

СуперЭВМ – от задач к машине

Вера Карпова, Леонид Карпов

Говорят, что в России разучились выполнять большие инфраструктурные проекты, – возможно, но так было не всегда: в стране имелся опыт создания суперкомпьютерных систем, решающих задачи обеспечения национальной безопасности.



С момента своего возникновения отечественная вычислительная техника была нацелена на решение важнейших для страны задач. Сергей Алексеевич Лебедев, являясь специалистом в области электротехники и обдумывая проект своей первой ЭВМ для решения поставленной перед ним задачи надежной передачи электроэнергии на большие расстояния, изначально рассматривал компьютер лишь как инструмент для помощи в его основной работе. Еще во время войны, получив задание

на создание средства борьбы с вражескими кораблями на море, Лебедев предложил наиболее подходящий для решения этой задачи инструмент – торпеду, оснащенную блоком наведения. Такое решение для Государственной комиссии оказалось на тот момент неожиданным, но оно быстро показало свой грозный характер – во время стендовых испытаний в комнате заседаний комиссии была установлена торпеда, которая отслеживала движение в комнате и перенацеливалась на членов комиссии. Торпеда была принята на вооружение без особых замечаний. Впоследствии Лебедев всегда следовал своему правилу: инструмент должен соответствовать задаче – задача определяет все.

В должности директора Киевского института электротехники Лебедев все больше погружался в проблемы нового вида инструментов – вычислительных машин. И хотя он продолжал заниматься электротехникой и даже получил Государственную премию за достижения в этой области, его мысли были заняты цифровыми вычислителями. Вскоре перед ним уже стояли две задачи – к прежней, по эффективной передаче электроэнергии на большие расстояния, добавилась еще одна, сформулированная на самом высоком государственном уровне. Речь шла о выполнении расчетов, необходимых для производства ядерного оружия. Оставив почти полностью свой коллектив на Украине, Лебедев приступил к созданию нового в Институте точной механики и вычислительной техники в Москве. В МЭИ им была образована группа из девяти студентов для работ над БЭСМ. Студентам выдали реальные производственные задания, и они были сразу вовлечены в научную и практическую работу. Все члены этой группы, включая Всеволода Сергеевича Бурцева и Владимира Андреевича Мельникова, стали впоследствии мозговым центром формировавшейся отечественной ИТ-индустрии, и, как только отшумел дождь правительственных наград за БЭСМ, началась рутинная работа по расчету ядерного оружия.

Лебедев обладал характерной для лучших русских ученых способностью не только решать старые, пусть и важные задачи, но и формулировать новые, для решения которых, возможно, будут требоваться и новые компьютеры. Чтобы не потерять молодежь, он поставил перед своими молодыми коллегами новую задачу – научиться управлять реальными объектами непосредственно при их функционировании. Конечно, для этого пришлось изобретать новый инструмент – вычислительные управляющие системы реального времени. Бурцев вошел в группу, которая занималась разработкой методов связи цифровых машин с реальными объектами и исследовала возможности применения компьютеров малой мощности для управления такими объектами. Основой этих работ были исследования методов преобразования дискретных величин в непрерывные и

обратно, а также поиск областей, где было бы целесообразно применять дискретную вычислительную технику. Несмотря на то, что эти работы были в стороне от основной тематики института, Лебедев считал возможным проводить эти исследования. Одновременно Мельников работал над развитием серии БЭСМ и, кстати, участвовал в передаче передовых технологий в Китай, где на основе этой ЭВМ создавалась первая китайская вычислительная машина. Впоследствии под руководством Лебедева и Мельникова была создана легендарная машина БЭСМ-6 и аппаратура сопряжения АС-6. Как только была сформулирована задача управления физическими объектами в реальном времени, Бурцев вместе с Лебедевым поехали в НИИ-17 к Виктору Васильевичу Тихомирову, главному конструктору радиолокационных средств для самолетов, который выделил им станцию обзорного действия «Топаз», применявшуюся тогда для прикрытия хвоста бомбардировщика. На основе этой станции был сделан макет для будущей системы, способной одновременно сопровождать несколько целей. В результате были созданы малые вычислительные машины «Диана-1» и «Диана-2», использовавшиеся в составе систем наведения истребителей на цели. Машины автоматически снимали данные с радиолокатора, отфильтровывали шум, переводили сигнал в цифру и рассчитывали траектории движения нескольких целей, отображая их на экраны.

