

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Э.В. Евреинов

(Новосибирск)

В Институте математики СО АН СССР в 1960 г. были начаты исследования возможности создания сверхбыстродействующих электронных вычислительных машин (ЭВМ) для решения сложных задач.

В результате анализа задач, а также исследования состояния и перспектив развития вычислительной техники были сформулированы требования к ЭВМ высокой производительности:

- 1) быстродействие не менее 10^9 операций в секунду;
- 2) объем памяти не менее $10^{10} - 10^{12}$ двоичных разрядов;
- 3) скорость ввода и вывода информации не менее $10^6 - 10^7$ двоичных разрядов в секунду;
- 4) обеспечение обмена звуковыми и зрительными образами между ЭВМ и внешними объектами, а также ввода и вывода информации по каналам связи;
- 5) работоспособность в течение 5-10 лет;
- 6) стоимость операции в секунду в 100-200 раз меньше по сравнению с существующими ЭВМ;
- 7) сроки разработки ЭВМ высокой производительности - 10-15 лет.

При разработке ЭВМ высокой производительности желательно также учесть возможность построения на единой технологической и математической основе малых, средних и больших ЭВМ и наращивание производительности ЭВМ по мере роста потребностей заказчика.

Исходя из сформулированных требований, были исследованы два возможных направления в разработке ЭВМ:

- 1) применение сверхбыстродействующих элементов;
- 2) параллельное выполнение операций.

К достоинствам первого направления относится возможность полностью использовать математические основы построения существующих ЭВМ. В этом случае задача сводится лишь к разработке физико-технологических основ конструирования и производства сверхбыстродействующих и дешевых элементов.

Установлено, что для ЭВМ с быстродействием 10^9 опер/сек требуются элементы с быстродействием в 10^2 - 10^3 раз больше, объемом в 10^4 - 10^6 раз меньше и мощностью рассеяния в 10^3 - 10^4 раз меньше по сравнению с существующими элементами.

Теоретические оценки предельного быстродействия элементов с учетом их размеров, мощности рассеяния, уровней сигналов, запаздывания сигналов оказались близкими к значениям быстродействия элементов, необходимых для построения ЭВМ с быстродействием 10^9 - 10^{10} опер/сек.

Однако массовое производство таких элементов едва ли возможно осуществить в ближайшие 5-10 лет вследствие трудностей создания большого числа элементов и приближения их значений к предельным теоретическим.

Второе направление требует решения дополнительных проблем, связанных с математическими основами построения ЭВМ с параллельным выполнением большого числа операций (10^2 - 10^4). К ним относятся: разработка математических методов решения задач, разработка теории параллельных алгоритмов, теории программирования, методов анализа и синтеза ЭВМ с параллельным выполнением операций.

Вместе с тем при разработке физико-технологических основ построения ЭВМ (с параллельным выполнением операций) существенно снижаются требования к элементам: не требуется высокое быстродействие, можно допустить существенное повышение мощности рассеяния, увеличение запаздывания, увеличение габаритов элементов и т.д. Сохраняется только одно требование - малая стоимость элементов.

Анализ второго направления показал, что если для широкого круга задач существуют параллельные алгоритмы, в которых за один такт выполняется одновременно 10^2 - 10^4 операций, то:

1) в ЭВМ могут применяться элементы с быстродействием в 10^2 - 10^4 раз меньше по сравнению с требуемым для первого направления;

2) увеличение числа элементов, необходимых для реализации устройств, выполняющих параллельно операции (10^2 - 10^4 опер/сек), практически не сказывается на увеличении общих затрат элементов (основную долю составляют элементы памяти).

Второе направление было выбрано в качестве основного и получило название "вычислительные системы высокой производительности". Это направление представляет единый комплекс тесно связанных между собой проблем. Решение каждой из проблем представляет, однако, и самостоятельный интерес.

