

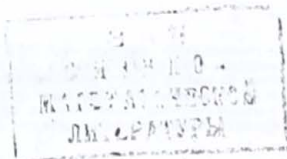
БИБЛИОТЕЧКА
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА *х/б*
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

В помощь
лектору

СУПЕР-ЭВМ

ВЫПУСК 10

Под общей редакцией
члена-корреспондента АН СССР
Г.Г.Рябова



Издательство "Знание"
Москва 1987

ББК 32.973

С 89

Составитель — Нерода В. Я., кандидат технических наук.

M

45125
n10

288-26382a

681/3

С 899

ГОС. ПУБЛИЧ.
НАУЧНО-ТЕХНИЧ.
БИБЛИОТЕКА

Супер-ЭВМ: Сб. статей/Под ред. Г. Г. Рябова. —
С 89 М.: Знание. 1987. — 64 с. — (В помощь лектору.
Библиотечка «Вычислительная техника и ее
применение»).

20 к.

Разработка супер-ЭВМ на сегодня представляет собой одну из актуальных и несложных задач науки и производства. Авторы этого последнего выпуска библиотечки рассказывают об основных проблемах создания и производства высокопроизводительной ЭВМ.

Брошюра рассчитана на читателей, интересующихся основными направлениями развития средств вычислительной техники.

С 240400000—226
073(02)—87

ББК 32.973

Выпуск 10

Предисловие	4
Суперкомпьютеры А. П. Кочур	4
Архитектура супер-ЭВМ Б. А. Бабаян	13
Применение высокопроизводительных ЭВМ В. Ю. Волконский	21
Автоматизация проектирования Г. Л. Лакшин	36
Конструкция супер-ЭВМ Ю. С. Рябцев	47
Программное обеспечение супер-ЭВМ С. В. Семенихин	55

Предисловие

Суперкомпьютеры

А. П. Кочур



Мировой парк супер-ЭВМ составляет в настоящее время около 300 единиц. Число их стремительно растет с каждым годом. Непрерывно растет и число новых фирм, предлагающих свои модели суперкомпьютеров. Многочисленные перспективные разработки новейших суперкомпьютерных систем сверхвысокой производительности теперь уже связывают с целым рядом национальных и межнациональных крупномасштабных проектов, которые рассматриваются как важнейший элемент многообещающих программ создания ЭВМ пятого

поколения — компьютеров 90-х годов.

Как здесь не вспомнить бытовавшее 10—15 лет назад мнение большинства специалистов о том, что потенциальный рынок самых больших и самых дорогих вычислительных систем (супер-ЭВМ) всегда будет крайне низок, 2—3 системы на страну. То, что сейчас происходит в этом секторе рынка, отмечает в своем недавнем обзоре «Перспективы суперкомпьютеров» популярный журнал США «Electronics», не назовешь иначе, как настоящий бум.

В 1978 г. издательство «Знание» выпустило в свет мою научно-популярную брошюру «Супер-ЭВМ», посвященную проблемам и перспективам создания, развития и использования первых машин суперкласса — сверхвысокой производительности. С тех пор верный своей супертеме, на работу над которой еще в начале 70-х годов меня благословил академик Виктор Михайлович Глушков, я подготовил ряд других публикаций, где исследовались некоторые принципиальные общие вопросы суперкомпьютерной техники, которая в настоящее время находится на стратегически значимом ключевом направлении (см., к примеру, статьи: «Супер-ЭВМ в США», ж. «США», № 6, 1980; «Проблемы Супер-ЭВМ», сб. «Кибернетика. Дела практические», «Наука», 1984; «Внимание — Суперкомпьютеры!», М., Наука, 1987).

