительных систем на основе гибридных вычислительных систем, в которых универсальные компьютеры дополняются однокристальными компьютерами-ускорителями с массовым многоядерным параллелизмом. Такие системы позволяют наращивать общесистемную производительность на порядки. Рассмотрены возможности однокристальной реализации компьютеров-ускорителей с массовым параллелизмом на основе отечественной многопроцессорной архитектуры, реализованной в гибридных вычислительных комплексах ПС-2000. Показано, что структурная масштабируемость и высокая эффективность данной архитектуры на широких классах задач с массовым параллелизмом позволяет на существующей в РФ импортонезависимой СБИС-технологии 90 нм создать многопроцессорный компьютер-ускоритель, сопоставимый по производительности с зарубежными ускорителями, реализованными по технологии 40 нм. Особенность нового компьютера-ускорителя – его высокая степень системной интеграции в рамках гибридной архитектуры с хост-машиной, что открывает возможности эффективной реализации многозадачных режимов и виртуализации, необходимых для построения «цифровых двойников»

1 О резервах наращивания вычислительной производительности

Эффективное применение и развитие технологий «цифровых двойников» напрямую связано с прогрессом компьютерных технологий. С увеличением количества и сложности узлов и технических объектов АСУ ТП АЭС требуются гарантированные, импортонезависимые возможности необходимого наращивания вычислительной и системной производительности компьютерных средств. Этого можно добиваться только посредством развития высокопроизводительной элементной базы (ЭБ). В условиях значительного (на несколько поколений) отставания отечественных СБИС-технологий, а также ужесточения санкций, запрещающих доступ к зарубежной ЭБ и полупроводниковым фабрикам, решающая роль в импортонезависимом формировании высокопроизводительной ЭБ обретает качество однокристальных компьютерных архитектур с массовым многоядерным параллелизмом (с сотнями, тысячами и более ядер). Превосходящие архитектуры могут обеспечить паритет по ключевым характеристикам с зарубежными чипами-ускорителями, реализованных на более продвинутых СБИС-технологиях. При получении доступа к передовым СБИС-технологиям более высокое качество архитектур обеспечит и более высокую конкурентоспособность.

В мире широко известно применение компьютеров-ускорителей общего назначения класса General Purpose computing on Graphics Processing Units (GPGPU). Пионером и одним из лидеров на рынке таких ускорителей является фирма NVIDIA. Чипы этой фирмы массово используются для ускорения вычислений за счет распараллеливания алгоритмов, требующих больших объемов вычислений, посредством разбиения задач на большое количество одновременно исполняемых фрагментов [7].

2 Компьютеры-ускорители в гибридных вычислительных системах

В 2010-11 г.г. фирма NVIDIA вывела на рынок однокристальный многоядерный компьютер-ускоритель под названием Fermi (40 нм, 512 ядер CUDA). Это был первый многоядерный чип общего назначения с массовым параллелизмом класса GPGPU, 512 добавленных CUDA ядер которого во многом избавились от графического наследия GPU. Гибридные вычислительные системы в виде ПК, в которых стояла видеокарта с этим чипом, обеспечивали существенное повышение вычислительной производительности на широких классах задач, при том что их программирование уже не требовало сведения неграфических задач к операциям обработки графики.

Следует отметить, что в течение 80-х годов в нашей стране выпускался гибридный вычислительный комплекс (ВК) ПС-2000. Компьютером-ускорителем с массовым параллелизмом стал отечественный многопроцессорный компьютер ПС-2000, разработанный в Институте проблем управления (ИПУ АН СССР, Минприбор СССР) [8]. Это был впервые в мире ВК с гибридной архитектурой, который производился большой промышленной серией. ВК ПС-2000 широко использовался в народном хозяйстве. Эти ВК использовались и в составе АСУ ТП АЭС. Многопроцессорная архитектура ПС-2000 в отличие от GPGPU в своей системе команд изначально строилась в универсальном базисе вычислений, который используется в универсальных компьютерах с произвольно адресуемой оперативной памятью (без специализации на алгоритмы и структуры данных графической обработки, аппаратно зафиксированных в системе команд GPU). Важно отметить, что архитектура и система

команд компьютера-ускорителя ПС-2000 изначально проектировалась для общего назначения (General Purpose computing).