К основным проблемам относятся:

I. Параллельные алгоритмы и методы решения задач на вычислительных системах (ВС). Эта проблема распадается на две основные задачи:

1) Математические требования к ВС. В этой задаче определяется, существуют ли параллельные алгоритмы (10^2 - 10^4 операций в каждом шаге) для широкого круга задач, какова структура обмена информацией между параллельными ветвями, как изменяется число ветвей в ходе вычислений.

2) Решение задач на ВС. Сюда относится разработка методов решения задач на ВС, параллельных алгоритмов, языков, систем математического обеспечения и т.д.

II. Логические основы построения ВС. Здесь нужно дать ответ на вопросы:

1) Как должна быть построена вычислительная система, чтобы обеспечивалась одновременная параллельная работа 10^2 - 10^4 обрабатывающих устройств при выполнении 10^2 - 10^4 операций в одном такте (т.е. какой должна быть макроструктура ВС)?

2) Как должно быть построено каждое из обрабатывающих устройств (т.е. какой должна быть микроструктура ВС)?

III. Анализ и синтез схем элементов ВС. Эта проблема содержит разработку математических методов анализа и синтеза схем элементов (моделирование схем элементов, расчёт надёжности, запаса и т.д.), методов расчёта физических установок для исследования свойств элементов, методов расчёта технологических установок для изготовления элементов.

IV. Обмен информацией и методы распознавания образов. Здесь исследуются вопросы обмена информацией между ВС и внешними объектами по каналам связи, разрабатываются методы распознавания звуковых и зрительных образов, особенности построения устройств для ввода (вывода) информации в ВС.

V. Физико-технологические основы построения ВС. Здесь решаются три основных задачи:

1) исследование физических явлений с целью создания элементов ВС с заданными свойствами;

2) разработка технологических методов и средств, позволяющих изготавливать большое число элементов дешевым способом;

3) разработка методов физико-технологических исследований и системы автоматизации научных экспериментов.

Проблема "Физико-технологические основы построения ВС" является наиболее трудной и в известной мере определяющей решение задачи в целом.

В зависимости от состояния физико-технологической базы можно выделить четыре этапа в решении общей задачи.

1 - й этап. Создание ВС путём объединения некоторого числа существующих типов ЭВМ. Элементы и технология их получения обычные.

2 - й этап. Создание ВС из микроминиатюрных элементов и узлов. Автоматизация изготовления элементов и блоков ЭВМ. Ручная сборка ЭВМ. На этом этапе можно надеяться на построение ВС производительностью до 10^7 опер/сек при числе ЭВМ в системе порядка 100.

3 - й этап. Создание ВС из микроминиатюрных ЭВМ. Автоматизация изготовления ЭВМ в целом. Ручная сборка системы. Возможно создание вычислительной системы производительностью 10^8 опер/сек при числе машин 10^3 .

4 - й этап. Создание ВС миллиардного диапазона (свыше 10^9 опер/сек) на основе изготовления системы в едином полностью автоматизированном технологическом процессе.

В ходе работ над вычислительными системами высокой производительности разработаны логические основы построения ВС, разработана методика решения задач на ВС, получены обнадеживающие результаты по остальным проблемам. Завершён успешно I-й этап работ над ВС.

Результаты работы изложены в работах [1, 2], сборниках "Вычислительные системы" вып. 1-24, монографии [3].

Остановимся кратко на основных результатах, полученных при решении проблемы "логические основы построения вычислительных систем".

Из анализа задач выяснилось, что число параллельных ветвей, конфигурация схем обмена информации между ветвями в процессе решения задач могут меняться. При параллельном выполнении операций требуется также осуществлять различные схемы управления процессами вычислений.

Особенностью построения ВС является то, что они должны быть пригодны для решения задач, которые могут появиться уже после создания ВС.

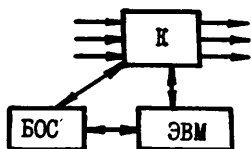
Все это требует, чтобы в основу построения ВС были положены также принципы, которые позволили бы удовлетворить всем требованиям, которые предъявляются задачами.

