ПС-2000 – МНОГОПРОЦЕССОРНЫЙ КОМПЬЮТЕР ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ С МАССОВЫМ ПАРАЛЛЕЛИЗМОМ

Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН
zvt@ipu.rssi.ru, elena.fish@mail.ru

Введение

В настоящее время активно развивается новая ниша компьютерного рынка по созданию однокристальных многоядерных компьютеров общего назначения (General Purpose – GP) с массовым параллелизмом. Этот рынок охватывает весь диапазон применений – от массовых устройств мобильной связи и встраиваемых систем управления, до суперкомпьютеров производительностью 1-1000 Пфлопс и более.

Наиболее известными примерами таких компьютеров служат графические процессорные устройства GP GPU (General Purpose Graphics Processing Units), выпускаемые фирмами nVIDIA и AMD (ATI), гетерогенные мультипроцессоры CELL, MIC Intel и другие, которые изначально специализировались и балансировалась *под узкие классы задач*. Так производители nVIDIA и AMD (ATI) начинали осваивать массовые рынки с изготовления графических ускорителей (видеоплат) для ПК. В ходе их развития к середине 00-х сформировался новый рыночный класс однокристальных многопроцессорных компьютеров – GPU (Graphics Processing Units)

Одним из родоначальников класса высокопроизводительных компьютеров общего назначения с массовым параллелизмом стал отечественный многопроцессорный компьютер ПС-2000 [1-5]. Это был один из первых в мире суперкомпьютеров, который выпускался большой промышленной серией и имел широкое народнохозяйственное применение в 80-е годы, а на некоторых объектах использовался до конца 90-х. Его оригинальная, структурно масштабируемая многопроцессорная архитектура доказала свою высокую вычислительную эффективность и экономическую рентабельность во многих сферах промышленной обработки данных, в научно-инженерных расчётах, в системах обработки потоков данных реального времени и больших объёмов данных (в том числе обработка космической телеметрии, гидроакустических сигналов дальнего обнаружения и др).

В сфере промышленной обработки геофизических данных он более чем успешно конкурировал с приобретёнными в обход эмбарго зарубежными суперкомпьютерами лучших мировых производителей. Уступая в десятки раз по рабочей частоте, ПС-2000 не уступал в реальной производительности и на порядки выигрывал в себестоимости производства и эксплуатации. Подтверждённый экономический эффект лишь на десятой части эксплуатировавшихся центров обработки сейсмоданных в целях поиска нефти и газа к середине 80-х составил сотни млн. в долларовом эквиваленте.

Важнейшая особенность высокопараллельной архитектуры ПС-2000 состоит в том, что её эффективность не определяется жёсткой привязкой к особенностям технологической базы. Это нашло подтверждение в том, что, несмотря на более чем скромные возможности задействованной элементной базы, по показателям абсолютной и реальной производительности компьютеры ПС-2000 благодаря преимуществам своей архитектуры в 80-е годы длительное время находились на достойных позициях мирового списка суперкомпьютеров Top500. При том, что рабочая частота в десятки раз уступала соседям по списку. По потенциалу совершенствования экономического показателя производительность/стоимость эта архитектура остаётся одной из лучших в своём классе и в настоящее время. По признанию зарубежных специалистов [6,7] ПС-2000 был одним из самых продвинутых и быстродействующих советских компьютеров.

По сути, ПС-2000 с опережением более чем на 2 десятилетия стоял у истоков нового класса высокопроизводительных систем – многопроцессорных компьютеров общего назначения для задач с массовым параллелизмом, отвечающих индустриальным требованиям многотиражного производства, применения и программирования.

Искусство творения компьютеров имеет свои вершины мастерства. Высокопараллельные многопроцессорные архитектуры, выходя за пределы классической модели последовательного счета, требуют от создателей нестандартного научного и здравого инженерного мышления. Здесь несогласованные мысли могут взлетать очень высоко, чтобы затем разбиться о жесткие реалии.

В этой рекордной области архитектурных тайн и сегодня остается значительно больше, чем найдено решений. И тем ценнее достижения, прошедшие проверку практикой большого промышленного производства и применения.

Оригинальные, выстроенные с большим, опережающим своё время, идеологическим запасом, архитектуры, не уходят в небытие вслед за устаревшей элементной базой.

1. Востребованные миллиарды

Создание высокопроизводительных вычислительных систем для обработки больших объёмов данных к середине 70-х годов стало высокоприоритетной народнохозяйственной задачей. Такие системы были необходимы: при промышленной обработке геофизических данных сейсморазведки для поиска месторождений нефти и газа, при обработке в реальном времени изображений, поступающих со спутников Земли для сельского хозяйства, картографии, метеорологии и т. п. Еще более мощные системы требовались при обработке в реальном времени телеметрической и акустической гидролокационной информации. Особенностью таких задач является то, что они эффективно решаются алгоритмами с массовым параллелизмом (на уровне простых операций и выше).

Ранее отечественное (как и зарубежное) компьютеростроение в разработках высокопроизводительных систем ориентировалось в первую очередь на задачи оборонного характера [3]. Закрытые институты, занимавшиеся многопроцессорными архитектурами, решали задачи специального назначения. Их многолюдные и крайне дорогостоящие разработки изначально не отвечали требованиям экономической рентабельности, поэтому не предназначались для удовлетворения быстро растущих потребностей народного хозяйства. Переход компьютеростроения в 70-х на выпуск ЭВМ третьего поколения (ЕС-ЭВМ – аналог серии IBM-360/370), не давал решения для многих острейших народнохозяйственных задач из-за недостаточной производительности, чрезмерной стоимости и сложности в обслуживании.

Так, для промышленной обработки собираемых в стране данных сейсморазведки месторождений нефти и газа, требовалась суммарная вычислительная мощность порядка 10-100 млрд. операций в секунду, что на порядки превышало совокупную мощность имевшегося в стране парка ЭВМ. Стало совершенно ясно, что кардинального увеличения производительности для решения важнейших народохозяйственных задач невозможно достичь за счет простого наращивания парка малопроизводительных, громоздких и дорогостоящих ЭВМ, выпускавшихся промышленностью.

2. Инновационный прорыв

Привлекательная новизна проектов академической науки далеко не всегда отвечает возможностям промышленного производства. Проблемы преодоления пропасти между наукой и производством остаются для нашей страны суперактуальными и сейчас. Тем более достоин внимания весьма успешный инновационный опыт компьютерного марш-броска из интеллектуально-заоблачного храма науки на земную твердь заводских линий сборки большой промышленной серии.

Для решения перечисленных выше задач в 1972-1975 г.г. в Институте проблем управления (ИПУ), находившимся в совместном подчинении Академии наук СССР и Министерства приборостроения СССР была предложена и научно обоснована структура и архитектура многопроцессорного компьютера ПС-2000. Небольшому авторскому коллективу в режиме свободного научного поиска удалось найти оригинальное структурное решение, которое соединило относительную простоту управления высокопараллельными вычислениями посредством единого потока команд с необычайно высокой гибкостью программирования и высокой эффективностью обработки многих потоков данных.

Найденные учёными ИПУ решения впервые ориентировали конструкторов на

проектирование ***сверхэкономичных суперкомпьютеров с рекордно высоким показателем производительности в расчете на единицу стоимости.*** Предварительные исследования и расчеты впоследствии подтвердились. Производительность серийных вычислительных комплексов ПС-2000 (рис. 1), достигала 200 млн. операций в секунду при весьма доступных стоимостных показателях до 800 тыс. руб. и низких расходах на эксплуатацию.

Рис. 1. Многопроцессорный компьютер ПС2000, содержащий 32 ПЭ. На переднем плане слева три светлые стойки

В нашем случае сроки прохождения компьютером ПС-2000 инновационного маршрута от научного замысла и результата к промышленному изделию оказались на удивление малыми. Притом, что маршрут относился к категории особо сложных, поскольку:

- оригинальная высокопараллельная архитектура не имела прямых аналогов (торить дорогу много труднее);
- опытно конструкторская разработка велась на предприятии далеко не самого могучего министерства и в рамках весьма скромного бюджета.

За период с 1975 по 1980 г.г. ИПУ совместно с НИИ УВМ (г. Северодонецк), входящим в состав НПО "Импульс"[1] (Министерство приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР[2]), выполнили полный комплекс НИОКР, разработку и изготовление опытной партии серийных образцов высокопараллельного многопроцессорного компьютера ПС-2000.

В декабре 1980 г. Госкомиссия приняла серийные образцы и санкционировала серийное производство высокопроизводительных вычислительных комплексов (ВК) промышленной обработки данных ПС-2000.

Восемь экземпляров всех конфигураций ВК ПС-2000, демонстрировавшихся перед комиссией на геофизических задачах, давали общую производительность около миллиарда операций в секунду, что превышало суммарную вычислительную производительность парка вычислительных машин страны.

Столь высокая производительность достигалась на хорошо распараллеливаемых задачах, которые характерны для многих практических применений. На серийных ВК ПС-2000 в ходе промышленного решения таких задач достигалось рекордное значение показателя "производительность/стоимость".

С 1981 по 1988 гг. Северодонецким приборостроительным заводом, входящим в НПО "Импульс", было выпущено 242 многопроцессорных компьютеров ПС-2000.

Отечественное компьютеростроение впервые в мире большим тиражом выпустило

[1] Научно-производственные объединения – промышленные инновационные оргструктуры, цель которых – преодоление комплексных проблем своевременного обновления продукции, выпускаемой промышленным предприятием.

[2] Далее – Минприбор

высокопроизводительный существенно многопроцессорный и высоко рентабельный компьютер общего назначения.

Важнейшую роль в преодолении дистанции между разработанным в ИПУ научным решением и возможностями технической реализации, которыми располагали производственники, сыграли два фактора.

Первый – фундаментальные качества высокопараллельной многопроцессорной архитектуры, сбалансированной и по арифметическим ресурсам, и по ресурсам памяти и ввода/вывода. Благодаря такой балансировке, а также совместному использованию высокоэффективных способов распараллеливания на уровне простых арифметических операций, действий с внутренней памятью на широких классах задач с массовым параллелизмом архитектура обеспечивала высокие (околопиковые) уровни полезной загрузки вычислительных ресурсов (процессорных элементов, памяти, ввода/вывода). Структурная масштабируемость архитектуры позволяет с увеличением числа процессоров пропорционально наращивать общую производительность – как арифметическую, так и пропускную способность памяти и ввода/вывода. Важнейшее качество архитектуры – инвариантность относительно элементной и технологической базы, что позволило в условиях жестких технических ограничений и существенных ментальных расхождений между учеными и проектировщиками найти приемлемый по эффективности и трудозатратам вариант воплощения

Второй фактор – организационный. Институт проблем управления был в двойном подчинении – Академии наук и Минприбора. Инновационный маршрут начинался от академической науки. Тесная связь ИПУ с академией и промышленным министерством резко снизила многочисленные барьеры на путях принятия решений о проведении ОКР на одном из лучших профильных предприятий министерства.

3. Многопроцессорный компьютер ПС-2000

Многопроцессорный компьютер ПС-2000 [1-5] предназначен для задач, обладающих массовым параллелизмом на уровне простых операций, и ориентирован на высокопроизводительную обработку данных по хорошо распараллеливаемым регулярным алгоритмам. Синхронная высокопараллельная обработка многих потоков данных в нем осуществляется под управлением общего потока команд, что свойственно SIMD-архитектурам (один поток команд, много потоков данных).

3.1. Архитектура

ПС-2000 состоит из набора однотипных процессорных элементов (ПЭ), связанных регулярным и магистральным каналом, и общего устройства управления (ОУУ), см. рис. 2.