Публикации по вычислительной технике, которую справедливо называют подлинным катализатором и двигателем научно-технического прогресса, всегда вызывают живой интерес читателей. Особый интерес, естественно, к публикациям по супер-ЭВМ, разработку которых Генеральный секретарь ЦК КПСС Михаил Сергеевич

Горбачев назвал на XX съезде ВЛКСМ сверхзадачей нашей науки и экономики. Сегодня мы уже можем сказать о прорыве и на этом «жизненно важном направлении нашего развития». Об этом, в частности, и рассказывает серия статей в центральной печати, посвященных созданию оригинальных отечественных супер-ЭВМ «Эльбрус-2»: «Перспективы отечественных супер-ЭВМ» И. Иванова («НТР», № 8, 1987); «Как приходит успех» академика А. П. Ершова (Известия, — 1987. — 3 мая); «Что такое супер-ЭВМ?» к. т. н. А. Авдулова (Труд. — 1987. — 23 мая).

Предлагаемая вниманию читателей новая публикация о суперкомпьютеризации высечивает основные горизонты и перспективы стремительного совершенствования отечественной и мировой суперкомпьютерной техники — вершины компьютерной пирамиды, центрального элемента многочисленных национальных и международно-национальных сетей ЭВМ коллективного пользования.

Суперкомпьютер — уникальный феномен современного этапа научно-технической революции с бесспорно большим будущим. Супер-ЭВМ с рекордными, практически предельными для своего времени параметрами, обеспечивая наиболее оптимальные технико-экономические показатели достижения производительности, всегда будут отправной точкой дальнейшего развития средств вычислительной техники.

Лет десять назад в мире работало немногим более 500 тыс. ЭВМ. В своей брошюре тех лет «Супер-ЭВМ» автор предсказывал, что через каких-то два-три года мировой парк ЭВМ всех классов вплотную приблизится к миллиону. Нехитрые эти прогнозы, как и следовало ожидать, сбылись.

Никто, пожалуй, и не знает точно, сколько компьютеров используется сегодня в мире, — так стремительно растет их общая численность с каждым годом. Одних только персональных ЭВМ, каждая из которых по всем параметрам превосходит компьютеры первого поколения, год назад было продано более 15 млн.

Наводняющие рынки средств вычислительной техники персональные ЭВМ приблизились по производительности и объему оперативной памяти к типичным для современных мини-ЭВМ стандартам — мегафлопам и мегабайтам, которые еще недавно были характерны лишь для больших ЭВМ и мощных суперкомпьютеров. Серийный выпуск первых персональных ЭВМ производительностью до 40 Мфлопс — настольных персональных суперкомпьютеров — объявлен на конец 1987 г. сразу четырьмя фирмами США. А в недалеком будущем освоит мегафлопы и мегабайты грозит и микрокомпьютерная техника.

Исключительно динамичное развитие средств вычислительной техники, разрабатываемых на основе микропроцессорных БИС и СБИС, привело в последние годы к появлению, помимо мощных супер-ЭВМ, таких новых категорий машин суперкласса, как названные выше персональные суперкомпьютеры, а также супермикро-, супермини- и мини-суперкомпьютеры.

Должен подчеркнуть, что приставка «супер» носит здесь не столько традиционно рекламный, сколько вполне научный классификационный характер, отражая глубинную суть происходящих в мировой компьютерной технике перемен. Эти перемены вызваны ориентацией современной передовой технологии на высшее каче-

ство и рекордные, предельно достижимые возможности на всех уровнях. Таким образом, вполне закономерно появление в последние годы большого числа «суперкомпонентов» ЭВМ — супертранзисторов, суперчипов, суперБИСов, суперкристаллов, супермакропроцессоров. А также использование суперэффектов, суперматериалов, суперподложек, супероборудования, суперинтегральных технологий — всего того, что характерно для утверждающейся ныне «суперэлектроники» — темы отдельного актуального исследования.