Сложность построения ВС из большого числа элементов требует, чтобы в основу построения были положены принципы простоты физической реализации, а именно:

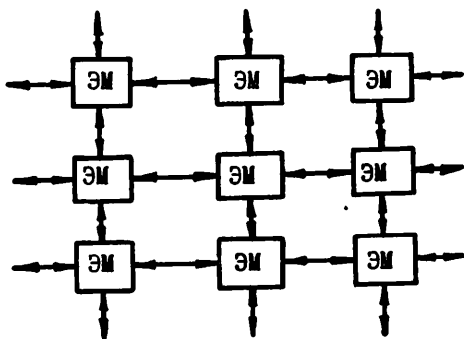
1) на макроструктурном уровне - идея однородной универсальной вычислительной системы, которая состоит из одинаковых и одинаково соединенных друг с другом универсальных вычислительных машин (элементарных машин - ЭМ) и обладает возможностью программного изменения как системы коммутаций между ЭМ, так и самой ЭМ (разрядность, объем памяти, система команд).

2) На микроструктурном уровне - идея однородной вычислительной среды, которая состоит из одинаковых и одинаково соединенных друг с другом универсальных элементов, программно настраиваемых на выполнение любой функции из полного набора логических функций, памяти (задержки) и любого соединения со своими соседями.

Схема элементарной машины и вычислительной системы изображена на рисунке.



а) Элементарная машина



б) Вычислительная система

Элементарная машина состоит из универсальной ЭВМ, коммутатора каналов связи (К), блока операций системы (БОС). В БОС реализуются операции настройки, обмена, обобщенного условного и безусловного переходов. С помощью операции настройки устанавливаются всевозможные коммутации между ЭМ, с помощью операций обмена осуществляется обмен информацией между ЭМ, с помощью операций обобщенного условного и безусловного переходов осуществляется совместная работа ЭМ при решении общей задачи.

Для вычислительной системы была доказана справедливость утверждений:

- 1) ВС является универсальной, т.е. в ней реализуется нормальный алгоритм А.А. Маркова;
- 2) на ВС эффективно реализуется любой параллельный алгоритм;
- 3) на ВС структурно моделируется любая схема управления процессами вычислений.

Было установлено, что быстродействие ВС определяется соотношением:

$$\frac{V_{\text{вс}}}{V_{\text{эм}}} = (1 + k) \cdot M, \quad k = \frac{\tau_{\text{в}}}{\tau_0},$$

где $V_{\text{вс}}$ - быстродействие ВС; $V_{\text{эм}}$ - быстродействие ЭМ; M - число машин в системе; $\tau_{\text{в}}$ - время ввода информации из внешней памяти; τ_0 - время выполнения операций.

Было выяснено, что благодаря программному изменению структуры можно легко реализовать различные схемы резервирования. В частности, возможна схема с автоматическим устранением неисправности в системе, в которой любая вышедшая из строя ЭМ заменяется исправной из общего резерва. В этом случае надёжность системы определяется по формуле:

$$P_{\text{вс}} = \sum_{i=0}^{M-1} C_M^{M-i} P_{\text{эм}}^{M-i} (1 - P_{\text{эм}})^i,$$

где $P_{\text{вс}}$ - надёжность ВС, $P_{\text{эм}}$ - надёжность ЭМ, M - общее число ЭМ, 1 - число ЭМ, работающих в системе.