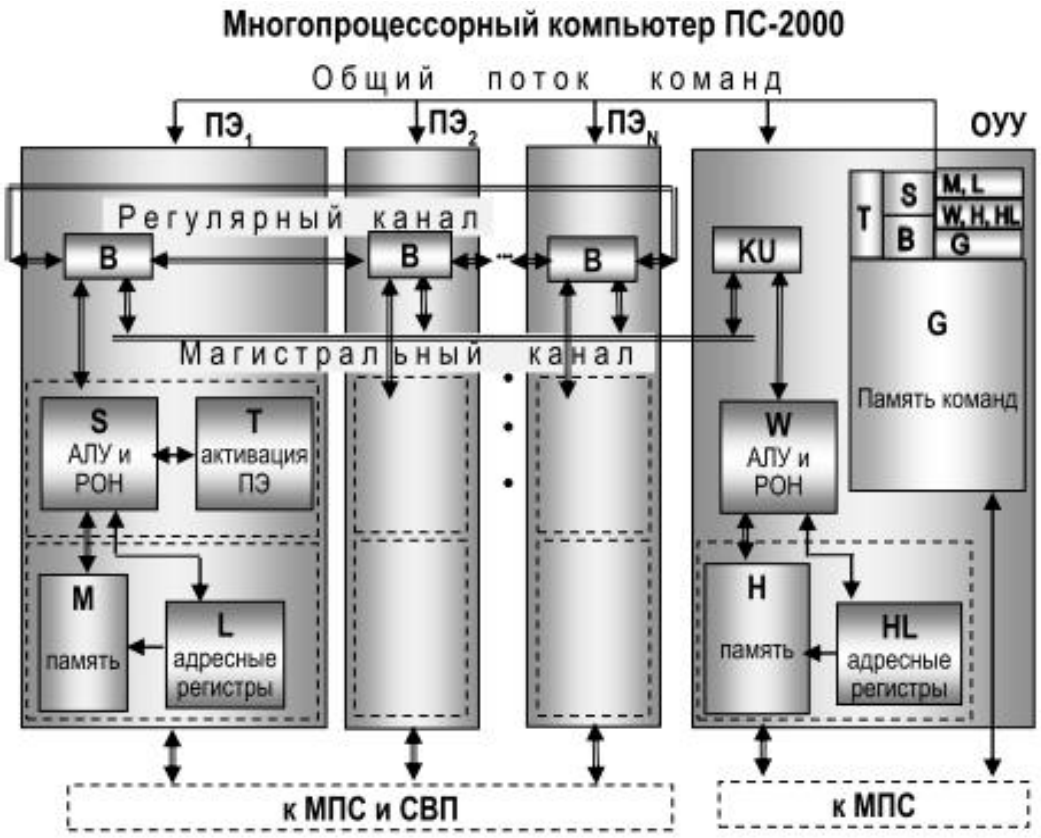

Рис. 2 Структура многопроцессорного компьютера ПС-2000

Каждый ПЭ, а также ОУУ состоят из нескольких функциональных устройств, включающих самую быструю в компьютере программно доступную регистровую память. Совокупность этих устройств (как в ОУУ, так и всех ПЭ) образует разветвленный конвейерный агрегат с программно конфигурируемыми связями. Каждое функциональное устройство составляет конвейерную ступень. Обмен данными между этими устройствами производится через общий для соседних ступеней регистр. Состав и назначение функциональных устройств каждого ПЭ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Компоненты процессорного элемента

Обозначение	**Название**	**Назначение**
T	логическое устройство активации	параллельное вычисление в наборе всех ПЭ одинакового программно задаваемого логического условия (активация ПЭ)
S	арифметико-логическое устройство для чисел с фиксированной и плавающей запятой с регистрами общего и специального назначения	параллельное выполнение в наборе всех активированных ПЭ арифметико-логических операций с промежуточными данными в одноименных регистрах
M	модуль оперативной памяти данных с произвольным доступом к слову	хранение одиночных данных и массивов в наборе модулей памяти всех ПЭ; быстродействие оперативной памяти меньше скорости регистров (в данной реализации – в три раза)
L	целочисленное арифметическое устройство с регистрами для хранения адресов	программно задаваемое параллельное вычисление во всех активированных ПЭ адресов доступа к соответствующим модулям оперативной памяти M

B	регистр регулярного канала	массовый обмен данными между соседними ПЭ в режиме двунаправленного кольца, число одновременно вращающихся колец задаётся программно посредством его сегментации по 8, 16, 32, 64 ПЭ.

Общее устройство управления (ОУУ) обеспечивает приём, хранение и исполнение программы многопроцессорного компьютера ПС-2000, генерацию и передачу общих для всех ПЭ управляющих сигналов, синхронизацию процессов обработки и ввода-вывода, тестирование ПЭ, а также связь с внешней мониторной подсистемой (МПС), которая обеспечивает системные и пользовательские функции вычислительного комплекса (ВК). Состав и назначение функциональных устройств ОУУ приведены табл. 2.

Таблица 2. Компоненты общего устройства управления

Обозна-чение	**Название**	**Назначение**
W	арифметико-логическое устройство для чисел с фиксированной запятой с регистрами общего и специального назначения	выполнение скалярных арифметико-логических операций с одиночными данными в регистрах ОУУ
H	модуль оперативной памяти данных с произвольным доступом к слову	хранение одиночных данных и массивов; обычно, быстродействие оперативной памяти, меньше скорости регистров (в данном случае – в 3 раза)
HL	целочисленное арифметическое устройство с регистрами для хранения адресов	программно задаваемое вычисление значения адреса доступа к модулю оперативной памяти H
KU	регистр магистрального канала	реализует передачу в режимах: -"один ко многим", при этом данные из KU доступны в качестве операнда в устройствах S всех активированных ПЭ; -"от многих к многим", при этом передача данных из активированных ПЭ -передатчиков осуществляется последовательно по цепи очерёдности.
G	память программ	память для хранения программ, от которой поступает многокомпонентный поток операций, задающий на каждом такте множество одновременно выполняемых действий для всех вышеперечисленных устройств всех ПЭ и ОУУ.

Перечислим особенности архитектуры ПС-2000, которые обеспечили ей высокую гибкость и эффективность вычислений.

- Команды отличаются повышенной функциональной гибкостью управления разнообразными видами аппаратного параллелизма. Это качество достигается за счет многоуровневого иерархического структурирования большого множества одновременно исполняемых операций.
- Виды программно управляемого машинного параллелизма:
  - одновременное выполнение во всех ПЭ множества разнотипных действий (активация, вычислительные операции, вычисление адресов, доступ к модулям оперативной

памяти, межпроцессорные пересылки данных по регулярному каналу);
    - одновременное выполнение любого, программно задаваемого подмножества разнотипных действий (действия в ПЭ; ОУУ; параллельный обмен данным между модулями оперативной памяти ПЭ и набором дисководов через автономные каналы системы внешней памяти – СВП; действия в мониторной подсистеме), управление процессами внешней операционной системы.
- Наличие значительных объемов регистровой памяти ПЭ, в которых параллельно во всех активных ПЭ реализуются массовые вычисления и межпроцессорные обмены при исполнении циклических участков программ. Для циклов с большим числом повторений доля обращения к более медленным модулям оперативной памяти ПЭ может быть малой. В этом случае регистры реализуют положительный эффект кэширования (причем с параллельным выполнением действий во многих ПЭ).
- Межпроцессорная конвейеризация регистровых вычислений через регистры B регулярного канала обеспечивает режим программируемых систолических структур, что дает предельно достижимый уровень параллелизма.
- Набор однотипных устройств адресной арифметики L ПЭ обеспечивает параллельный доступ к памяти M по набору адресов с возможностями инкрементной модификации этих адресов, а также параллельного доступа к памяти по произвольно вычисляемым наборам адресов.
- Набор однотипных устройств активации ПЭ обеспечивает высокий уровень параллелизма при ассоциативной обработке больших массивов данных (поиск и сортировки по программно задаваемым предикатным функциям, теоретико-множественные операции, обработка растровой графики, событийное управление вычислительными действиями и др.).

Оригинальная архитектура ПС-2000 соединила относительную простоту аппаратных решений систем управления одним потоком команд с беспрецедентно высокой гибкостью программирования высокопараллельной обработки одновременно многих потоков данных. Уникальная гибкость управления ПС-2000 ломает привычные представления о функциональных возможностях SIMD-компьютеров. Невероятно, но в серийном ПС-2000 было сделано, казалось, совершенно немыслимое для компьютеров этого класса. В ресурсах ПС-2000 на программном уровне была эмулирована многопроцессорная архитектура MIMD (много потоков команд, много потоков данных). При этом все ПЭ, работая параллельно под управлением устройств активации, могли одновременно выполнять каждый свою программу, загруженную в собственный модуль оперативной памяти. Например, 64-процессорный SIMD-компьютер ПС-2000 смог параллельно выполнять 64 потока разных программ. Существовавшие на тот момент SIMD-компьютеры этого делать не могли.

3.2. Система команд

Программирование ПС-2000 производится на уровне высокопараллельных строго иерархически структурированных команд, обеспечивающих наглядное и высокоэффективное управление всеми устройствами ПЭ и ОУУ [4,8]. Два верхних уровня иерархии структуры команды показаны на рис. 3.

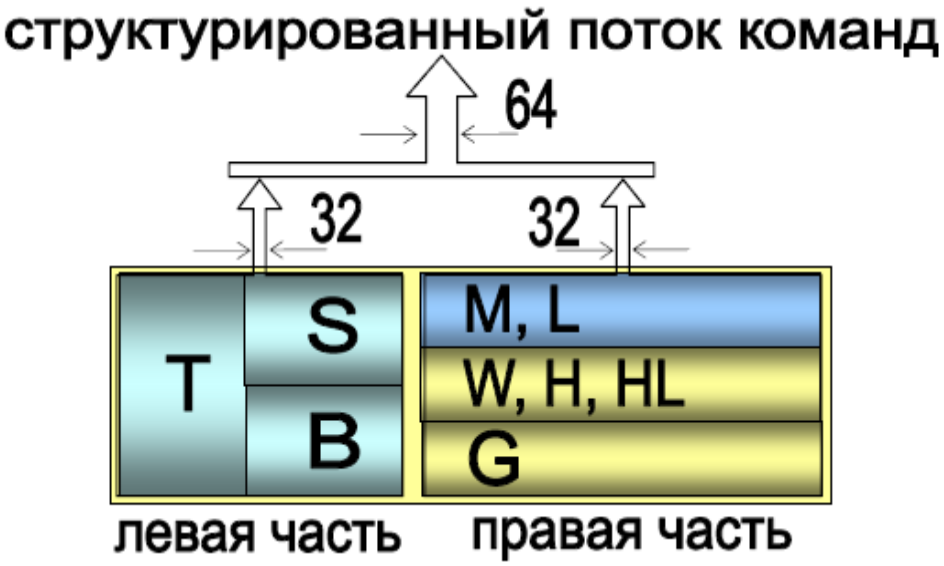

Рис. 3. Структура команды

Все команды имеют одинаковую "ширину" (в данной реализации – 64 бита) и разделены на две равные части – левую и правую. Каждая из частей разделена на поля. В каждом из полей задается набор трехадресных операций с регистрами для соответствующего устройства. В полях левой части задаётся управление устройством активации T и, далее, либо арифметикой S, либо каналами - регулярным B и магистральным K. В полях правой части задаётся управление устройствами либо M и L, либо W и H и HL, либо G (рис.2). По усмотрению программиста любые поля в команде могут не заполняться. Чем больше действий "упаковано" в каждой команде, тем выше параллелизм программы, больше эффективность использования вычислительных ресурсов и, естественно, скорость её выполнения. Искусство программирования данного многопроцессорного компьютера состоит в написании как можно более наполненных действиями полей команд.

Все заданные в каждой команде действия исполняются параллельно.

Команда в формальном виде отражает синхронно функционирующую структуру ПС-2000, что позволяет при программировании из нескольких независимых участков последовательных программ проводить (статически) их конвейеризацию посредством совмещения в одном уплотненном участке программы (см. рис. 4).

$t(A \rightarrow B \rightarrow C) = t(A)+t(B)+t(C) \approx 8*3 = 24$ такта

$t(R)=t(A \oplus B \oplus C) \sim \max\{t(A), t(B), t(C)\} \approx 8$ тактов

Рис. 4. Уплотнение независимых участков программ

Эффективность распараллеливания повышается за счет совмещения во времени разнотипных действий. Так, выполнение массовых вычислений в устройствах S ПЭ, совмещается с сопутствующими операциями (подготовка настроек, модификация адресов операндов, считывание операндов, запись результатов, управление конфигурацией решающего поля и т. п.). Таким образом, *ПС-2000 характеризуется максимальной глубиной*

распараллеливания на нескольких аппаратных уровнях, вплоть до уровня мельчайших операций с регистрами.

Эффективное управление реализуется на основе следующих принципов [8]:

- применение раздельных блоков памяти для хранения команд, векторных и скалярных данных с возможностью одновременного доступа к ним;
- применение значительных объёмов регистровой памяти в функциональных вычислительных устройствах;
- взаимодействие с памятью через независимые от вычислений действия чтение/запись с инкрементной/декрементной прямой, либо косвенной регистровой адресацией, и одновременно с общей, либо локально вычисляемой для каждого ПЭ (фигурной) адресацией;
- применение форматов команд одинакового размера, разбитых на поля, в которых задаются независимые трёхадресные регистровые операции;
- простая дешифрация команд;
- аппаратная поддержка исполнения команд;
- совмещение программным путём нескольких параллельно исполняемых действий разной длительности (совмещение нескольких статических конвейеров).

Подобные принципы получили распространение в более поздних зарубежных разработках компьютеров с VLIW-архитектурами [9]. Развитие предложенных принципов в применении к высокопараллельным компьютерным архитектурам актуально и в настоящее время.

Параллельная архитектура ПС-2000 позволяет эффективно решать независимые одинаковые задачи без обменов между ПЭ и с доступом к памяти ПЭ по общим адресам. Хорошо структурируемые программно настраиваемые каналы обменов данными и возможность доступа к локальной памяти ПЭ по наборам индивидуальных в каждом ПЭ адресам позволяют так же эффективно решать задачи с массовыми регулярными обменами между ПЭ и сложными алгоритмами расчета адресов доступа. Наличие вычисляемой по программируемым условиям активации ПЭ и возможности быстрого (на уровне регистров В) обмена данными между ПЭ позволяют решать задачи со сложными вычисляемыми условиями, динамически определяющими требуемую последовательность исполнения команд.

3.3. Масштабируемость

Многопроцессорный компьютер компонуется из модулей трёх типов, каждый из которых размещается в одной стойке. Модули масштабирования компонуются из устройства обработки (УО), состоящего только из 8 ПЭ, и ОУУ.

Состав модулей следующий:

- модуль базовый, имеет одно УО (8 ПЭ) и одно ОУУ;
- модуль наращивания 1, имеет одно УО (8 ПЭ);
- модуль наращивания 2, имеет два УО (16 ПЭ).