Группа, в которую входил Бурцев, создала инфраструктуру радиолокационной станции обзорного действия, способной в реальном времени сопровождать до 10 целей и одновременно наводить на них самолеты-перехватчики, выполняя опережающие расчеты их траектории. В 1956 году под Курском прошло испытание новой системы на серийной станции П-30 с посылкой оцифрованного сигнала управления на самолет перехвата целей. Но одних идей было недостаточно, и здесь проявился организаторский талант Бурцева, который сумел наладить работу специалистов разного профиля. Однако до создания полноценной ПРО, способной прикрыть все пространство страны, было еще далеко. В то время Лебедев не раз встречался с полковником Григорием Васильевичем Кисунько, главным конструктором системы противоракетной обороны, который подыскивал коллектив для КБ-1, способный создать компьютер, значительно превосходящий по производительности БЭСМ и «Стрела» (СКБ-245, главный конструктор – Юрий Яковлевич Базилевский) при решении задач ПРО.



Во время первой встречи с Кисунько в кабинете Лебедева Бурцев, уже три года занимавшийся проблемами получения цифровых данных от аналоговых радиолокационных устройств, впервые осознал, что для полномасштабного решения задачи развертывания противоракетной обороны страны необходимо построить вычислительную машину с производительностью до 100 млн операций в секунду (имевшиеся тогда вычислительные машины с трудом преодолевали барьер в 10 тыс операций).

Кисунько поручил эту работу молодому академическому институту, не имевшему еще опыта внедрения научных разработок в промышленность, а Лебедев, подключив к работе своих сотрудников во главе с Бурцевым, проявил немалую смелость, хотя хорошо представлял себе все трудности на пути создания такой ЭВМ и организации ее серийного производства.

Разработку центральной ЭВМ возглавил Бурцев, разработку машины связи – Валентин Сергеевич Чунаев, а Владимир Иванович Рыжов занялся разработкой устройств связи с объектами, центральных часов ПРО и устройств, фиксирующих работу комплекса. Примечательно, что Бурцев никому не позволял замыкаться только на порученных им конкретных направлениях, а буквально заставлял сотрудников изучать весь комплекс целиком и особенно отмечал сотрудников, стремящихся к расширению своих знаний.

Наиболее сложно было обеспечить высокую точность попадания по цели (наведение с точностью не менее 25 м) и временную синхронизацию данных системы (выдача сигнала подрыва противоракеты с точностью до микросекунд). В результате была создана подсистема, которую Кисунько использовал при решении поставленной перед ним задачи уничтожения межконтинентальных баллистических ракет.



Автоматический съем данных от обзорной радиолокационной станции с отделением шумов, а также расчет траектории движения нескольких целей выполнялся с помощью машин «Диана-1» и «Диана-2», а остальные задачи решали М-40 (1957 год) и М-50 (1959 год). Обе имели развитую систему прерываний, могли вести прием и передачу данных по семи дуплексным, асинхронно работающим каналам общей пропускной способностью в 1 Мбит/с. Впервые в мире в вычислительной сети широко использовались мультиплексные каналы и осуществлялась параллельная работа различных компонентов компьютера: устройств управления, памяти, внешних устройств и каналов связи.