С 1981 по 1988 годы была выпущена промышленная серия из 242 вычислительных комплексов ПС-2000 (разработка ИПУ РАН и НИИУВМ).

БК ПС-2000 применялся для различных народно-хозяйственных и специальных применений, в частности:

- в экспедициях Мингео для проведения на территориально ближайшем (одном из многих) БК ПС-2000 углублённой обработки значительной части данных сейсморазведки нефти и газа (использовалось до 90 БК);
- в составе телеметрического вычислительного комплекса ЦУП-М для обеспечения полёта многих космических объектов – станций «Салют» и «Мир», включая базовый модуль, технологические и научные модули «Квант-1», «Квант-2», «Кристалл», «Спектр», «Природа», транспортные корабли «Союз-ТМ», грузовые корабли «Прогресс», «Прогресс-М», многоразовый космический корабль «Буран», аппараты дальнего космоса – «Фобос-1», «Фобос-2», научный модуль «Гамма» - 8 БК;
- для создания гидроакустической системы с разнесенными приемо-передающими антеннами для дальнего обнаружения подводных морских объектов (ИПУ РАН, НПО «Атолл»);
- для проведения исследований и компьютерного моделирования во ВНИИЭФ, г. Саров;
- и многие др.

На объектах промышленной обработки данных БК ПС-2000 с высоким экономическим эффектом заменял приобретаемые в обход эмбарго зарубежные суперкомпьютеры лучших мировых производителей. По степени интеграции элементной базы и рабочей частоте ПС-2000 проигрывал им в десятки раз. Но благодаря оригинальной и высокоэффективной архитектуре он не уступал в реальной производительности и на порядки выигрывал в себестоимости производства и эксплуатации. Мнение зарубежных экспертов: «ПС-2000 является самым продвинутым и самым быстродействующим компьютером Советского Союза» [9]. В то время он был в мировом списке 100 лучших суперкомпьютеров.

С опережением на три десятилетия ПС-2000 стал первым в мире многопроцессорным компьютером-ускорителем общего назначения, отвечающим требованиям серийного производства и применения. Он обладал эффективно реализуемой универсальностью в классах задач со статически раскрываемым (на уровне неделимых вычислительных операций) массовым параллелизмом. В этом принципиальное различие его "родословной" от GPGPU, архитектура которого изначально была специализирована на обработку графики. Развитие многих поколений GPGPU происходило не в рамках универсальной архитектуры с массовым многоядерным параллелизмом путём эффективного наращивания количества ядер, а посредством добавления к имеющимся аппаратным решениям узкой направленности новых многоядерных аппаратных блоков, ориентированных на востребованные на рынке функции. Сначала это были чипы для видеокарт на ПК (десятки и сотни специализированных на видеографику ядер), затем, по мере освоения глубокого нанометрового диапазона, в чип добавлялись (со снижающимся коэффициентом полезного использования ядер) сотни и тысячи ядер "общего назначения" CUDA ("очищенных" от жестких графических форматов). И третьим эшелонem эклектического расширения архитектуры GPGPU стал большой массив специализированных ядер в "тензорной" архитектуре, которая узко направлена на задачи глубокого обучения нейронных сетей.

Развитие универсальной, структурно-масштабируемой архитектуры ПС-2000 ориентировано на более эффективное использование транзисторного ресурса на кристаллах СБИС все более глубокого нанометрового диапазона. При этом по мере увеличения количества ядер на кристалле обеспечивается пропорциональный рост их суммарной производительности при сохранении высокого – околопикового (70-100%) – уровня реальной производительности на широких классах задач со статически раскрываемым параллелизмом. В этом случае эффективность реализации алгоритмов глубокого обучения при сохранении универсальности архитектуры будет приближаться к специализированным "тензорным" решениям.

3 Линейка однокристалльных компьютеров-ускорителей GPGPU компании NVIDIA

Компания NVIDIA в 90-е и 00-е годы была одним из лидеров на рынке видеокарт для ПК. В 2006-2008 г. г. на основе технологий 90 нм она выпустила серию видеокарт Tesla G80, в которой в отличие от прежних было 128 потоковых ядер, ориентированных на обработку графики. Это была одна из самых мощных видеокарт.

Далее в развитие Tesla G80, начиная с 2010 г. в целях расширения рынка начался выпуск линии нового класса компьютерных устройств – однокристалльных компьютеров-ускорителей с массовым параллелизмом, известных под названием GPGPU, первым из которых стал ускоритель GF100 поколения Fermi.