Термин «суперкомпьютер» применительно к сверхбыстрым ЭВМ появился еще в начале 60-х годов, хотя первые суперкомпьютеры по-настоящему заявили о себе лишь в 70-х годах. Но только в последние годы этот термин утвердился настолько, что сегодня его уже можно найти во всех современных научно-технических словарях и энциклопедиях (см., например: Mc Graw, Hill Dictionary of Science and Techn. Terms, 3th. Ed. 1984, pp. 1583—1586). Кстати, в идущем в погу со временем учебном пособии для нашей средней школы «Основы информатики и вычислительной техники» (М.: Просвещение, 1985), подготовленном по инициативе и при участии академика Андрея Петровича Ершова, назван ряд трудоемких задач, для решения которых применяются супер-ЭВМ, делающие миллиарды операций в секунду.

Вернемся, однако, к нашим малым суперкомпьютерам. Активно конкурируя между собой в совершенствовании своих основных параметров в борьбе за рынки сбыта, упомянутая выше малая суперкомпьютерная техника все чаще рассматривается сейчас как вполне приемлемая альтернатива дорогостоящим суперкомпьютерам при решении большого числа научно-технических задач, которые еще недавно считались исключительной прерогативой мощных супер-ЭВМ.

Бурный прогресс в классе мини-ЭВМ с акцентом на супермини- и мини-суперкомпьютеры (их появление вызвано необходимостью заполнить образовавшийся было разрыв в вычислительной мощностии мини- и суперкомпьютеров) стал, в свою очередь, заметным стимулирующим фактором форсированной разработки больших и сверхбольших ЭВМ с характерным для нынешнего этапа развития вычислительной техники эффективным симбиозом малых, больших и сверхбольших ЭВМ в сетях и суперсетях ЭВМ коллективного пользования. Мощные суперкомпьютеры выступают здесь как главный, центральный элемент, а многочисленные мини-ЭВМ — спутники супер-ЭВМ — промежуточные звенья между пользователями и центральным процессором суперкомпьютера сети. Спутники обеспечивают подготовку задач и данных, а также осуществляют оперативную связь с суперкомпьютерами.

Рекордно быстрый рост парка суперкомпьютеров (их ежегодный прирост составляет в последние годы около 60%) и масштаб их применения заставляет автора уделить основное внимание именно этому классу машин. Следует учитывать, что суперкомпьютеры приобретают в настоящее время жизненно важное значение для большого числа потребителей, выполняя в приемлемые сроки или даже в реальном масштабе времени наиболее сложные научно-технические задачи с крайне большими объемами вычислений и данных. Кроме того, следует иметь в виду, что прогресс в области суперкомпьютеров в значительной степени отвечает, пожалуй, само-

му актуальному направлению многочисленных современных программ исследований и разработок ЭВМ пятого поколения, наиболее многообещающих, по словам английского специалиста по супер-ЭВМ Дж. Симонса, программ из тех, с которыми когда-либо приходилось иметь дело мировой компьютерной индустрии.

Как ожидается, мировой парк суперкомпьютеров увеличится к концу 1990 г. до 1700 единиц, удовлетворяя потребности в машинах данного класса лишь на 35—40% и обеспечивая перспективу устойчивого роста этого парка до конца нынешнего столетия.

Предпосылкой суперкомпьютерного бума стала потребность в выполнении в век научно-технического прогресса огромных объемов вычислений с крайне большими скоростями. Повышение спроса на суперкомпьютеры обусловлено характерным для прогрессивной технологии последнего времени постоянным улучшением глобального показателя их эффективности, определяемого отношением — стоимость/производительность. К еще одной существенной причине бума относится появление многочисленных и вполне доступных по цене супермини-компьютеров, которые заметно снижают затраты на внедрение сверхскоростных вычислений на основе суперкомпьютеров в системе «потребитель — супермини — суперкомпьютер» сетей ЭВМ.

Таким образом, для все большего числа научных и специальных уникальных применений использование суперкомпьютеров в общем комплексе с соответствующей сопутствующей техникой закономерно оказывается экономически и технически наиболее приемлемым, а часто и единственно возможным. Как отмечает Крейг Рэмси, специалист по суперкомпьютерам фирмы American Supercomputer, сектор машин, приближающихся по своим характеристикам к категории супер-ЭВМ, будет весьма активно развиваться не только потому, что суперкомпьютеры имеют наиболее оптимальные технико-экономические данные, но и потому, что реализуемое сверхвысокое быстродействие способствует появлению новых разнообразных приложений, обеспечивая необыкновенно быстрый рост областей и масштабов их применения.