На рис. 5 показаны разные по числу ПЭ конфигурации многопроцессорного компьютера в стоечном исполнении модулей масштабирования.

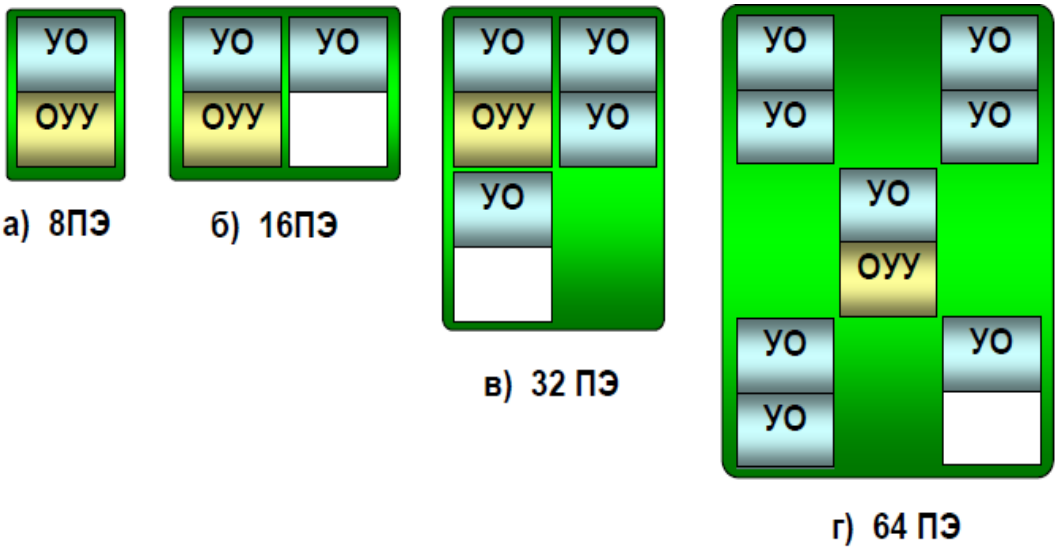

Рис. 5. Масштабирование ПС-2000 на уровне стоек

Размеры стойки 1800x1000x450 мм. Минимальная конфигурация (8 ПЭ) состоит из одной стойки (рис. 5,а). Максимальная конфигурация (64 ПЭ) состоит из пяти стоек, размещённых в виде "звезды" (рис. 5,г).

Масштабируемость архитектуры ПС-2000 обеспечивается программно на уровне системы команд, позволяющей изменять количество ПЭ и объём памяти в ПЭ. Регулировка числа ПЭ обеспечивается сегментацией регулярного и магистрального каналов. Инкрементная/декрементная прямая или косвенная регистровая адресация памяти M позволяет адресовать от 4 до 16Кслов в каждом ПЭ при общей и локальной адресации.

3.4. Технические характеристики

Элементная база мультипроцессора ПС-2000 - интегральные микросхемы средней степени интеграции типа К531 (с диодами Шоттки), К155, ОЗУ - К565 РУ5, К565РУ6.

Устройства ПС-2000 реализованы на базе унифицированных конструкций СМ ЭВМ. Блоки элементов - на основе печатных плат типа Е2 (233 х 220 мм).

Платы четырехслойные по 4-му классу, материал - гальваностойкий стеклотекстолит СФ или стеклопластик СТЭК толщиной 1,5 мм, с шагом координатной сетки - 1,25 мм. Число интегральных микросхем на плате Е2 - 54 шт. Соединители СНП 59 - низкочастотный прямоугольный.

Изготовление с использованием автоматизации процессов литья, штамповки, монтажа радиоэлементов.

Устройство S работает с 24-разрядными регистровыми операндами. Однотактные арифметические операции с фиксированной запятой и логические операции над словами выполняет за 0,32 мкс. С плавающей запятой: сложение/вычитание – в три такта за 0,96 мкс, умножение – в 5 тактов за 1,6 мкс.

Объём одного модуля памяти данных M или H – 16K 24-разрядных слова, операции считывания или записи выполняются пословно за 0,96 мкс. Объём памяти программ G – 16K 64-разрядных слова. Время выдачи каждой команды - 0,32 мкс, время выполнения операции ветвления от 1,28 до 1,92 мкс.

Регулярный канал обеспечивает массовый обмен данными в режиме сегментируемого кольца между соседними ПЭ. За 0,32 мкс производится передача и приём N 24-разрядных слов, где N - количество ПЭ в ПС-2000.

Магистральный канал (рис. 2) обеспечивает либо "широковещательную" ("один ко многим") передачу одного 24-разрядного слова всем активным ПЭ из регистра KU ОУУ в один такт за 0,32 мкс, либо передачу" от многих к многим", которая осуществляется последовательно по цепи очерёдности из активированных ПЭ-передатчиков, из любого ПЭ в два такта – за 0,64 мкс. Регулярный и магистральный каналы могут программно сегментироваться на несколько не связанных между собой одинаковых фрагментов размером 8, 16, 32 или 64 ПЭ.

Пиковая производительность ПС-2000 с 64 ПЭ составляет 200 млн. операций в секунду при выполнении расчетов с фиксированной запятой и 50 млн. операций в секунду с плавающей запятой. Таким образом, в 80-х годах ***64-процессорный ПС-2000, имея тактовую частоту 3 МГц, для пользователя работал как компьютер с частотой 200 МГц.***

3.5. Об особенностях программирования

Основным языком программирования многопроцессорного компьютера стал МИКРОКОД ПС-2000 [10,11]. Его лаконичная и формализованная мнемоника, задающая семиотическую модель объекта управления, отражает стройную иерархию системы команд ПС-2000. Логически мощная и высокопараллельная (с многими полями управления вычислительным и машинным параллелизмом) команда МИКРОКОДа ПС-2000, составленная из хорошо структурированной совокупности операторов предоставляет максимально доступные в архитектуре возможности распараллеливания с предельно высокой эффективностью использования ресурсов многопроцессорного компьютера. Программная настройка конфигурации (число ПЭ, объём памяти в ПЭ, сегментация каналов межпроцессорных обменов) обеспечивали возможность создавать программы промышленного применения, инвариантные к разным конфигурациям многопроцессорного компьютера ПС-2000.

Эти качества обеспечили его популярность. На МИКРОКОДе ПС-2000 в различных городах страны (Москва, Новосибирск, Рязань, Калинин, Северодонецк, Ереван, Таллин и др.) работали сотни программистов.

Создание параллельных программ для ПС-2000 требовало особого искусства. Эффективность использования машинных ресурсов ПС-2000 удивляла самих разработчиков.

Ощущение прорыва в будущее испытали многие программисты, имевшие прототипы программ на обычных машинах средних и старших классов. На некоторых задачах время счёта ускорялось в сотни раз. Повышенное напряжение творческих сил, которого требовала высокопараллельная машинная среда от программиста, как правило, компенсировалось профессиональным удовлетворением результатами работы.

3.6. Экспедиционный геофизический комплекс ПС-2000

В состав экспедиционного геофизического комплекса (ЭГВК) ПС-2000 [12], см. рис. 6, входит многопроцессорный компьютер, мониторная подсистема (МПС) и от одной до четырёх подсистем внешней памяти (СВП), обеспечивающих параллельно-асинхронную работу нескольких каналов ввода/вывода в режиме одновременного функционирования многих магнитных носителей информации (на дисках и лентах).

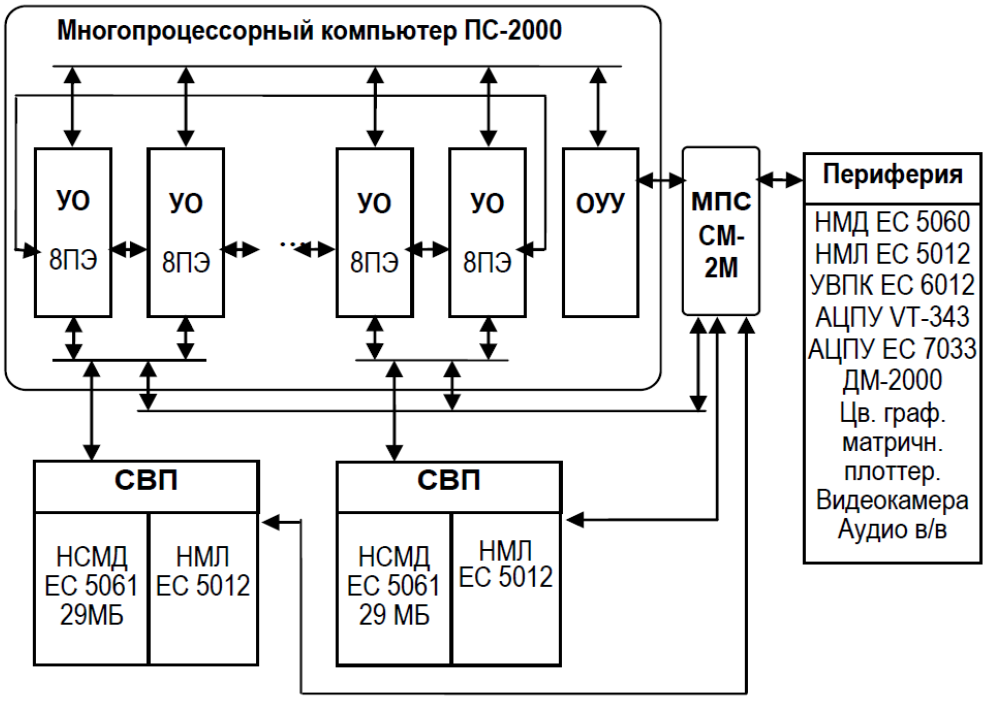

Рис. 6 Структура ЭГВК ПС-2000

При работе с физическими объектами в реальном времени возможно подключение потоков информации к распределённой по ПЭ памяти ПС-2000 как через СВП, так и через специальные высокоскоростные каналы.

Мониторная подсистема (МПС) на базе малой управляющей ЭВМ СМ-2М реализует функции операционной системы, управляет асинхронным функционированием нескольких СВП, осуществляет трансляцию, редактирование текстов, исполнение вспомогательных программ, управление собственной периферией, включая внешнюю память, различные средства ввода/вывода.

3.7. О сферах применения

Областью наиболее широкого промышленного применения ВК ПС-2000 стала геофизика, которая объективно нуждалась в компьютерах такого класса. Быстрорастущие стеллажи из внушительных катушек магнитных лент (размером с большую тарелку каждая) с записями данных сейсморазведки, годами хранивших нефтяные и газовые секреты в ожидании глубокой компьютерной переработки в целях определения промышленно пригодных месторождений нефти и газа, предопределили успех ПС-2000.

Уже в 70-е годы сейсмическая разведка настолько успешно "просвечивала" и записывала на ленты километровые глубины недр Родины, что, буквально, с головой засыпала катушками архивы вычислительных центров. В год удавалось расшифровывать лишь несколько процентов того, что ежегодно поступало от 1000 геофизических партий за один сезон разведки.

Для обработки данных сейсмической разведки месторождений нефти и газа во ВНИИ "Геофизика" (г. Москва) при участии ИПУ была создана (под руководством Крейсберга В.М.) система промышленной обработки геофизической информации СОС-ПС. В отрасли в полевых условиях геофизических экспедиций успешно эксплуатировалось около 90 ЭГВК ПС-2000, обеспечивавших ранее недоступную углублённую (вторичную) обработку значительной части данных сейсморазведки нефти и газа.

ЭГВК ПС-2000 создавался в соответствии с требованиями Министерства геологии и являлся единственной в стране рабочей станцией полностью оснащённой всем необходимым оборудованием для обработки данных сейсморазведки в полевых условиях [12]. ЭГВК ПС-2000 не требовал большой площади, имел сравнительно малое энергопотребление, низкие эксплуатационные расходы, обеспечивал высокую надёжность при работе в условиях геофизических экспедиций, его стоимость составляла около 800 тыс. рублей, что было в десятки раз меньше стоимости зарубежных систем.

Модульная масштабируемость, недорогая и неприхотливая элементная база, не требующая особых условий охлаждения, обеспечили высокую надежность и ремонтопригодность многопроцессорного компьютера ПС-2000, что позволило в условиях полевых экспедиций обеспечить среднесуточную наработку ВК ПС-2000 порядка 20-23 часов.

Среди применявшихся отечественных и импортных систем обработки сейсморазведочных данных ЭГВК ПС-2000 отличался наивысшим отношением производительности к стоимости (в 5 раз и более по сравнению с ЭВМ CYBER со спецпроцессором MAP и ЭВМ ЕС-1055 со спецпроцессором СЦС-3).

Применение ЭГВК ПС-2000 позволило отказаться от импорта дорогостоящих зарубежных вычислительных комплексов, что сэкономило для государства более 100 млн. инвалютных рублей. Подтвержденный экономический эффект, полученный от использования только двух ПС-2000, установленных в геофизических экспедициях ГЭМОИ (г. Наро-Фоминск) и КГЭ (п. Поваровка) Мингео СССР составил в 1984 году - 11,35 млн.руб., а в 1985 году - 14,87 млн.рублей. Подтверждённый экономический эффект от использования полутора десятков ЭГВК ПС-2000 составил более 200 млн. инвалютных рублей (1и.р.=$1.43), при том, что на разработку компьютеров ПС-2000 было затрачено около 15 млн. обыкновенных руб.