В табл.1 [10] приведено развитие класса GPGPU – компьютерных устройств с массовым параллелизмом. Его архитектурные истоки уходят корнями в Tesla G80.

Таблица 1. Развитие компьютеров-ускорителей GPGPU

Год	Поколение	Серия	Кристалл	Техпроцесс
2006	Tesla	GeForce 8	G80	90 нм
2010	Fermi	GeForce 400	GF100	40 нм
2012	Kepler	GeForce 600	GK104	28 нм
2014	Maxwell	GeForce 900	GM204	28 нм
2016	Pascal	GeForce 10	GF102	16 нм
2018	Turing	GeForce 20	NU102	12 нм

Кардинальное отличие Fermi от Tesla G80 – появление массового многоядерного параллелизма, предназначенного для решения задач не только графики, но и общего назначения. С переходом к технологии 40 нм стало возможным включение в архитектуру GPGPU 512 универсальных ядер CUDA. Дальнейшее развитие архитектуры GPGPU (Kepler, Maxwell, Pascal и Turing) осуществлялось путём наращивания количества универсальных ядер до нескольких тысяч за счёт перехода к новым поколениям СБИС-технологий. При этом с увеличением количества универсальных ядер стала проявляться растущая несбалансированность архитектуры однокристалльных ускорителей GPGPU, которая выражалась в снижении коэффициента полезного использования растущего количества универсальных ядер.

Особенность поколения GPGPU Turing в том, что наращивание числа универсальных ядер было прекращено (из-за неприемлемого снижения эффективности), а для повышения общей системной производительности на чип был добавлен второй (в дополнение к графике) узкопрофильный многоядерный ускоритель в виде тензорного вычислителя, ориентированного на задачи глубокого обучения нейронных сетей. Одна из важных (с точки зрения аппаратных/временных затрат) особенностей этих задач – массовые вычисления с числами малой разрядности (16 и 8 разрядов).

Отсюда, на примере NVIDIA, можно сделать выводы относительно качества архитектур GPGPU (ускорители других ведущих конкурирующих в этой сфере фирм также следуют в общем тренде):

- архитектура GPGPU с массовым параллелизмом ядер общего назначения ограничена по эффективности использования числа ядер в диапазоне 512-4096, что не позволяет эффективно масштабировать универсальный многоядерный параллелизм вслед за прогрессом СБИС-технологий – 28-16-12 нм и менее;
- в отсутствие простой универсальной архитектуры, эффективно воплощающей массовый структурно-масштабируемый многоядерный параллелизм в диапазоне 256-16К и более универсальных ядер, используются слабо сбалансированные, разнородные архитектурные решения на одном чипе (графика, универсальные ядра, тензорные вычисления);
- отсутствие сквозной многоядерной универсальности, эффективно реализующей массовый параллелизм разных классов выливается в чрезмерно растущую сложность сопряжения эклектических архитектурных решений, что крайне усложняет архитектуру чипа в целом, требуя многих дополнительных слоёв металлизации, делает её трудной в проектировании и производстве, а также в программировании.

Перечисленные "побочные" эффекты показывают только главные причины исчерпания системообразующих возможностей архитектурной линии GPGPU.

3 Архитектура ПС-2000 как основа импортонезависимости компьютеров-ускорителей

В настоящее время в РФ отсутствуют сопоставимые по ключевым параметрам отечественные компьютеры-ускорители общего назначения, которые можно было бы применять для наращивания возможностей высокопроизводительных систем, необходимого для развития технологий «цифровых двойников».

В настоящее время в РФ наиболее продвинутой в глубокий нанометровый диапазон промышленной технологией производства СБИС остаётся технология 90 нм. Это уровень середины 2000-х годов. С тех пор передовые СБИС-технологии в экспоненциальном темпе роста закона Мура освоили рубежи

массового производства чипов в диапазоне 65-45-28-22-16-12-7 нм и вышли на предельно возможный для кремния уровень ~3 нм.

С приближением размера транзисторов к размеру атомов кремния закон Мура уже в середине 2020-х годов прекращает своё действие по удвоению числа транзисторов, размещаемых на кристалле каждые 1,5-2 года. Это фундаментальное для современного технологического (и не только) мира событие закрывает полувековую эпоху доминирования одной страны в формировании и развитии компьютерной индустрии. На передний план выступают оригинальные архитектуры.