Суперсуперкомпьютеры. Непрерывное повышение требований к производительности суперкомпьютеров, характерное для современного этапа научно-технического прогресса, создает непреходящую проблему — разработку суперсупер-ЭВМ, в 100—1000, а то и в 10000 раз превосходящих по своим вычислительным возможностям лучшие из известных сегодня супер-ЭВМ. Высший стандарт производительности супер-ЭВМ сейчас определяется «гигафлопами» и приблизится к десяткам и сотням «гигафлоп» в 1990 г.

Термин «суперсуперкомпьютер» впервые появился десять лет назад в обзорной статье, посвященной тенденциям и перспективам развития суперкомпьютерной техники, в журнале «Дэйтамейн» (№ 8, т. 23, 1977).

Суперсуперкомпьютеры (Супер²-ЭВМ), на которые нацелены сегодня перспективные исследования и разработки сверхмощных вычислительных систем новых поколений и которые гипотетически определяют по своим вычислительным возможностям насущные потребности современного научно-технического прогресса — это, по сути, завтрашние суперкомпьютеры, которые по своим основным параметрам со временем, естественно, отойдут к разряду малых суперкомпьютеров мини-, а затем и микро-классов. Отсюда сле-

дует, что представление о супер-ЭВМ и по используемой элементной базе, и по структуре организации, и программному обеспечению, и прежде всего по производительности будет непрерывно изменяться и совершенствоваться со временем вместе со сменой поколений ЭВМ.

Традиционная структурная организация «последовательных» ЭВМ, как стало очевидным на рубеже 70—80-х годов, оказалась серьезным препятствием для достижения требуемой сверхвысокой производительности супер²-ЭВМ. Практически непреодолимыми проблемами, заставшими говорить о приближающемся кризисе традиционных ЭВМ и необходимости создания компьютеров нового типа, оказались:

- сложность взаимодействия пользователя с ЭВМ;
- неэффективность ЭВМ при обработке информации в естественной для человека форме (речь, тексты, фото, графики);
- принципиальные ограничения по быстродействию при решении большого числа актуальных задач, например в области искусственного интеллекта;
- принципиальные структурные ограничения, исключающие эффективное использование ЭВМ в многомашинных системах для наращивания вычислительной мощности.

Машины пятого поколения, которые уже в начале 90-х годов должны прийти на смену традиционным ЭВМ, будут существенно отличаться и по своим характеристикам и по функциональным возможностям, обеспечивая:

- применение качественно новой элементной базы — СБИС на десятки миллионов транзисторов на кристалле;
- использование сверхъемкой оперативной памяти — до 160 Мбайт и внешней памяти до 10 Тбайт;
- создание сверхъемких информационно-баз данных и знаний и экспертных систем на основе искусственного интеллекта;
- возможность непосредственной обработки информации в естественной для человека форме;
- возможность выполнения ассоциативных и логических заключений;
- способность к самообучению и самодиагностике;
- выполнение программ с очень большой степенью параллелизации с использованием языков высокого уровня;
- широкое использование в сетях ЭВМ распределенной обработки данных.

Эти и другие выдающиеся показатели и возможности ЭВМ пятого поколения позволяют достигнуть уже в ближайшем будущем быстродействия в $10 \div 1000$ Гфлопс, приближаясь к требованиям современных супер²-ЭВМ.

Супер²-ЭВМ — это своеобразная заявка научно-технического прогресса компьютерному веку. В ее основе лежит начало революционных по своей сути работ по созданию сверхбольших и сверхскоростных интегральных схем, предвещающих новую эру в области суперкомпьютеров. Предстоит исследование архитектур с максимальным параллелизмом («золотое дно компьютерной техники»), невиданная даже для компьютерной индустрии активизация исследований по экспертным системам и искусственному интеллекту. Большое внимание уделяется становлению физических и технологических основ принципиально новой элементной базы суперкомпью-

ютеров новейших поколений — криоэлектронники, фотоники, биоэлектронники — открывающих устойчивый выход на терафлопы.