На базе нескольких комплексов ПС-2000 были созданы высокопроизводительные (до 1 млрд. операций в секунду) системы обработки гидроакустической и телеметрической информации в реальном масштабе времени. Каждая система содержала несколько ВК ПС-2000, соединённых в конвейер. Для многоканального ввода и вывода гидроакустической, спутниковой информации для таких систем создавались специализированные высокоскоростные каналы с

прямым доступом в распределённую память М каждого ПЭ.

ВК ПС-2000 активно и длительное время использовались в центре управления космическими полётами (ЦУП). Первые комплексы ПС-2000 поступили в ЦУП в 1982 г., последние – в 1988 г. Всего было задействовано восемь 32-процессорных комплексов.

В космическом центре управления полетов (ЦУП) ВК ПС-2000 использовались с 1982 г. В составе телеметрического вычислительного комплекса ЦУП-М (см. рис. 7) в качестве системы предварительной обработки телеметрической информации использовались по 1997 г. Начиная с 1986 г. они использовались для обеспечения следующих космических объектов: станции “Салют” (на заключительном этапе ее существования); станции “Мир”, включая базовый модуль; технологических и научных модулей “Квант-1”, “Квант-2”, “Кристалл”, “Спектр”, “Природа”;, транспортных кораблей “Союз-ТМ”; грузовых кораблей “Прогресс”, “Прогресс-М”; многоразового космического корабля “Буран”; аппаратов дальнего космоса “Фобос-1”, “Фобос-2”, научного модуля “Гамма”.

Рис. 7. ВК ПС-2000 в ЦУП (темные стойки на дальнем плане)

Высокий параллелизм обработки информации в ПС-2000 позволил реализовать новые алгоритмы обработки телеметрической информации. К одной центральной системе "Эльбрус-2" была подключена пара 32-процессорных ЭГВК ПС-2000 для обработки восьми полных потоков телеметрии[1]. С целью повышения надежности параллельно работали два телеметрических комплекса, а на динамических участках полета космических объектов – три.

Также ВК ПС-2000 использовались в различных сферах для моделирования и научно-инженерных расчётов, а также для обработки данных в реальном времени в составе испытательных стендов, систем управления и др.

3.8. Задача сейсмической миграции

Одной из наиболее представительных задач широкого промышленного применения для ПС-2000 явилась задача сейсмической миграции [5, 13, 14]. Это пример задачи, в которой на одно вводимое данное приходится много вычислительных действий, что позволило продемонстрировать достоинства архитектуры ПС-2000, обеспечив максимальное использование всех видов машинного параллелизма многопроцессорного компьютера, включая заявленную пиковую производительность 200 Mips.

На рис. 8 представлена схема получения данных сейсмической разведки и последующего расчёта глубинного разреза земли. На поверхности земли с интервалом 25 м расставлены датчики, которые каждые 2 мс фиксируют отражённые от границ сред с различной плотностью сигналы, поступающие от источника сейсмических волн.

[1] Такой комплекс можно рассматривать как прототип современных петакомпьютеров с гибридной архитектурой, в которой совместно функционируют многопроцессорные кластеры общего назначения (MIMD) и высокопараллельные ускорители (SIMD) с массовым параллелизмом. В телеметрических комплексах ЦУП – это Эльбрус-2 и ПС-2000, соответственно.

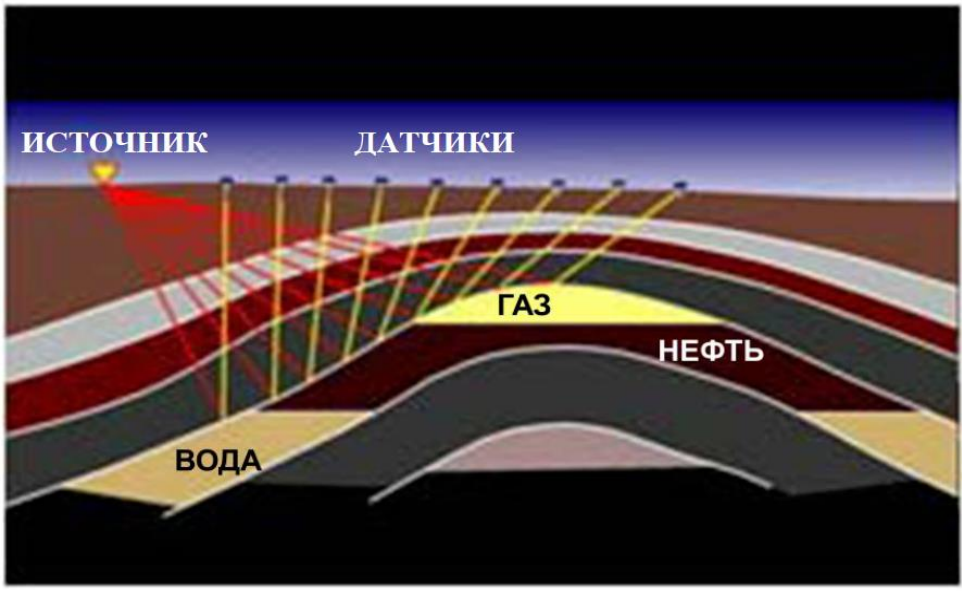

Рис. 8. Схема получения экспериментальных данных для сейсмического моделирования глубинного разреза земли (рисунок из Сети)

Временной разрез земли рассчитывается по данным сейсморазведки недр, содержащим 1000÷2000 сейсмотрасс, привязанным к точкам на поверхности земли с пространственными координатами x_i, в которых установлены датчики (рис. 8). Каждая сейсмотрасса содержит 3000 значений измерений, каждое значение имеет свой момент времени t_j.

Входные данные – зафиксированные датчиками отражённые сигналы (сейсмотрассы) – на рис. 9 расположены под осью x в виде вертикальных волнистых кривых. Все точки этих кривых задаются матрицей чисел $f(t_j,x_i)$.

Выходные данные расположены над осью x, также в виде вертикальных волнистых кривых, которые представляют собой мигрированный временной разрез. Он представлен матрицей $F(t_j,x_i)$, полученной в результате обработки методом быстрого сейсмоголографического преобразования Кирхгофа [15], суть которого состоит в прямом интегрировании цилиндрического волнового уравнения. Кривые годографов для каждой искомой точки вычисляются в соответствии с формулой (1) имеют "гиперболический" вид, изображённый на рис. 9 под осью x.

$$\left\|F\left(\tilde{t}_j,\tilde{x}_i\right)\right\| = \sum_{k=(\tilde{x}_i-A/2)/\Delta x}^{(\tilde{x}_i+A/2)/\Delta x} f\left(t_{\varphi(\tilde{t}_j,\tilde{x}_i,x_k)},x_k\right), \qquad (1)$$

где $t_{\varphi(\tilde{t}_j,\tilde{x}_i,x_k)} = \frac{r(\tilde{t}_j,\tilde{x}_i,x_k)}{v(\tilde{t}_j,\tilde{x}_i)}$,

$$r\left(\tilde{t}_j,\tilde{x}_i,x_k\right) = \sqrt{(\tilde{x}_i - x_k)^2 + (\tilde{t}_j \times v(\tilde{t}_j,\tilde{x}_i))^2},$$

$v\left(\tilde{t}_j,\tilde{x}_i\right)$ – внешние параметры, среднелучевая скорость в точке $\left(\tilde{t}_j,\tilde{x}_i\right)$.

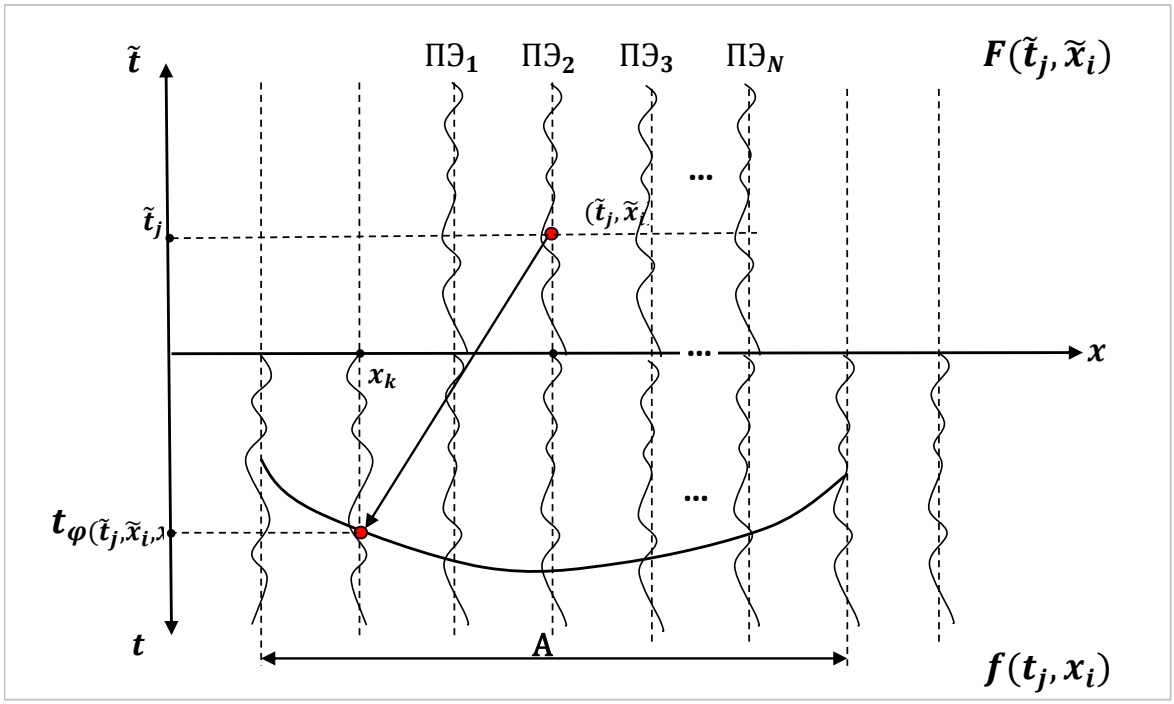

Рис. 9. Интегрирование по годографу в пределах апертуры

На рис. 10 приведено ядро массовых вычислений программы сейсмической миграции (1), написанное на МИКРОКОДЕ ПС-2000.

```
01630  ****
01631  *
01632        ZC(C+RD);
01633      ZM(C+RD);
01634        ZCNL;
01635             P(B=C);
01636         B(+1);
01637             P1(C=B)          ¤      WA(U=I3+1);     FI ->RD
01638        RD=C;
01639             P(B=R5)          ¤      I3=U;
01640  B(+1) ¤ MR(L0);
01641        P1(C=B);
01642         R5=C ¤ G(BEPT)/U<=J7;
01643  *****
01644             P(M=RD)     ¤     U=I8;
01645             P(C=R5)     ¤     MUW,WA(U=U+1);  ЗАПИСЬ В М FI
```

Рис. 10. Вычисление в N ПЭ значений $F(t_j,x_i)$, (i=1,N) с записью N результатов одновременно в N ПЭ (здесь последовательность трех операций: 1) ZC(C+RD); 2) ZC(C+RD); 3) ZCNL;.задаёт сложение с плавающей запятой)

На рис. 11 приведен временной разрез до и после миграции. Обработка графики также производилась на ПС-2000 по специально разработанным алгоритмам.

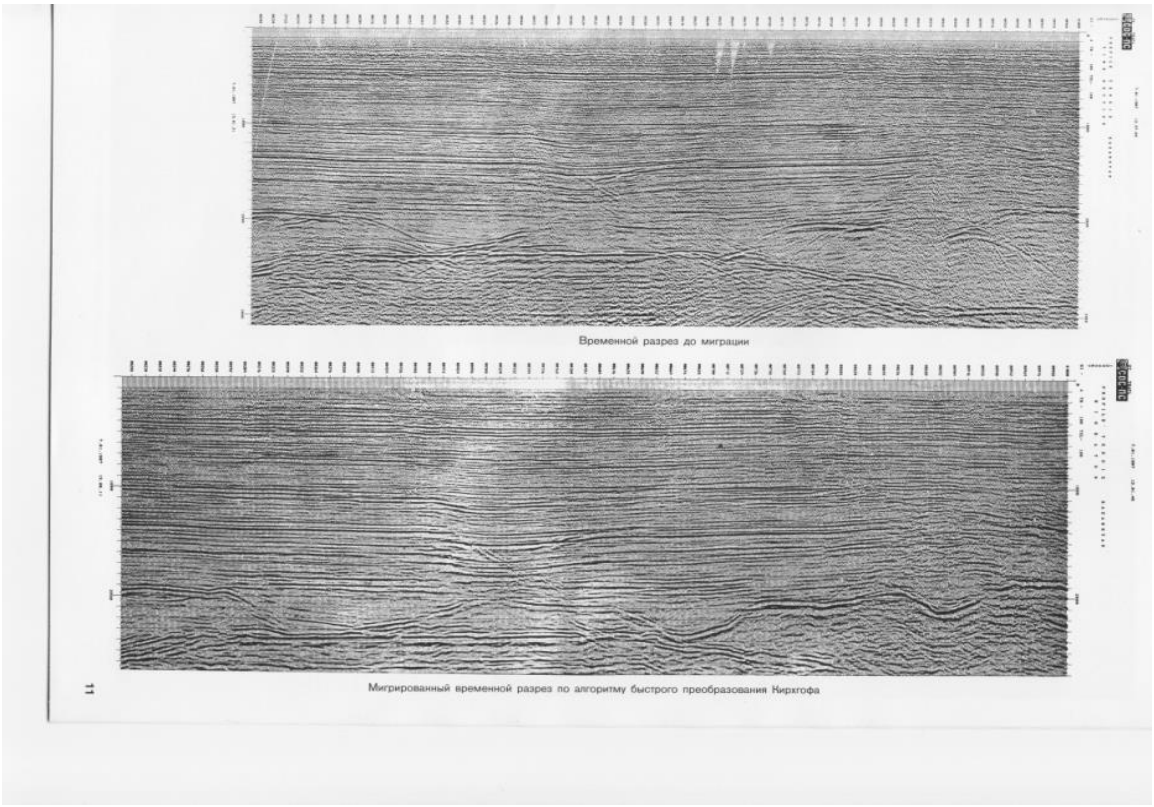

Рис. 11. Временной разрез до и после сейсмической миграции [15] (вычисления и графика выполнены на ПС-2000 [13]).