4 Преимущества архитектуры однокристалльного многопроцессорного компьютера-ускорителя с массовым параллелизмом ПС-2000М

В основе проекта лежит масштабируемая MultiSIMD архитектура ПС-2000М (развитие архитектуры ПС-2000), с большим количеством процессорных элементов (ПЭ), каждый из которых содержит мощную арифметику, встроенную межпроцессорную коммутацию, большой объем собственной произвольно адресуемой оперативной памяти и каналы прямого доступа в память. Динамически перестраиваемая структура ПС-2000М комплексируется внутри кристалла программной реконфигурацией из базовых многопроцессорных вычислительных модулей (БВМ), которые строятся на базе архитектуры ПС-2000 (рис. 1) [11].

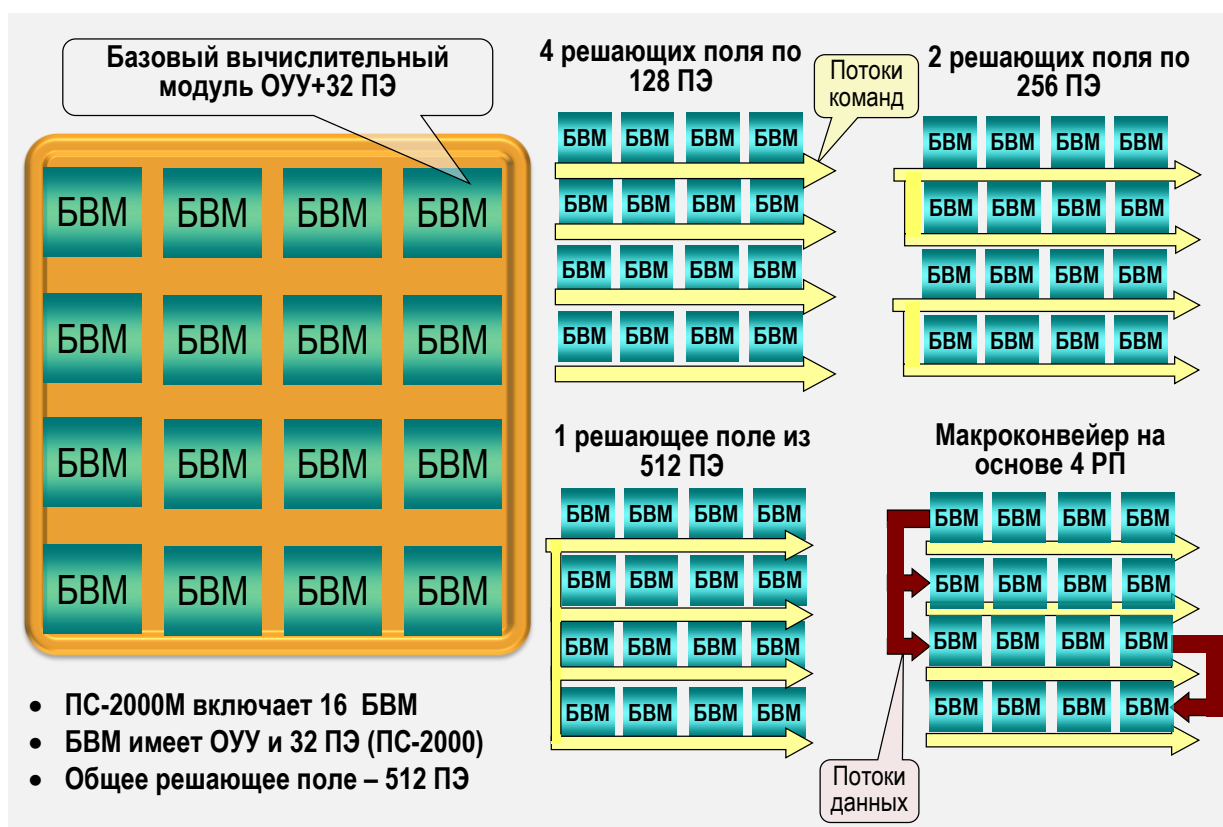


Рис. 1. MultiSIMD комплексование БВМ внутри кристалла

SIMD-архитектура ПС-2000М характеризуется:

- высоким соотношением производительность/стоимость, которое обеспечивается высокой гибкостью и, одновременно, простотой структурно-аппаратных решений;
- простотой управления, основанной на командах VLIW (простота дешифрации, конвейер команд организует оптимизирующий транслятор);
- наличием сегментируемого канала межпроцессорного обмена, который можно программно масштабировать под задачу
- масштабируемость: по числу ПЭ, по объему памяти,
- комплексируемостью в параллельные и конвейерные структуры как внутри кристалла, так и между кристаллами.