В М-40 впервые был использован второй процессор (процессор ввода-вывода), работающий по жесткой программе, а оперативная память впервые стала функционировать в режиме разделения времени. В качестве внешней памяти использовался магнитный барабан емкостью 6 тыс. 72-битных слов. Машина обрабатывала 36-разрядные двоичные числа в формате с фиксированной запятой, а М-50 умела обрабатывать числа в формате с плавающей запятой. У данной машины была модификация 5Э92, предназначенная для комплексов обработки данных, в которой применялась специально разработанная контрольно-регистрирующая аппаратура с возможностью дистанционной записи информации, поступающей с высокочастотных каналов связи. На базе ЭВМ 5Э92 строился главный командно-вычислительный центр системы «А» (в 1961 году была завершена разработка проекта боевой системы ПРО «А-35», предназначенной для защиты Москвы от межконтинентальных ракет), в которой впервые был реализован двухмашинный (многопроцессорный) комплекс. По пяти асинхронно работающим каналам осуществлялся обмен информацией с объектами, находящимися от М-40 на расстоянии 100–200 километров. Система регистрации боевой работы давала возможность в реальном масштабе времени анализировать каждый пуск. Машины М-40 и М-50 сыграли большую роль в развитии отечественной ИТ-индустрии – на несовершенной элементной базе была создана распределенная на сотни километров система из сети ЭВМ, превосходящая по своим параметрам зарубежные образцы. Задача борьбы с парными баллистическими целями, состоящими из корпуса баллистической ракеты и отделившегося от нее боевого блока с ядерным зарядом, была решена в 1961 году, а в 1966 году под Москвой построили боевые вычислительные комплексы, связанные между собой высокоскоростными линиями передачи данных общей протяженностью более тысячи километров.

С 1961-го по 1968 год под руководством Лебедева и Бурцева разрабатывалась первая полупроводниковая ЭВМ 5Э92б, основанная на полном аппаратном контроле процесса работы. Первоначально машина, предназначенная для сложных боевых систем в рамках работ по системе ПРО, имела индекс М-500 (быстродействие оценивалось в 500 тыс. операций в секунду), но потом по условиям Минобороны машина получила свое окончательное имя – 5Э92б. В этой ЭВМ был реализован принцип многопроцессорности, внедрены методы управления внешними запоминающими устройствами, позволявшие распараллелить работу нескольких машин, обращающихся к единой внешней памяти. Данные решения позволили по-новому строить вычислительные управляющие и информационные комплексы для систем ПРО и центров контроля космического пространства.

Особое внимание, как и во всех работах Бурцева, уделялось проблеме надежности и устойчивости функционирования комплекса. Центральный многомашинный комплекс строился на базе 12 ЭВМ 5Э92б, две из них были в состоянии «горячего» резерва и в течение нескольких сотых долей секунды были готовы заменить любую из вышедших из строя. Шесть машин комплекса решали задачу обнаружения целей по данным радиолокатора дальнего действия и построения их траекторий, еще четыре решали задачи управления, включая распределение целей по стрельбовым комплексам.

В 1966 году было налажено серийное производство машин 5Э92б, а в 1967 году начался серийный выпуск их модернизированной версии – ЭВМ 5Э51, которая использовалась при создании многомашинных комплексов с единой внешней памятью, состоящей из большого количества магнитных барабанов, дисков и лент. Один из таких четырехмашинных комплексов был установлен в создаваемом Центре контроля космического пространства (ЦККП), в задачи которого входило ведение каталога космических объектов на околоземной орбите. Машина 5Э51 имела механизм базирования адресов памяти, защиту оперативной памяти и каналов обмена, в ней предусматривалась возможность работы нескольких операторов в мультипрограммном режиме.

С конца 60-х до середины 70-х годов Лебедев и Бурцев вместе с Игорем Константиновичем Хайловым вели еще один проект, чрезвычайно важный для обороны страны, – разработку мобильного вычислительного комплекса специального применения 5Э65, предназначенного для систем противоракетной и противосамолетной обороны. Комплекс был построен на полупроводниковых элементах и обеспечивал проведение работ в полевых условиях в реальном масштабе времени с высокой степенью достоверности, которая достигалась за счет применения памяти с неразрушающим считыванием, полного аппаратного контроля и средств устранения последствий сбоев. Эффективности проведения вычислительного процесса способствовали переменная длина слова (12, 24, 36 разрядов), безадресная система команд, магазинная организация арифметического устройства. Машина размещалась в автоприцепе и имела производительность 200 тыс. операций в секунду при наработке на отказ 100 часов. Вариант 5Э67 имел уже производительность 600 тыс. алгоритмических операций в секунду и наработку на отказ 1000 часов. Выпуск этих машин был приостановлен после подписания и вступления в силу договора об ограничении стратегических наступательных вооружений ОСВ-1.