Решение задачи сейсмической миграции на ПС-2000 позволило ввести в повседневную практику геологоразведочных экспедиций вторичную обработку промышленных данных сейсморазведки. Ранее решение этой задачи было возможно только в стационарных условиях региональных вычислительных центров, при этом обработка одного разреза на БЭСМ-6 занимала более 5 часов против 3-7 минут на ПС-2000.

Производительность близкая к пиковой (~99%) достигнута за счёт полного использования всех видов аппаратного параллелизма:

- массовые вычисления и межпроцессорные обмены производятся с данными, расположенными в регистрах;
- выборка данных из памяти производится параллельно во всех ПЭ по индивидуальному для каждого ПЭ адресу и совмещается во времени с массовой обработкой в регистрах;
- подготовка и прием внешних данных системой внешней памяти (СВП) и ввод/вывод данных в/из память ПЭ по каналу прямого доступа производятся параллельно между собой и с обработкой.

В GP GPU nVIDIA при решение задачи сейсмическогой миграции используется 15% пиковой производительности. Одна из причин – обращение к общей памяти, которое занимает около 800 тактов, по случайным, вычисляемым в ходе решения задачи адресам к значениям функции $f(t_j,x_i)$, что не позволяет формировать данные для считывания строки в темпе выполнения вычислительной обработки.

4. Инновации: политика, государство и люди

Инновации – это всегда личности. Разных поколений, опыта, профессий, положений. Неравнодушные, способные не только заглянуть в будущее, но изменить привычное течение. ПС-2000 с этим повезло.

4.1. Смотрины по-американски

Биография компьютера ПС-2000 не обошлась без политики.

Следует признаться, вездесущие Штаты и здесь "поучаствовали". Весьма необычным образом для наших непростых отношений с компьютерной (и не только) сверхдержавой. Обычно, кое-что из соблазнительных компьютерных достижений заносило в нашу страну

холодным западным сквозняком через случайные щели в высоких заборах эмбарго. Конечно же, не в виде лицензий, чаще в виде действующих образцов для подражания. Над ними неустанно трудились, под некоторые создавали НИИ, заводы, даже целые города. Все знают Зеленоград. С тех времён думать об опережении в компьютерных сферах, особенно в части элементной базы, считается у нас нескромным. А сегодня уже и вовсе неприличным. Да и некогда было думать: наше качество и количество никак не хотело успевать за их новыми образцами.

В нашем случае ситуация была непохожей. К материализации опережающих идей и производству ПС-2000 нас подтолкнули не коллеги-компьютерщики, а политики. Самые большие. Главы двух самых сильных государств.

Любопытная и небанальная история из "детского" дневника компьютера ПС-2000.

Карибский пик холодной войны и вьетнамское противостояние довели руководство двух самых могучих стран и весь остальной мир до нервного истощения. Равным по силе требовалась передышка, которую назвали "разрядка". В мае 1972 года в Москву прилетел Президент США Р. Никсон. На высшем уровне был подписан договор об ограничении стратегических вооружений (ОСВ-1).

В 1973 г. Л. Брежнев с ответным визитом посетил США. "Разрядка" (прообраз "перестройки" и "перезагрузки") закреплялась не только в дипломатии и расширяющейся международной правовой базе. "Под раздачу слонов" стали налаживаться каналы взаимодействия и в научно-технической сфере. Американцы проявили повышенный интерес к перспективным исследованиям в области высокопроизводительных компьютеров, что вполне объяснимо ввиду растущих ограничений натурных испытаний ядерных вооружений.

В 1973 г. призывы к "разрядке" и "мирному сосуществованию" доросли до призывов к научно-техническому сотрудничеству. В 1974 году к нам в страну прибыла высокопоставленная делегация корпорации CDC (Control Data Corporation) – суперкомпьютерного авторитета и кумира 70-х. Представительной делегации под руководством вице-президента Р. Пиркинса разрешили показать самые смелые компьютерные идеи немногих открытых научных центров страны.

В этот не очень обширный список того, что можно было показать, попал и Институт проблем управления. В мае-июне делегация в течение двух недель изучала поисковые проекты, осуществляемые под руководством И.В. Прангишвили, благодаря усилиям которого в ИПУ сложилась передовая для того времени школа исследований в области однородных и ассоциативных вычислительных структур.

Поняв много раньше других стратегическое значение и чрезвычайную перспективность применения высокопараллельных компьютерных архитектур в гражданских применениях, И.В. Прангишвили, будучи молодым зам. директора Института проблем управления АН СССР (в настоящее время ИПУ РАН), уже получил признание своих начинаний. Осознавая высокую новизну, наукоёмкость и междисциплинарный характер проблем построения компьютеров с параллельными архитектурами, в начале 70-х при активной поддержке академика В.А. Трапезникова – директора Института – он сформировал в своей лаборатории несколько исследовательских групп, которым поручил проведение свободного научного поиска идей построения компьютеров с высокопараллельными архитектурами.

Поначалу приоритетными направлениями поиска стали однородные структуры [16] и ассоциативные принципы обработки данных. Тогда эти направления были передовым краем научных исследований, настолько новыми, что ещё не могли опираться на обширный практический опыт. Безошибочное инженерное чутьё, интуиция прирождённого лидера подсказали И.В. Прангишвили, что в такой ситуации требуется сформировать ещё одно – "запасное" – направление поиска, в котором новомодные новации не станут доминировать над уже известным в мире инженерным опытом построения высокопроизводительных

многопроцессорных компьютеров.

В начале 1972г. он пригласил к себе в лабораторию к.т.н. И.Л. Медведева, уже зарекомендовавшего себя в Институте как творчески активного, яркого инженера, новаторского и напористого конструктора.

В одном из нескольких независимых проектов, инициированных И.В. Прангишвили, к 1973г. были сформированы научные основы и инженерные принципы воплощения Однородного Ассоциативного Мультипроцессора (ОАМП), который стал прообразом многопроцессорной архитектуры, позднее получившей название ПС-2000. Идеологию этой архитектуры, обобщившей идеи "мелкозернистой" однородности и ассоциативной обработки до уровня многопроцессорных структур, формировал И.Л. Медведев с небольшой группой сотрудников (А.А. Чудин, Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко).

В концепции ОАМП архитектура высокопараллельного многопроцессорного компьютера прорисовалась уже достаточно отчётливо. Один из докладов на встрече с делегацией CDC был посвящён этой новой идеологии. Яркий и эмоциональный доклад И.Л. Медведева был воспринят авторитетной делегацией с нескрываемым энтузиазмом и повышенным вниманием к необычной идеологии, образно и убедительно выраженной инженерным языком. Так состоялись международные смотрины будущего отечественного рекордсмена.

По результатам поездки группы американских экспертов в страну было выделено несколько перспективных проектов, в число которых вошли предложения Института проблем управления. Делегация подписала весьма смелый по тем временам протокол о намерениях расширить сотрудничество по совместному продвижению разработок, предложенных Институтом проблем управления. Позднее, после анализа результатов работы делегации, из CDC поступило предложение о строительстве в нашей стране заводов по производству элементной базы – больших интегральных схем (БИС) и высокопроизводительных компьютеров совместной разработки. Руководство CDC неоднократно сообщало, что в конце 1974 г. ожидает получить от своего правительства разрешение на полномасштабное сотрудничество.

Такого феерического сценария никто не мог и предположить. Но политика, как известно, не любит прямолинейных траекторий. Осенью 1974 г. в США, накануне получения обещанного разрешения, была принята поправка Джексона-Вэника, запрещающая экономическое сотрудничество с нами в области высоких технологий.

Чудо-альянса с заграницей не случилось. Но правильный вектор развития руководство ухватило. Пока CDC боролась со своей бюрократией, академик В.А. Трапезников и Министр К.Н. Руднев (Министерство приборостроения средств автоматизации и систем управления) добились поддержки на верхних уровнях и было принято решение разрабатывать новые компьютеры своими силами, с подключением к ИПУ предприятий Минприбора.

4.2. Инновации – беспокойный союз науки и производства

В Минприборе была сформирована государственная программа по разработке высокопроизводительных параллельных компьютеров с перестраиваемой структурой. Головной организацией был назначен Институт проблем управления. Научное руководство программой было возложено на И.В. Прангишвили. В качестве организаций соисполнителей был предоставлен выбор из двух главных отраслевых научно-производственных объединений (НПО), включающих и конструкторские, и производственные мощности. Выбор между ИНЭУМ (г. Москва) и НИИ УВМ (г. Северодонецк) был сделан в пользу НИИ УВМ НПО "Импульс" (директор В.В. Резанов), серийно выпускавший популярные управляющие вычислительные машины (УВМ) СМ-1 и СМ-2, относящиеся к классу мини-ЭВМ.

Инженерное проектирование и конструкторские разработки ПС-2000 в НИИ УВМ поручили отделу И.И. Итенберга. Притирка академической науки (сотрудники разросшейся группы И.Л. Медведева, а также вновь созданной лаборатории программистов С.Я. Виленкина и разработчиков-производственников (отдел И.И. Итенберга) проходила в жарких дискуссиях. Но вполне конструктивно и достаточно быстро. С 1974 по 1975 г. по совместным планам был разработан эскизный проект, составлены совместные планы.

В 1975 г. по распоряжению Министра начались совместные НИОКР. Несмотря на новизну архитектуры, не имевшей аналогов, проект ПС-2000 осуществлялся очень быстро. Уже в 1978 г.

в ИПУ был установлен полнофункциональный макет 64-х процессорного компьютера ПС-2000.

4.3. Инновации – дело государственное

В декабре 1978 года в ИПУ состоялось выездное заседание руководителей высокого государственного уровня, которые приняли решение о финансирования работ по созданию опытных образцов ЭГВК ПС-2000.

Принятие государственных решений требует полноты знаний о состоянии ведущих отраслей народного хозяйства и наличие стратегии его развития, правильной оценки интеллектуальных и производственных ресурсов, подбор ответственных лиц, способных воплотить полный инновационный цикл – от научных идей до промышленного освоения.

Определение перспектив и принятие решений о промышленном производстве и применении ВК на базе ПС-2000 проводилось на высоких государственных уровнях.

Н.К. Байбаков – Председатель Госплана СССР (1965-1985), ранее Министр нефтяной промышленности (1944-1955). Обладая необходимой полнотой знаний о текущем состоянии народного хозяйства и стратегией его развития, увидел основные отрасли применения перспективных высокопроизводительных и экономичных ВК ПС-2000. Как показало время, правильно определил головного заказчика – Министерство геологии СССР (Мингео).

Е.А. Козловский – Министр Мингео (1975–1989), его ведомство обладало развитой общесоюзной информационной инфраструктурой сбора, накопления и первичной обработки промышленных сейсморазведочных данных при поиске нефти и газа, в основе которой лежали вычислительные комплексы на базе мини-ЭВМ СМ-1/2, производившиеся на предприятиях Минприбора.

К.Н. Руднев, возглавлявший Минприбор с 1965 по 1980г.г., взял на себя ответственность в индустриальном продвижении принципиально новой, разработанной в академическом институте, концепции многопроцессорных компьютеров ПС-2000, а вместе с этим и все инновационные риски, связанные с промышленным освоением принципиально новых идей.

А.П. Александров – академик, Президент Академии Наук СССР (1975 – 1986), понимавший стратегическое значение компьютеров сверхвысокой производительности, разделил с министром К.Н. Рудневым ответственность за выдвижение инициативы, исходившей из Института проблем управления – одного из ведущих институтов в области наук об управлении, возглавляемого академиком В.А. Трапезниковым (1951-1987).

Важно отметить, что Институт проблем управления находился в двойном подчинении – Академии Наук и Минприбора, что сокращало путь крупномасштабных инновационных академических проектов к промышленному внедрению и широкому использованию высокотехнологичной продукции в народном хозяйстве. И это – несомненная заслуга директора ИПУ – академика В.А. Трапезникова, понимавшего огромное значение фундаментальной науки в индустриальном развитии страны.

Восстановление тесных связей академической науки и промышленности – необходимое условие построения современной инновационной экономики.