В традициях ПС-2000 с увеличением количества ПЭ архитектура ПС-2000М обеспечивает пропорциональный рост производительности на широких классах задач с массовым параллелизмом.

5 Оценка характеристик кристалла PC-2000M на технологии 90 нм

Перечисленные выше преимущества иллюстрируются на примере возможной реализации структурно-масштабируемой PC-2000M на промышленно доступной в РФ технологии 90 нм (см. табл.2).

В отсутствие детальных данных об отечественной технологии уровня 90 нм (имеются в виду данные по библиотекам логических элементов – быстродействие и площадь элементов, а также данные по площади и быстродействию блоков встроенной статической памяти), представленные ниже оценки являются ориентировочными. Оценка максимальной рабочей частоты взята из характеристик процессора NVIDIA реализованного по технологии 90 нм.

Таблица 2. Характеристики кристалла PC-2000M на технологии 90 нм

Параметры	Значения параметров	Комментарий
Рабочая частота (МГц)	600	
Формат операндов (количество разрядов)	32 16 8	основной формат (целочисленный, плавающий) масштабируемый (целочисленный, плавающий) масштабируемый (целочисленный)
Количество ПЭ в кристалле	256-512	
Количество одновременно выполняемых арифметических операций в каждом ПЭ	2 4 8	основной формат слова 32 разрядов масштабируемый формат 16 разрядов масштабируемый формат 8 разрядов
Объём ОЗУ в каждом ПЭ	8К-16К 16К-32К 32К-64К	32 разрядных слов 16 разрядных слов 8 разрядных слов
Пиковая производительность	300-600 Gflops 600-1200 Gflops 1200-2400 Gops	32-х разрядные операнды 16-ти разрядные операнды (для глубокого обучения) 8-ми разрядные операнды (для глубокого обучения)

В табл.3 приведены сравнительные характеристики ускорителей NVIDIA (90 и 40 нм) с PC-2000M (90 нм).

Таблица 3. Сравнительные характеристики NVIDIA и PC-2000M

Параметры	NVIDIA		PC-2000M
	Tesla G80	Fermi GF100	
Год производства	2006	2010	2025
Технология, нм	90	40	90
Рабочая частота, МГц	600	1500	600
Количество вычислительных узлов/ПЭ	128 специализированные	512 универсальные	256-512 ПЭ универсальные ядра
Пиковая производительность чипа, Gflops	345,6 (32 разр.) - -	1500 (32 разр.) - -	300-600 Gflops (32 разр.) 600-1200 Gflops (16 разр.) (для глубокого обучения) 1200-2400 Gops (8 разр.) (для глубокого обучения)
Реальная производительность в большинстве применений (% от пиковой)	~70%	10-25%	70-100% (околопиковый уровень)
	Tesla G80	Fermi GF100	
Год производства	2006	2010	2025
Технология, нм	90	40	90
Рабочая частота, МГц	600	1500	600
Количество вычислительных узлов/ПЭ	128 специализированные	512 универсальные	256-512 ПЭ универсальные ядра
Пиковая производительность чипа, Gflops	345,6 (32 разр.) - -	1500 (32 разр.) - -	300-600 Gflops (32 разр.) 600-1200 Gflops (16 разр.) (для глубокого обучения)

Параметры	NVIDIA		ПС-2000М
	Tesla G80	Fermi GF100	
	-	-	1200-2400 Gops (8 разр.) (для глубокого обучения)
Реальная производительность в большинстве применений (% от пиковой)	~70%	10-25%	70-100% (околопиковый уровень)

Из табл.3 видно, что по характеристикам ПС-2000М при одинаковой технологии 90 нм превосходит Tesla G80. Характеристики Fermi GF100, выполненной по технологии 40 нм, сопоставимы с характеристиками ПС-2000М (с учетом более высокой реальной производительности ПС-2000М), выполненной по технологии 90 нм. На малоразрядных операциях алгоритмов глубокого обучения достигается паритет и заметное превосходство.