В 1969 году Лебедев и Бурцев приступили к разработке новой серии вычислительных машин, предназначенных для использования в противосамолетной системе. В ходе этой работы Лебедев доказал своим партнерам из ЦКБ «Алмаз», что разработку техники специального назначения, в которой требуется учитывать множество факторов и привлекать специалистов в смежных дисциплинах, целесообразно выполнять под руководством академического института. Первоначально в созданную для решения поставленной задачи серию входили две ЭВМ: 5Э261 и 5Э262, которые имели три центральных процессора и были построены по модульному принципу.

Все модули (процессоры, устройства обмена, блоки оперативной памяти и памяти команд) были охвачены внутренней системой полного аппаратного контроля, что позволяло не только обеспечивать резервирование на уровне модулей на случаи сбоев и отказов, но и проводить автоматическую адаптацию комплексов к выполнению конкретной боевой

задачи. Совокупная производительность комплекса была сравнима с быстродействием БЭСМ-6, а занимаемая площадь составляла всего три квадратных метра. Комплекс ПВО С-300П разрабатывался под руководством Бориса Васильевича Бункина, который очень ценил работу ИТМиВТ и неоднократно обращал внимание на качество работы команды Бурцева.

Производительность 5Э261 составляла 1,5 млн операций в секунду, длина слова – 32 разряда, оперативная память содержала от 3 до 5 блоков по 8 Кбайт, из которых один блок находился в резерве. Командная память имела от 2 до 4 блоков по 64 Кбайт. Для представления чисел была выбрана четверичная система счисления, позволявшая увеличить диапазон представимых чисел с небольшой потерей точности (нормализация проводилась на один четверичный разряд, то есть сразу на два двоичных разряда). Система команд позволяла использовать как одноадресные, так и безадресные (магазинные) команды. Среди интересных особенностей системы адресации – наличие цепного разряда в адресных дескрипторах, позволяющего обеспечивать косвенную адресацию произвольной глубины (в том числе в командах косвенных безусловных переходов). В машине имелось независимое устройство обмена информацией (одно такое же устройство находилось в резерве) по 12 каналам связи. Машины серии 5Э26 работали в широком диапазоне климатических и механических воздействий, имели развитое математическое обеспечение и систему автоматизации программирования и эксплуатировались в составе систем ПВО С-300ПТ сухопутного и морского базирования, а также в ряде других систем реального времени.

В 1990 году началось серийное изготовление комплекса 40У6, главным конструктором которого стал сотрудник Бурцева Евгений Александрович Кривошеев, а ответственным исполнителем — Петр Васильевич Борисов. Пятипроцессорный вычислительный комплекс 40У6 до сих пор используется в составе системы С-300ПМ сухопутного и морского базирования, а также в сложных системах управления крупными объектами специального назначения. В составе систем ПВО С-300ПМУ1 эта ЭВМ поставляется в Индию и Китай.

Передовая для своего времени архитектура 5Э26 стала для Бурцева очередным шагом на пути к созданию вычислительного комплекса с суммарной производительностью 100 млн операций в секунду, требуемой, еще по расчетам Кисунько, для полноценного выполнения задач, стоящих перед системами ПРО. Таким комплексом должен был стать многопроцессорный вычислительный комплекс (МВК) двойного применения «Эльбрус».

На первом этапе реализации проекта «Эльбрус» была создана 10-процессорная машина производительностью 15 млн операций в секунду на элементной базе, освоенной при разработке ЭВМ 5Э261 и 5Э262. Затем появилась машина «Эльбрус-2» производительностью 120 млн операций с 10 универсальными процессорами, однако проектом была предусмотрена возможность использования специализированных процессоров: «Эльбрус 1К2», процессора быстрого преобразования Фурье и векторного процессора.