4.4. Инновации – искусство материализации востребованных идей

Ответственность за исполнение выдвинутых инициатив и принятых решений в Минприборе была возложена на М.С. Шкабардню (зам. министра, затем в 1980-1989г.г.– Министр) и И.В. Прангишвили (зам. директора в 1970- 1987г.г. и директор ИПУ в 1987- 2006г.г.).

Тяжесть организации всего комплекса работ от научного обоснования до проектирования, освоения промышленного производства и внедрения ЭГВК ПС-2000 была возложена на И.В. Прангишвили – научного руководителя НИОКР по всей гамме компьютеров ПС, а также руководителей ведущего предприятия Минприбора, имевших огромный опыт разработки и промышленного производства управляющих вычислительных машин и комплексов, –

А.А. Новохатнего – директора НПО "Импульс" (1959-1987г.г.) и

В.В. Резанова – директора НИИ УВМ и зам. директора НПО "Импульс" (1958 – 1994г.г.), которые приняли решение разрабатывать опытные образцы ПС-2000 в виде изделий, готовых к серийному выпуску на Северодонецком приборостроительном заводе.

Благодаря усилиям возглавляемых ими коллективов в кратчайшие сроки был осуществлен весь комплекс работ по внедрению – от опытно-конструкторских разработок до промышленного производства ВК ПС-2000.

4.5. Инновации – творческий труд единомышленников

Создание новых компьютеров – труд многих специалистов. В большей по объёму и самой заметной части это высокоинтеллектуальное ремесло. В меньшей – исключительной, доступной только посвящённым – искусство. Для нового, опережающего своё время компьютера, эта "меньшая" предопределяет его дальнейшую судьбу. Подменить её отсутствие или незрелость не сможет даже самое высокое ремесло.

Состоявшееся озарение вбрасывает потоки особой энергии. Она придаёт силы противостоять неприятию скептиков, на удивление многочисленных и, порой, агрессивных. Высвечивает среди настоящих профессионалов единомышленников, вовлекает их в процесс творения неведомого. Сопричастность объединяет очень разных, но самых компетентных и креативных. Формируется аура неформального внесистемного единения. В многопроцессорном компьютере ПС-2000 удивительным образом материализовался романтический идеализм его начинателей. Это нетипично, но случается.

Искусство опирается на творца. Тайна творения кодируется в неповторимом сплаве таланта, личности и … обстоятельств.

Есть такой код и в архитектуре ПС-2000. Имя кодообразующей персоны: Медведев Израиль Львович. Он был и остаётся известным не очень многим. В основном, его единомышленникам и оппонентам. В числе их было поровну, но по весу регалий "паритет" соблюдался далеко не во всём.

Блестящая интуиция учёного, многогранный и неукротимый талант инженера и конструктора. Медведеву удалось из массы вариантов структурных и технических решений извлечь фундаментальные принципы удивительно простой и стройной высокопараллельной архитектуры, уникально гибкой и эффективной.

Его целеустремлённая самодостаточность и сверхубеждённость, необычайная и разносторонняя трудоспособность помогли уберечь и пронести целостность идеологии через ухабы многочисленных этапов технической материализации. Такое даётся немногим.

Он был одним из первых выпускников МЭИ, получивших классическое образование по специальности "Вычислительная техника", имел опыт работы на производствах по выпуску ЦВМ "Урал" и др. В ИПУ прошёл блестящую научную школу управления в лаборатории всемирно известного ученого - академика АН СССР и РАН Я.З. Цыпкина.

Начав свою многопроцессорную эпопею в 1972 г., в зрелые 42 года, Медведев 20 лет вёл своё детище по всему жизненному циклу – от первых разрозненных идей до полномасштабного его применения в разнообразных сферах народного хозяйства. Брал на себя самое трудное и рискованное.

И сейчас, спустя годы, не пропадает чувство удивления: как много ему, не располагавшему "волшебной палочкой" административного ресурса, удавалось поступать значимо и делать так много.

Рабочий момент начала 80-х. В.А. Трапезников (директор ИПУ) и И.Л. Медведев (справа) в машинном зале ПС-2000. (Фото снято видеокамерой и распечатано на матричном плоттере, подключенном к ВК ПС-2000 с обработкой изображения на многопроцессорном компьютере ПС-2000)

В достаточной для сохранения самобытной востребованности мере Медведев сохранял и творческую независимость, без чего невозможна бескомпромиссная защита принципиальных решений в ходе неформального авторского надзора. Этим он не снискал больших должностей и регалий, но его неформальное лидерство было ощутимым и незаменимым. Десятки специалистов из разных городов, разных возрастов и даже поколений, в чьих руках оказалась судьба ПС-2000, знали Медведева, многие искали с ним встреч, чтобы в критических ситуациях находить правильные пути.

Его идеи [17] все более актуальны и в наше время. Они конкурентоспособны и ждут своего полномасштабного воплощения в новейших технологиях сверхбольших интегральных схем глубоких нанометровых уровней.

Определяющий вклад в разработку принципов, научное обоснование и проектирование архитектуры многопроцессорного компьютера ПС-2000 внесли:

- от ИПУ - д. т. н И. Л. Медведев, д. т. н. С. Я. Виленкин, к.т.н. Ю.С. Затуливетер, к. т. н. Е. А. Фищенко;
- от НИИ УВМ: к. т. н. И. И. Итенберг - руководитель темы; к.т.н. А. С. Набатов, к. т. н. Г. Ю. Пивоваров, к. т. н. Н. И. Голован.

Важный вклад в разработку и внедрение программного обеспечения собственно компьютера ПС-2000 внесли:

- от ИПУ – д.т.н. С.Я. Виленкин, Е.Р. Лазебник, к.т.н. И.И. Паишев, д.ф-м.н Е.Г. Сухов;
- от ВНИИ "Геофизика" – к.т.н. В.М. Крейсберг, к.т.н. А.А. Богданов – разработка СОС-ПС (системы обработки сейсмоданных), при участии ряда сотрудников ИПУ – О.И. Лапшенкиной, И.М. Гришиной, к.т.н. А.В. Неймана, Е.Т. Амелиной.

Неоценимый вклад в разработку системного и прикладного ПО вносили сотрудники многих организаций и ведомств, где активно использовались ВК ПС-2000.

5. Другие проекты компьютеров на основе перестраиваемых структур [25]

Как было сказано выше в 1975 г. в Министерстве приборостроения средств автоматизации и систем управления СССР принята государственная программа по разработке высокопроизводительных параллельных компьютеров с перестраиваемой структурой – ПС. Приведём краткие сведения ещё по двум проектам компьютеров разных классов, достигших производственного уровня: ПС-300 и ПС-3000.

5.1. Малая ЭВМ ПС-300

Целью одного из проектов стало создание вычислительных систем в виде малой ЭВМ ПС-300 на основе совершенно новых принципов реализации параллельных вычислений посредством перестраиваемых однородных структур, разработанных научной школой И.В. Прангишвили [16]. Число 300 в названии этой ЭВМ указывает на количество ячеек с перестраиваемой структурой, из которых собирается однородная, программно перестраиваемая вычислительная среда

Разработка архитектуры ПС-300, методов и средств программирования, а также изготовление макетов осуществлялись в ИПУ. В качестве организаций-соисполнителей (проектирование и изготовление) министерством Приборостроения было выделено НПО «Элва» (г. Тбилиси).

Разработка ЭВМ ПС-300 от ИПУ велась в коллективе, возглавляемым М.А. Ускачом, с участием В.Д. Малюгина, Н.А. Абрамовой, А.И. Иванова, В.В. Соколова и др. Перестраиваемая однородная вычислительная структура ПС-300 обеспечивала высокий уровень распараллеливания благодаря эффективной конвейерной настройке на структуру задач. Схемная реализация укрупнённых вычислительных операторов в ячейках однородной структуры и возможности их программной перестройки обеспечили высокий уровень машинного языка, что упрощало программирование и уменьшало объём программ.

В 1977–1984 г.г. в НПО «Элва» (г. Тбилиси) при участии ИПУ было освоено серийное производство ЭВМ на перестраиваемых структурах ПС-300, являющейся оригинальным изделием, не имеющей отечественных и зарубежных аналогов (рис.12).

Рис. 12. ЭВМ ПС-300

Архитектура ПС-300 и её характеристики ориентировались на реализацию новых методов и алгоритмов управления, что позволило комплектовать машину соответствующими пакетами прикладных программ. Одно из первых применений опытного образца ПС-300 – использование в качестве управляющего процессора в оптико-электронной голографической системе обработки изображений и системе дисперсионного анализа мелкоструктурных технологических

материалов (А.К. Глотов, И.В. Сперанская, А.Н. Спиро). ЭВМ ПС-300 вошла в состав управляющих вычислительных комплексов при построении АСУ ТП, а также в качестве встроенных вычислителей в различных приборах. В 1978 г. на базе ЭВМ ПС-300 разработаны и внедрены управляющие вычислительные комплексы (УВК) ПС-300, предназначенные для применения в промышленных условиях в сложных иерархических системах управления на нижнем уровне обработки информации. УВК ПС-300 отличался структурной адаптацией к задачам и универсальностью применения, высокой надёжностью, помехоустойчивостью. УВК использовался для сбора и первичной обработки информации, расчёта технико-экономических показателей, контроля и регистрации текущих параметров технологических процессов, а также расчёта управляющих воздействий на исполнительные механизмы. В состав УВК ПС-300 входили: ЭВМ ПС-300, устройства связи с объектом и средства отображения информации (рис. 13). В течение 1978-1984г.г. НПО «Элва» (г. Тбилиси), было выпущено свыше 300 таких комплексов.

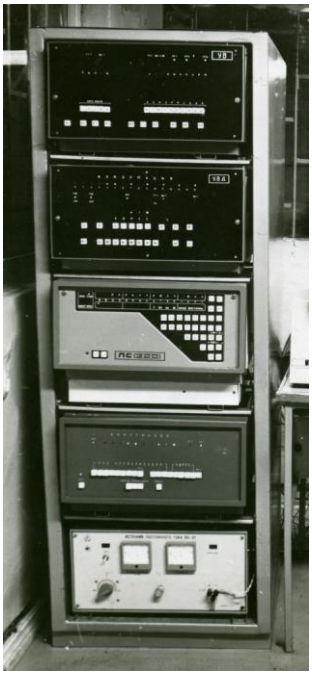

Рис.13 УВК ПС-300

5.2. Универсальный многопроцессорный компьютер ПС-3000

Исследования, разработки и научное сопровождение по проекту ПС-3000 от ИПУ осуществляли коллективы под руководством В.В. Игнатущенко и Э.А. Трахтенгерца (предпосылкой проекта послужила концепция вычислительной системы ПС-1000 на основе перестраиваемой однородной структуры большого размера – 1000 перестраиваемых ячеек). Ответственные исполнители в части проектирования ПС-3000 в НИИ УВМ (г. Северодонецк) – В.М. Борисенко, Е.В. Щербаков. Архитектура ПС-3000 относится к универсальным многопроцессорным системам со многими потоками команд и данных (MIMD). В архитектуре ПС-3000 принцип перестраиваемости реализовывался на основе анализа процесса выполнения программ, их фрагментов и команд, по текущему результату, которого специальными программно-аппаратными средствами осуществляется динамическое перераспределение параллельных вычислительных ресурсов (управления, процессорных элементов, памяти, устройств ввода-вывода) между задачами, их параллельными фрагментами, параллельными командами фрагментов.

В 1982 г. в НПО "Импульс" (г. Северодонецк) были изготовлены и совместно с ИПУ проведены испытания опытной партии многопроцессорных вычислительных комплексов (МВК) ПС-3000, предназначенных для использования в верхних контурах управления сложными объектами (типа ядерных реакторов), для обработки геофизической информации, в оборонных применениях.

Состав МВК: до четырёх центральных (скалярных) процессоров (СП); до двух однородных решающих полей (векторных процессоров), каждое из которых доступно двум СП и состоит из восьми однотипных, автономно и асинхронно функционирующих ПЭ; до четырёх модулей общей параллельной оперативной памяти (по 4 Мб в каждом); до 16 системных субкомплексов (периферийных процессоров - ПП). Всем ЦП и ПП обеспечен прямой доступ ко всей оперативной памяти. Все СП и решающие поля МВК ПС-3000 способны функционировать одновременно и асинхронно по отношению друг к другу. МВК ПС-3000 создавались с применением недорогой элементной базы малой степени интеграции и отраслевой конструкторской базы общего назначения, при этом по производительности были соизмеримы с мощными отечественными и зарубежными вычислительными системами класса MIMD существенно более высокой стоимости. В период 1984–1987 г.г. Северодонецким приборостроительным заводом, входящим в НПО "Импульс", было выпущено 14 ВК ПС-3000.

6. Развитие архитектурной линии ПС-2000

Разработка ПС-2000 – это уникальный научно-практический опыт достижения паритета с ведущими странами в области высокопроизводительных вычислений при сильно отстающей элементной базе. Он доказал, во-первых, что в сложнейших сферах с преобладанием существенно многопроцессорных структур превосходящая архитектура способна компенсировать отставание в области полупроводниковых технологий. Во-вторых, наличие опережающих архитектурных решений и надлежащей организации работ небольшой кооперация специалистов[1] позволяет в короткие сроки при минимальных финансовых затратах доводить до серийного промышленного производства высокотехнологичные изделия отвечающие требованиям мирового уровня.