Заключение

В данной статье на примере задач АСУ ТП АЭС проведена оценка возможностей создания конкурентоспособной элементной базы на основе отечественной архитектуры однокристалльных компьютеров ускорителей с массовым многопроцессорным параллелизмом, которая открывает возможности для импортонезависимого развития технологий «цифровых двойников».

В настоящее время проблемы создания отечественной элементной базы для высокопроизводительных вычислений является критически важной задачей достижения технологического суверенитета, без которого невозможно обеспечение безопасного и устойчивого развития. Сбалансированная для реализации на одном кристалле архитектура ПС-2000М обобщает уникальный опыт разработки многопроцессорного компьютера-ускорителя ПС-2000. Эффективность его оригинальной, не утратившей актуальность архитектуры, апробирована многолетней практикой высокопроизводительной промышленной обработки данных в различных сферах.

Анализ высокопараллельной архитектуры ПС-2000М показывает, что она обладает высоким потенциалом конкурентоспособности и по показателям удельной производительности в расчете на единицу площади кристалла, и по гибкости адаптации своей структуры к различным классам задач с массовым параллелизмом (как по вычислениям, так и по доступу к памяти).

ПС-2000М может широко применяться для ускорения вычислений при создании «цифровых двойников» в различных отраслях: нефтегазовой и нефтехимической, на транспорте, в строительстве. «Цифровые двойники» могут использоваться для экономии ресурсов, увеличения стабильности эксплуатации или функционирования реальных объектов, для упрощения процессов разработки и усовершенствования изделий, предотвращения аварий и сбоев на производстве.

Преимущества высокопараллельной архитектуры однокристалльного компьютера-ускорителя ПС-2000М открывают возможности достижения в ключевых сферах критических технологий приемлемых для развития технологий «цифровых двойников» параметров импортозамещения на доступных РФ СБИС-технологиях 90 нм.

Литература

1. *Полетыкин А.Г.* Виртуальная суперкомпьютерная модель для сопровождения и модернизации сложных систем управления в атомной энергетике / Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва). М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. С. 465-470.
2. "Росатом" разработает цифровые двойники АЭС малой мощности - Техэксперт (cntd.ru)
3. Росатом создает виртуальную АЭС (atomicexpert.com)
4. *Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Полетыкин А.Г., Прангишвили И.В., Промыслов В.Г.* Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // Автоматика и Телемеханика, 2006, № 5, С. 65-79.
5. *Промыслов В.Г., Полетыкин А.Г., Семенов К.В., Менгазетдинов Н.Э., Бывайков М.Е., Степанов В.Н.* Технология распределенной разработки по для АСУ ТП АЭС с использованием виртуализации и цифровых двойников / Труды 14-й Международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем" (MLSD-2021). М.: ИПУ РАН, 2021. С. 98-102
6. *Полетыкин А.Г., Промыслов В.Г., Семенов К.В., Менгазетдинов Н.Э., Жарко Е.Ф.* Применение цифрового двойника в жизненном цикле АСУ ТП АЭС / Материалы 2-й Международной научно-технической конференции "Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС" (Минск, 2021). Минск: БГУИР, 2021. С. 193-197., https://www.bsuir.by/m/12_120147_1_155334.pdf.
7. NVIDIA CUDA: Новая архитектура для вычислений на GPU.,

https://www.nvidia.ru/content/cudazone/download/ru/CUDA_rus.pdf.

8. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Многопроцессорный компьютер ПС-2000 / История отечественной электронной вычислительной техники. М.: ЗАО "Издательский дом "Столичная энциклопедия", 2014. С. 255-271, 507-508, 521-523.
9. *Wolcott P., Goodman S.E.* High-Speed computers of the Soviet Union // IEEE Computer. -1988. Vol. 21, -No 9. P. 32-41.
10. <https://habr.com/ru/post/501108/>
11. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А., Артамонов С.Е., Козлов В.А.* Элементы стратегии и архитектурные предпосылки опережения в области однокристалльных многопроцессорных компьютеров с массовым параллелизмом // Информационные технологии. 2014. №2. Приложение. С. 1-32.