Было установлено, что стоимость вычислительной системы можно значительно снизить по сравнению со стоимостью машины с эквивалентными параметрами и построенной на основе быстродействующих элементов:

$$k_c = \frac{C_M}{C_{\text{вс}}} = \frac{\alpha}{1 + \beta}, \quad \alpha = \frac{C_{\text{эм}}}{C_{\text{эвс}}}, \quad \beta = \frac{C_{\Lambda}}{C_{\Pi}}, \quad \beta = \begin{cases} 1 \\ \ll 1 \end{cases},$$

где C_M - стоимость машины; C_{BC} - стоимость ВС;
 $C_{эМ}$ - стоимость элемента машины; $C_{эВС}$ - стоимость
 элемента ВС; C_{Δ} - число элементов в логических устройствах,
 $C_{п}$ - число элементов в памяти. При $\alpha > 2$ система всегда
 выгоднее машины.

В ходе работ над проблемой построения ВС высокой про-
 изводительности были разработаны также различные схемы ре-
 ализации операций ВС, исследованы различные типы коммутато-
 ров, дана классификация основных типов ВС, рассмотрены орга-
 низация ВС в единую систему и работа ВС в условиях запазды-
 вания сигналов, показана возможность организации такого про-
 цесса вычислений, когда запаздывание не сказывается на про-
 изводительности системы.

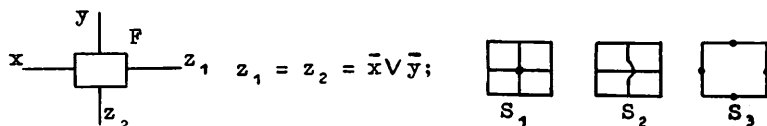
Теоретические работы позволили перейти к построению ре-
 альных вычислительных систем. Совместно с СКБ была разработа-
 на и пущена в эксплуатацию вычислительная система на базе ма-
 шин "Минск-2" или "Минск-22". Полученные результаты полностью
 подтвердили правильность теоретических выводов.

Разработана и находится в стадии изготовления управляю-
 щая система для автоматизации сложных научных экспериментов.
 Разработан также аванпроект вычислительной системы с произво-
 дительностью 10 млн опер/сек.

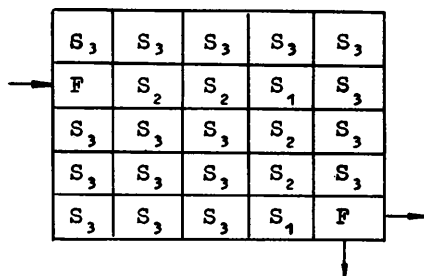
При построении ВС большой интерес представляет использо-
 вание идеи вычислительной среды. Вычислительная среда позво-
 ляет для каждой задачи создать специализированную машину пу-
 тём программной настройки элементов среды.

Каждый элемент среды может выполнять: логические функции,
 функцию памяти, функцию соединения с другими элементами. При
 настройке элемента на одну из функций элемент выполняет эту
 функцию до следующей настройки.

Например, элемент может выполнять функции вида:



Тогда более сложные функции реализуются с помощью настройки
 элементов среды на функции F , S_1 , S_2 , S_3 . При этом каналы
 между элементами, реализующими функции F , образуются из
 элементов, реализующих функции S_1 .



Исследования показали, что при реализации схем вычислительной техники из элементов среды при затратах оборудования, в 10-100 раз больших, выигрыш в производительности будет в 100-10000 раз оольший по сравнению с обычной универсальной ЭВМ, выполненной на той же физико-технологической основе.

В ы в о д ы

Анализ проведенных работ показывает, что полученные теоретические результаты позволяют перейти к практической реализации ВС.

Исключительно важное значение приобретает развитие физико-технологической базы как основы построения ВС.

Л и т е р а т у р а

1. Э.В. Евреинов, Ю.Г. Косарев. О возможности построения вычислительных систем высокой производительности. Новосибирск, Изд. СО АН СССР, 1962.
2. Э.В. Евреинов, Ю.Г. Косарев. О вычислительных системах высокой производительности. - Изв. АН СССР, сер. Техническая кибернетика, 1963, № 4, стр. 3-25.
3. Э.В. Евреинов, Ю.Г. Косарев. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, "Наука" (в печати).