Специализированный процессор «Эльбрус 1К2» предназначался для выполнения прикладных программ, написанных для БЭСМ-6 (особый вклад в реализацию этой системы внес Владимир Федорович Тюрин, автор ОС «Диспак»). Процессор быстрого преобразования Фурье был создан под руководством Михаила Филипповича Фадеева. Разработка векторного процессора, которая велась под руководством Борисова и Константина Яковлевича Трегубова, началась с детального анализа предметной области – движения тел в жидкости и газах. На специально созданном научно-техническом совете ИТМиВТ Борисов подробно рассказал о методах решения уравнения Навье-Стокса, продемонстрировав, как при решении прогонкой внутренние циклы получающихся систем уравнений можно раскладывать на специализированные вычислители векторного процессора (сумматоры, умножители, делители).



Одновременно он обосновал решение отступить от архитектуры векторной системы Сеймура Крея, который вместо команды деления оставил в своей машине только команду взятия обратной величины. Выводы Борисова были признаны вполне обоснованными, а архитектура процессора была поставлена в зависимость от предназначенных для него задач.

В перечне работ над МВК «Эльбрус» стоит также отметить созданный под руководством Валерия Назаровича Лаута универсальный инженерный пульт, аппаратуру контроля технического состояния для которого делал Олег Константинович Щербаков (заслуги Щербакова, кроме СССР, признаны в Китае – воспроизводство БЭСМ АН и в США – проект «Союз-Аполлон»).

Это была первая в стране и в мире попытка автоматизации процесса контроля технического состояния вычислительной системы с помощью самой этой системы. Задача создания такого пульта, который вполне можно считать прообразом адаптивных ИТ-подсистем, также была поставлена Бурцевым. Система команд напоминала принятую в PDP-8, но адресация памяти была с точностью до разряда (а не байта), и команды имели 16 разрядов. Пульт состоял из четырех рабочих мест, на каждом по четыре экрана и одна клавиатура – на вспомогательных экранах отображалось состояние ремонтируемых устройств, а на главном выводилась телеметрия по любому другому компоненту комплекса. В фоновом режиме осуществлялся постоянный мониторинг МВК.

Серийный выпуск «Эльбрус 1» начался в 1980 году, а в 1985-м появился «Эльбрус 2», который по архитектуре и программному обеспечению незначительно отличался от предшественника, но был ориентирован на более современную элементную базу. МВК «Эльбрус 2» применялся в «Арзамасе-16» и «Челябинске-70», а с 1991 года – в системе ПРО «А-135» ПВО Московского региона.

Коллектив, созданный Лебедевым, имел колоссальный потенциал, которого хватило на несколько десятилетий непрерывного развития, и он мог бы развиваться и сейчас, однако исчезла важнейшая основа его существования – новые задачи. В 90-х годах в стране прекратилось развитие собственной вычислительной техники, своя наука оказалась невостребованной, и коллектив быстро потерялся, разойдясь по разным предприятиям и компаниям.

Многопроцессорность, управление внешними устройствами, инструменты распараллеливания работы множества компьютеров, обращающихся к единой внешней памяти, автоматическая адаптация вычислительных комплексов к решаемой задаче – эти и ряд других технологий были апробированы еще в работах Лебедева и Бурцева. Остаются они актуальными и сегодня, например для создания компьютеров, поддерживающих выполнение приложений с интенсивным и нерегулярным доступом к огромным массивам общей распределенной памяти. Подход к созданию вычислительной техники, продемонстрированный Лебедевым и Бурцевым на множестве успешных проектов, доказал свою правильность – сама по себе гонка за производительностью, например путем наращивания числа узлов кластера или количества процессоров в суперкомпьютерных конфигурациях, не имеет большого смысла, гораздо важнее всегда было умение ставить и решать стратегические задачи, стимулирующие разработчиков к созданию новых алгоритмов и архитектур.

Вера Карпова — внештатный сотрудник музея истории Института точной механики и вычислительной техники им. С.А. Лебедева РАН, **Леонид Карпов** (mak@ispras.ru) — ведущий научный сотрудник Института системного программирования РАН (Москва).