На рис. 14 представлено развитие архитектурной линии ПС-2000.

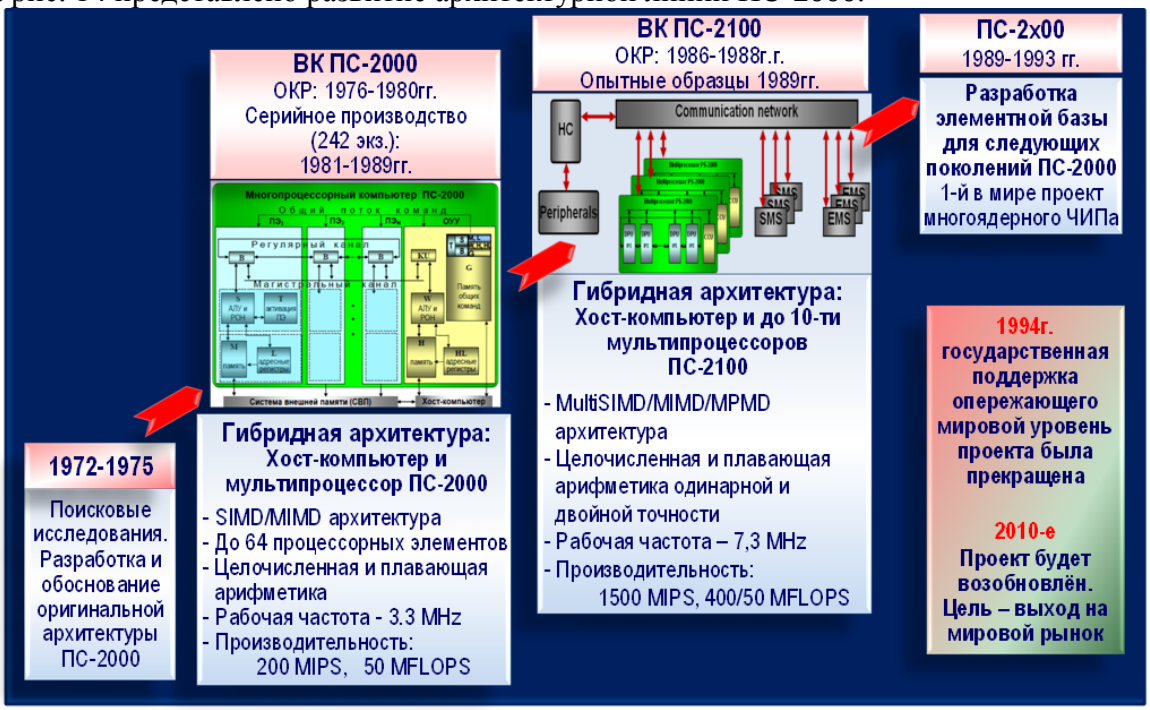

Рис. 14. Развитие архитектурной линии ПС-2000

6.1. Второе поколение ПС-2000 – многопроцессорный компьютер ПС-2100

Движение к созданию отечественной элементной базы для поддержки высокопроизводительных вычислений началось еще в конце 1980-х гг. Так, в НИИ УВМ в том

[1] Разработка ПС-2000 осуществлена лишь двумя организациями (ИПУ и НИИ УВМ), относившимися к Минприбору. Весь комплекс НИОКР и подготовки к промышленному производству был выполнен за 6 лет, стоимость работ составила 10-15 млн. руб. В общей сложности принимало участие около 300 человек, включая радиомонтажниц.

же коллективе была разработана первая модернизация архитектуры ПС-2000 в виде многопроцессорной системы ПС-2100.

При этом была несколько изменена архитектура, разработаны и изготовлены опытные образцы мультипроцессоров ПС-2100. Новизна состояла в проектировании набора интегральных схем средней степени интеграции для арифметико-логического устройства и памяти ПЭ. Опытная партия интегральных схем для ПС-2100 была изготовлена на Воронежском заводе полупроводников.

Такая элементная база позволила в несколько раз сократить объем оборудования мультипроцессора. Конструктивно каждый ПЭ стал занимать вместо семи в ПС-2000 всего одну плату, поэтому в одной стойке удалось разместить 64 ПЭ (рис.15).

При этом наряду с увеличением рабочей частоты до 7,3 МГц (вместо 3,3 МГц) и разрядной сетки до 32 (вместо 24) уровень параллелизма на машинном уровне был заметно снижен: разрядность команды – 32 (вместо 64), устранена аппаратная адресная арифметика. Это можно расценивать как архитектурные «уступки» в желании минимизировать габариты.

Производительность одной 64-процессорной стойки составила около 150 млн операций в секунду. Принципиально новым шагом в части архитектуры стало добавление внешнего коммутатора, предназначенного для комплексирования до 10 стоек (до 640 ПЭ) с общей производительностью до 1,5 млрд операций в секунду.

С распадом СССР эта разработка, доведенная до опытных промышленных образцов, к большому сожалению, не получила серийного продолжения. Производственная линия развития ПС-2000 прервалась. Сложившаяся инфраструктура использования сотен многопроцессорных ВК ПС-2000 с рекордными показателями производительности на единицу стоимости, аналогов которой в мире не было, вместо дальнейшего расширения с охватом новых сфер широкого применения была обречена на уничтожение вслед за многими ведущими отраслями промышленности.

Рис. 15. Фотографии стойки (64 ПЭ) и типовых плат ПС-2100

Ликвидация Минприбора привела не только к утрате производственной составляющей. Многопроцессорная тематика в НИИ УВМ (г. Северодонецк) была закрыта. Многолетние и плодотворные, прекрасно отлаженные профессиональные и корпоративные связи науки и производства были разорваны.

После утраты практической составляющей научный аспект развития архитектурной линии был продолжен в ИПУ РАН.

6.2. К новым рубежам: однокристальные компьютеры-ускорители ПС-2000М

Существующее положение в отечественной электронике в области технологий проектирования и производства ЭБ на СБИС пока не отвечает требованиям опережающего инновационного развития и модернизации экономики страны. Тотальная зависимость российских производителей высокопроизводительных систем от зарубежных технологий и поставщиков ЭБ стала одной из главных угроз национальной безопасности страны.

При этом на мировом рынке высокопроизводительных вычислений для задач с массовым параллелизмом класса GP продолжает оставаться явный дефицит высокоэффективных многопроцессорных архитектур. Проблема в том, что среди огромного количества вариантов допустимого множества параллельных архитектур только малое их число обладает равномерно высокой эффективностью на широких классах задач с массовым параллелизмом.

Отсюда особая роль наиболее удачных достижений в части эффективных параллельных архитектур. Их не так много. Одна из таких – ПС-2000, апробированная большой практикой индустриального производства и успешного применения в разнообразных сферах народного хозяйства.

Дальнейшее развитие архитектурной линии ПС-2000 производилось в ИПУ в рамках грантов силами исходного авторского коллектива в условиях ежегодно сокращающегося финансирования. Цель исследований конца 80-х и начала 90-х годов [18] – развитие архитектурных идей ПС-2000 в направлении структурной масштабируемости многопроцессорных структур с массовым параллелизмом для максимального использования быстро прогрессирующих (в соответствии с законом Мура) возможностей полупроводниковых технологий. Масштабируемая архитектура строилась в расчёте на реализацию на одном кристалле множества связанных на уровне регистров ПЭ, достижение максимальной производительности в расчёте на транзистор и увеличение производительности многопроцессорного кристалла пропорционально количеству транзисторов. Главная задача – достижение гибкой управляемости и балансировка машинного параллелизма действий обработки, хранения и коммутации на всех уровнях с учётом особенностей однокристальной реализации.

По сути, это был один из первых в мире проектов многопроцессорных кристаллов. Спустя 15 лет, в 2000-е годы такого рода кристаллы стали называться многоядерными.

В связи с растущим на современном мировом рынке спросом на недорогие однокристальные многоядерные компьютеры-ускорители с массовым параллелизмом актуальность апробированной большой практикой отечественной архитектуры ПС-2000 не только сохраняется, но и растёт по мере коммерческой доступности технологий изготовления СБИС глубокого нанометрового диапазона (90-10 нм). Её конкурентоспособность определяется высокой эффективностью на широких классах задач с массовым параллелизмом, структурной масштабируемостью, которая обеспечивает пропорциональный рост вычислительной производительности и пропускной способности внутренней, произвольно адресуемой памяти. Эти качества позволяют в максимальной степени раскрывать возможности современных и перспективных СБИС-технологий.

Опыт разработки и развития архитектурной линии ПС-2000 составляет основу для возвращения отечественного компьютеростроения на передовые в мире уровни с применением современных полупроводниковых технологий глубокого нанометрового диапазона и соответствующих средств дизайна СБИС. Расчёты показывают, что на становящихся доступными для отечественной полупроводниковой промышленности технологиях 90-65 нм возможна реализация первых кристаллов семейства многопроцессорных компьютеров ПС-2000М с дальнейшим масштабированием на технологии 40-10 нм (см. рис. 16). Такое семейство,

благодаря архитектурным преимуществом будет обладать большим запасом конкурентоспособности в диапазоне технологий 90-10 нм. Архитектура ПС-2000М [19-24] масштабируется по числу процессоров (ядер) на кристалле СБИС от 512 (технология 65нм) до 16К (10 нм) и по производительности однокристального компьютера от 1 до 30 Тфлопс и более. На рис.16 приведена восходящая лестница развития линии однокристальных компьютеров ПС-2000М на основе свойства структурной масштабируемости её архитектуры при реализации на современных и будущих интегральных технологиях. Важно отметить, что свойство структурной масштабируемости с увеличением количества транзисторов на кристалле обеспечивает пропорциональное улучшение характеристик – числа процессоров и реальной производительности, объёмов встроенной памяти и пропускной способности этой памяти как во взаимодействии с процессорами, так и с каналом ввода/вывода.

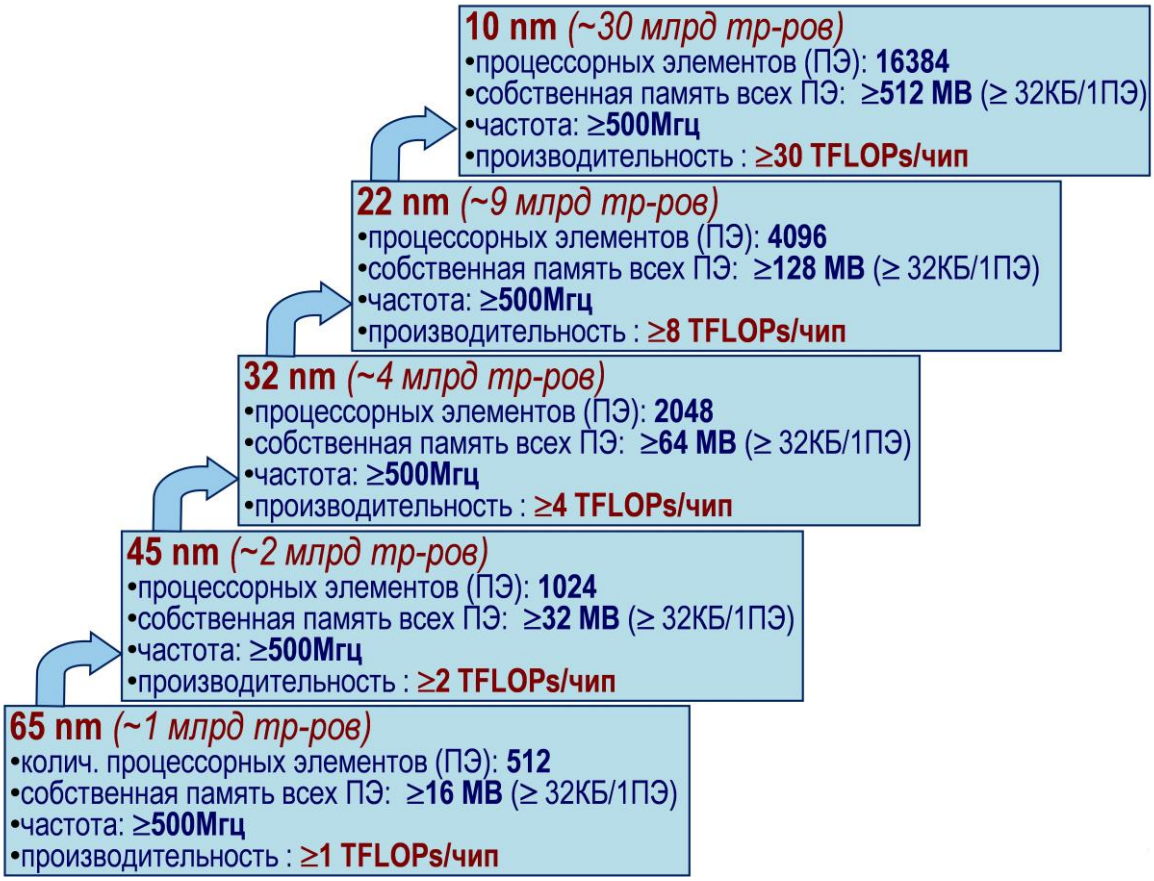

Рис. 16. Пропорциональное наращивание вычислительных возможностей однокристальных реализаций высокопараллельной архитектуры ПС-2000М по мере развития промышленных СБИС-технологий

На рис.17 приведена динамически перестраиваемая структура ПС-2000М, которая позволяет программной реконфигурацией комплексировать базовые многопроцессорные вычислительные модули с SIMD архитектурой (БМВ) внутри кристалла.