А что вы скажете о суперкомпьютерах последующих поколений, в которых внутренние сигналы будут распространяться со скоростями, большими, чем скорость света? Такие суперсистемы, еще недавно существовавшие лишь как абстрактная идея, теперь стали предметом серьезных фундаментальных научных исследований. Идея создания таких ЭВМ уже поддается моделированию на современных сверхмощных супер-ЭВМ.

Настойчивые попытки приблизиться к заоблачным высотам супер²-ЭВМ новых и сверхновых поколений не оставляют без внимания и экзотические сверхмодные философии с так называемой трансцендентной логикой, далекой от нашей привычной трехмерной логики. Эти «философии» утверждают, что информация, с которой оперирует человеческая память, заключена не в нашем замечательном мозге, а вне его; наш мозг — этот уникальный интеллектуальный биоинтерфейс, — сам того не подозревая, круглосуточно обеспечивает устойчивую связь именно с внешним миром (используя, кстати, лишь долю своих возможностей, если преимущественно ты живешь в своем трехмерном мире), непрерывно подключаясь к безбрежному и вечному Вселенскому Сознанию с его многомерными информационными потоками, где зафиксировано каждое движение, каждое слово, каждая мысль — все, что когда-либо было, что есть и что еще будет... Так что, «если хочешь научиться летать со скоростью мысли, осознай вначале, что уже прилетел»¹.

Или что вы скажете о попытках установить связь со своим суперкомпьютером с помощью... сейсмической связи, гравитационных волн, нейтринной связи. Они вполне серьезно рассматриваются² как «перспективные виды связи на принципиально новой основе», как возможная альтернатива такой привычной нам, но имеющей известные ограничения электромагнитной радиосвязи.

И никого уже не удивляет, что в перспективе (шестое-седьмое поколение ЭВМ в начале нового тысячелетия) ученые видят «Человеко-Машинный Сверхинтеллект», охватывающий всю нашу планету — Космический Суперинтеллект Земли.

«Компьютер, компьютер, Компьютер...» Понятие фантастические возможности открывает перед человечеством суперкомпьютерная техника. Опустимся все же на землю и хотя бы в общих чертах оценим то, что уже стало реальностью, и то, что еще ждет своего часа.

По данным зарубежных фирм, мировой объем продаж продукции электронной промышленности, большую часть которой составляет компьютерная техника и ее программное обеспечение, в настоящее время превышает 200 млрд. долл. К концу нынешнего столетия этот показатель, как ожидается, вырастет до впечатляющей величины — 1 трлн. долл.

¹ Р. Б а х. Чайка по имени Джонатан Левингстон // Иностранная литература. — М.: 1978.

² Перспективные виды связи на принципиально новой основе // Обзоры иностр. техн. и экон. средств связи. — Вып. 2. — М.: Изд-во ЭКОС, 1986.

Особо следует отметить беспрецедентные темпы ожидаемого развития интеллектуальных систем — более чем на 500% — основы суперкомпьютерных экспертных систем пятого поколения. Стоимость средств, выделяемых на исследование и развитие мирового парка интеллектуальных систем, составляла в 1986 г. около 400 млн. долл., к 1990 г. эти расходы, по существующим оценкам, возрастут до 20 млрд. долл.

Что и говорить, темпы, масштабы и перспективы компьютеризации просто ошеломляющие. Буквально на глазах одного поколения пользователей ЭВМ компьютер из уникального феномена своего времени — техники для избранных — становится все более совершенным, массовым, вполне доступным и все более необходимым для всех техническим средством. Сегодня все более производительные ЭВМ активно входят в нашу повседневную жизнь, а завтра мощные информационные экспертные интеллектуальные системы коллективного пользования станут такими же привычными ее элементами, как автомобиль, телевизор, телефон и электронные игры.

Хотим мы того или не хотим, но постепенно на всех уровнях возрастает и наша зависимость от этой всеисильной техники, ставшей своеобразным символом века чуть ли не со времени своего рождения. На память приходят слова популярной песенки о компьютере:

Как человек не может без тебя.
Компьютер, ты рождение века.
Твои глаза на мир глядят.
Не можешь ты без человека,

Реализуемая в нашей стране программа всеобщего — со школьной скамьи — компьютерного образования, как известно, направлена на решение глубинных масштабных проблем ускорения социально-экономического развития страны на основе интенсификации — на базе широкого и массового использования последних достижений наиболее передовой вычислительной техники.

Компьютерная грамотность нацелена не только на то, чтобы сполна и наиболее эффективно использовать огромный современный информационный потенциал для решения своих актуальных текущих и перспективных задач, в не меньшей степени она призвана обеспечить и нашу готовность к грядущим качественным переменам в обществе, непрерывно насыщаемом этой прогрессивной техникой, а также к ожидаемым существенным — революционным — переменам в самой информационной технике будущего.

Разрабатываемая отечественная компьютерная техника суперкласса, которая в настоящее время вышла из области серьезных фундаментальных исследований на основательный промышленный и организационный уровень, становится предвестником больших перемен в нашей стране. Она создается на высших приоритетных началах академическими и отраслевыми объединениями, а также в соответствии с крупномасштабной Комплексной программой научно-технического прогресса стран — членов СЭВ до 2000 года.

Целью международного сотрудничества в рамках упомянутой выше программы является широкое обеспечение всех сфер производства и общественной жизни наиболее передовыми средствами

вычислительной техники — «основы кардинального повышения производительности труда, экономии ресурсов, материалов и энергии, ускорения научно-технического прогресса в народном хозяйстве, резкого сокращения сроков научных исследований, качественной перестройки непродуцированной сферы».

Для достижения этой масштабной цели поставлена задача стратегического значения — создать к 1990 г. супер-ЭВМ нового поколения с быстродействием более 10 Гфлопс с использованием принципов искусственного интеллекта, совершенных средств общения человека с машиной «для применения в решении особо сложных задач, в управлении экономикой, в создании баз знаний».

Актуальность этой научно-технической и экономической задачи сегодня особенно очевидна.

Одним из промежуточных этапов на пути к отечественным супер-ЭВМ производительностью свыше 10 Гфлопс стали разработки суперсистем с оригинальными структурными организациями. Так, Институтом кибернетики им. В. М. Глушкова АН УССР создан Макроконвейерный вычислительный комплекс супер-ЭВМ «Суперкиб-108» производительностью свыше 100 Мфлопс, реализующий макроконвейерный способ выполнения вычислений. Институтом точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева АН СССР создана многопроцессорная супер-ЭВМ «Эльбрус-2» производительностью около 1 Гфлопс с архитектурой, позволяющей практически линейно наращивать производительность суперсистем с ростом числа процессоров, что исключительно важно для достижения вершин «суперкомпьютерного Эвереста».

К 1989 г. планируется разработка мощной универсальной супер-ЭВМ-ЕС, состоящей из сверхбыстрого арифметического процессора конвейерной обработки векторных данных, сверхъемкой быстрой памяти и высокоскоростного канала обмена через интеллектуальные интерфейсы. Супер-ЭВМ-ЕС будет реализована на базе серийной выпускаемой универсальной ЭВМ ЕС старшей серии.

Компьютерная революция (начало которой связывают с освоением миллионов тиражей персональных ЭВМ и выходом на орбиту мощных суперкомпьютеров), перспектива глобальной широкомасштабной компьютеризации, поистине фантастические возможности суперкомпьютерных систем ближайших поколений не первый год привлекают внимание ученых и политиков промышленно развитых стран мира.