Семейство однокристальных компьютеров ПС-2000М может применяться во всем диапазоне средств вычислительной техники двойного назначения – от массовых мобильных компьютерных устройств и встраиваемых бортовых систем сетецентрического управления, до суперкомпьютеров производительностью 1-1000 Пфлопс и более.

Масштабируемость, комплексируемость и высокая эффективность архитектуры ПС-2000М на широких классах задач с массовым параллелизмом позволит преодолеть отставание отечественного технологического производства СБИС.

Во-первых, она открывает возможности производить на имеющихся отечественных производствах (90, 65 нм) микросхем младшие модели семейства (64, 128, 256, 512 ядер), обеспечивающие повышение характеристик мобильных и стационарных систем двойного назначения.

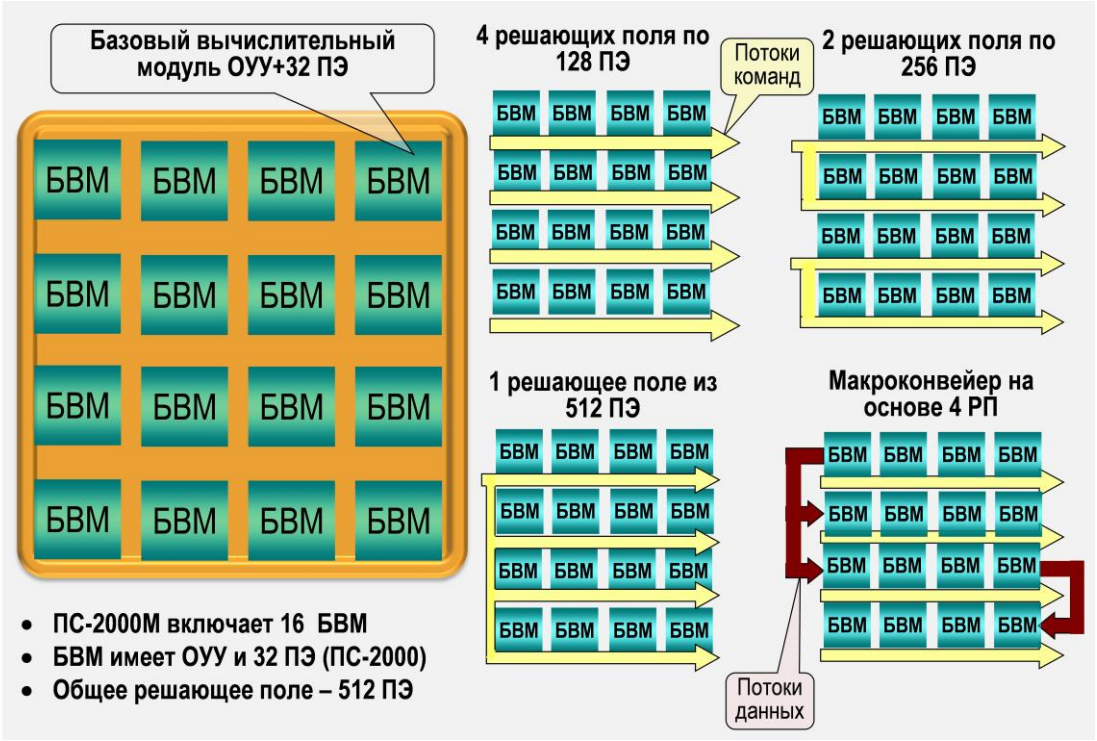

Рис.17. Multi-SIMD комплексирование БВМ внутри кристалла

Во-вторых, обладание уникальным проектом масштабируемой в диапазоне 65-10 нм заказной СБИС однокристального компьютера производительностью 1-30 Тфлопс и более становится весомым аргументом для экономически оправданного обретения технологий глубокого нанометрового диапазона с последующим выпуском старших моделей кристаллов ПС-2000М, которые откроют возможности достижения паритета и превосходства в области массовых сфер высокопроизводительных вычислений.

Заключение

Создание отечественной элементной базы для высокопроизводительных вычислений является ключевой народнохозяйственной задачей, которая открывает пути к возрождению отечественного компьютеростроения.

С появлением и формированием массового рынка многоядерных кристаллов-ускорителей активизируется спрос на высокоэффективные многопроцессорные архитектуры, сбалансированные под требования однокристальной реализации. Весьма актуальной поэтому становится задача воплощения масштабируемой архитектуры ПС-2000М на одном кристалле.

Сбалансированная для реализации на одном кристалле архитектура ПС-2000М обобщает уникальный опыт разработки компьютера ПС-2000. Эффективность его оригинальной, не утратившей актуальность, архитектуры, апробирована многолетней практикой высокопроизводительной обработки промышленных данных. ПС-2000 имеет многое, чтобы стать основой для однокристальных многопроцессорных компьютеров, которым принадлежит будущее.

Прекращение в середине 90-х годов финансирования отечественных научных разработок не остановило развитие архитектурной линии ПС-2000. За упущенные 15 лет в части архитектур с массовым параллелизмом не произошло отставания. За рубежом в это время в области высокопроизводительных вычислений доминировали кластерные многопроцессорные архитектуры, в которых в качестве основной ЭБ использовались универсальные микропроцессоры. Однако микропроцессорные архитектуры не предназначены для полномасштабного раскрытия практически неограниченного потенциала массового параллелизма вычислительных операций. Потому производительность многопроцессорных систем росла в большей степени за счёт увеличения рабочих частот.

Три пятилетия глубокого застоя в области архитектур с массовым параллелизмом на уровне простых операций, который можно назвать "ледниковым периодом" [4].

Ситуация кардинально изменилась с достижением в середине 2000-х теплового барьера кремниевых технологий. Рост частоты стал невозможным из-за опережающего роста тепловыделения. Дальнейшее наращивание производительности прежними темпами на основе микропроцессоров стало невозможным. "Несколько"-ядерные микропроцессоры с общей памятью не дают ощутимого прироста производительности уже после 4 ядер. Представленные на компьютерном рынке однокристальные многопроцессорные ускорители класса GP GPU по своей эффективности на различных классах задач с массовым параллелизмом ещё очень далеки от совершенства [5, 20].

Наш "развал" и их "застой" на этот раз совпали. В условиях кризиса классической модели последовательного счета и острого архитектурного голода на высокоэффективные многопроцессорные однокристальные архитектуры [5], отечественный компьютер ПС-2000 дал свой полновесный ответ на вопрос "Что важнее, – элементная база или архитектура?" Многопроцессорный компьютер с превосходящей архитектурой сумеет показать свои достоинства и на слабой элементной базе, а на лучшей ему не будет равных.

Хочется надеяться, что далеко не раскрывшая свой потенциал отечественная архитектурная линия ПС-2000 получит своё практическое продолжение. За счёт более эффективного раскрытия потенциала массового параллелизма на уровнях простых операций и использования возможностей полупроводниковых СБИС технологий глубокого нанометрового диапазона она позволит занять видное место на мировом рынке в классе однокристальных многопроцессорных компьютеров общего назначения и стать важным фактором снижения импортозависимости страны в ключевых сферах высоких технологий.

Литература

1. А.с. 751238 СССР. Многопроцессорная вычислительная система / Бирюков А.Я, Виленкин С.Я., Жуков В.А., Затуливетер Ю.С., Медведев И.Л., Прангишвили И.В., Голован Н.И., Итенберг И.И., Костелянский В.М., Набатов А.С., Пивоваров Г.Ю., Резанов В.В., Фищенко Е.А. // Бюл. -1983. -№ 22.
2. Прангишвили И. В., Виленкин С. Я., Медведев И. Л. Многопроцессорные вычислительные системы с общим управлением. М.: Энергоатомиздат,1983. 312с.
3. Прангишвили И.В., Затуливетер Ю.С., Смирнов А.Д., Томилин А.Н. Москва компьютерная // Развитие инженерного дела в Москве. Исторические очерки. -М.: Российская инженерная академия, 1998. С.338-354.
4. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А. Многопроцессорный компьютер ПС-2000 // Открытые системы. 2007. № 9. С.74-79. URL: http://www.osp.ru/os/2007/09/4570286/
5. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А. Многопроцессорный компьютер ПС-2000 (Опыт создания и пути развития). Научное издание (Препринт). М.: Институт проблем управления РАН, 2012. 86с. URL: http://www.ipu.ru/sites/default/files/publications/16551/3477-препринт%20пс-2000__2.pdf
6. Wolcott P., Goodman S. E. High-Speed computers of the Soviet Union // IEEE Computer. -1988. -Vol. 21, -No 9. -P. 32-41.
7. Wolcott P., Goodman S. E. International perspectives: under the stress of reform high-performance computing in the former Soviet Union // Communications of the ACM. -1993. -Vol. 36, -No 10. -P. 21-24.
8. Фищенко Е. А. Выбор системы команд для многопроцессорной вычислительной системы с общим потоком команд // Многопроцессорные вычислительные системы с общим потоком команд: Сб. науч. тр. №19 -М.: Ин-т пробл. упр., 1978. -С. 33-39.
9. Fisher J. Very long instruction word architectures and the ELI512 // Proc. of the 10-th Annual International Symposium on Computer Architecture. Stockholm, Sweden, 1983.-P. 140-150.
10. Фищенко Е. А. Принципы построения мнемокода многопроцессорных вычислительных систем с общим управлением // Всесоюзное научно-техническое совещание "Проблемы создания и использования высокопроизводительных машин". М.: Институт проблем управления,1979. -С.108-110.
11. Медведев И. Л., Фищенко Е. А. Об одном способе описания программно-доступных средств параллельного процессора // Вопросы кибернетики. Вып. 92. -М.: НС по комплексной

проблеме "Кибернетика" АН СССР, 1982.-С. 43-67.
12. Трапезников В.А., Прангишвили И.В., Новохатный А.А., Резанов В.В. Экспедиционные геофизические комплексы на базе многопроцессорной ЭВМ ПС-2000 // Приборы и системы управления. 1981. № 2. - С. 29-31.
13. Амелина Е.Т., Затуливетер Ю.С., Лазебник Е.Р., Медведев И.Л., Нейман А.В., Фищенко Е.А. Миграция временного разреза земли на параллельной ЭВМ ПС-2000 (Быстрое сейсмоголографическое преобразование Кирхгофа) -М.: Институт проблем управления, 1992. -36с.
14. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А Опыт эффективного программирования многопроцессорных компьютеров с массовым параллелизмом: задача миграции временного разреза земли //Сборник трудов Второй российской конференции с международным участием "Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (теория, методы, алгоритмы, исследования и разработки)". ИПУ РАН. – М., 2010. CD-ROM.- С.512-515.
15. Васильев, С.А., Перехватов В.В. Быстрое сейсмоголографическое преобразование Кирхгофа // Геология и геофизика.- 1981.-№ 8.
16. Прангишвили И.В., Абрамова Н.А., Бабичева Е.В., Игнатущенко В.В. Микроэлектронные и однородные структуры для построения логических и вычислительных устройств. -М., Наука, 1967г.
17. Медведев И.Л. Проектирование ядра структуры параллельных процессоров. – М., 1992 (Препринт/Институт проблем управления),60с.
18. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А., Кротов В.А., Лементуев В.А. Параллельные высокопроизводительные ЭВМ на основе заказных СБИС с многопроцессорной архитектурой // Приборы и системы управления. -1996. -№12. С.24 -26.
19. Затуливетер Ю.С, Фищенко Е.А. Многопроцессорная архитектура ПС-2000 на кристалле СБИС // Проблемы управления.- 2007. - №4.-С.30-35.
20. Артамонов С.Е., Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А. Предпосылки к созданию однокристального многопроцессорного компьютера ПС-2000М производительностью 1-10 TFlops /Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): труды международной научной конференции (Москва, 28 марта – 1 апреля 2011 г.) [Электронный ресурс] – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 402- 410. – URL: http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011/short/012.pdf.
21. Vassilyev S.N., Zatuliveter Yu.S. Control science and computers: ascend along Prangishvili's path // Georgian Engineering News. – Georgia, 2012. – № 4. – P. 5–24.
22. Артамонов С.Е., Затуливетер Ю.С., Козлов В.А., Фищенко Е.А. К созданию однокристального многопроцессорного компьютера общего назначения с массовым параллелизмом (Элементы стратегии опережения в создании отечественной элементной базы) // Датчики и системы. 2013. № 6. С. 64-77.
23. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А., Артамонов С.Е., Козлов В.А. Элементы стратегии и архитектурные предпосылки опережения в области однокристальных многопроцессорных компьютеров с массовым параллелизмом // Информационные технологии. 2014. №2. Приложение. С. 1-32.
24. Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А., Артамонов С.Е., Козлов В.А. Элементы стратегии опережения и архитектурные предпосылки к созданию однокристального ускорителя массовых вычислений общего назначения на базе архитектуры отечественного многопроцессорного компьютера ПС-2000 // Программные системы: теория и приложения. 2014. № 1. С. 37–74. URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2014_1_37-74.pdf .
25. Отечественная электронная вычислительная техника. Биографическая энциклопедия / Издательский дом «Столичная энциклопедия. 2014. 400с.