Разработка принципов производства новейших суперкомпьютеров начата Японией еще с 1979 г. Уже с апреля 1982 г. всему компьютерному миру Япония бросила вызов форсированного создания практически за десятилетие ЭВМ пятого поколения. В настоящее время известно несколько крупномасштабных национальных и межнациональных программ, в соответствии с которыми ведутся многообещающие работы по перспективным ЭВМ принципиально нового типа. В числе первых к этим работам подключилась Великобритания, где по предложению специального комитета «Альви» при поддержке министерства обороны министерство промышленности выделило на 5 лет 350 млн. ф. ст. на программу крайне престижных разработок сверхновых ЭВМ. Со временем стала известна и национальная программа научно-исследовательских работ в области суперкомпьютеров, активно реализуемая ведущими компьютерными фирмами США под эгидой Национального фонда и

министерства обороны США. Намерена активизировать свои работы по созданию супер-ЭВМ транснациональная корпорация ИВМ.

Свои престижные национальные программы создания суперкомпьютеров нового поколения реализуют Франция и ФРГ. Известна и Западно-Европейская научно-производственная кооперация по программе «Эврика» с курсом на создание супер-ЭВМ производительностью до 30 Гфлопс, возникшая как ответ на вызов технической экспансии Японии и США в области суперкомпьютеров.

Анализируя провозглашенную несколько лет назад Стратегическую компьютерную инициативу (СКИ), осуществляемую в рамках небезызвестной программы СОИ, программы «звездных войн», военные специалисты Запада приходят к выводу, что главным в потенциальной противоракетной системе с элементами космического базирования министерства обороны США станут не средства поражения, а мощные суперкомпьютеры нового поколения с системами искусственного интеллекта с их изощренным, баснословно дорогим программным обеспечением. Комментарии, как говорится, излишни.

Социально-экономические горизонты и последствия набирающей темп компьютеризации, активное внедрение новейших информационных технологий, все более широкое, а в перспективе едва ли не массовое использование экспертных систем с искусственным интеллектом рассматриваются сейчас через призму беспрецедентного факта — впервые в истории техники темпы смены поколений технических средств, созданных человеческим разумом (вместе с машинным интеллектом), стали заметно опережать темпы смены поколений людей с их небеспредельной способностью эффективно осмысливать, осваивать и использовать эту, пожалуй, самую наукоемкую технику из всех когда-либо созданных.

Компьютерная технология — катализатор и двигатель научно-технического прогресса — не только стимулирует стремительную смену поколений техники в таких основополагающих областях прогресса, как связь, космонавтика, робототехника, непрерывное обновление и даже самообновление компьютерной технологии обеспечивает невиданную ранее интеграцию и взаимозависимость важнейших областей и отраслей науки и техники, традиционно до последнего времени развивавшихся как бы самостоятельно. Это позволяет говорить о компьютеризации как о многомерном, многовекторном явлении, которое наверняка уже завтра приведет нас к новейшим непредеказуемым сегодня переменам и в возможностях самой компьютерной техники, и в наших фундаментальных представлениях о природе Человека, Космоса и Вселенной.

Сегодня человечество стоит у истоков качественно нового этапа компьютеризации — компьютеризации, ориентированной на суперкомпьютерную технику. Два десятилетия незаметно для непосвященных, исподволь закладываются для нее системные, программные, технологические и даже психологические¹ (вспомним «психологию программных систем» — ТИИЭР, т. 74, № 8, 1986) основы. На нее нацелены многочисленные современные прогнозы перспективного развития и использования суперкомпьютеров новых поколений.

¹ Психология программных систем // ТИИЭР, т. 74, № 8, 1986.

Архитектура супер-ЭВМ

Б. А. Бабаян

Супер-ЭВМ — это машины предельной производительности на данном этапе развития вычислительной техники. Никакого другого определения этого понятия не существует. Однако совершенно очевидно, что те параметры, благодаря которым в настоящее время машина называется супер-ЭВМ, через несколько лет будут у машин средней производительности. Почему же такого рода машины выделены и им даже присвоено специальное название? Это происходит по крайней мере по двум причинам. Во-первых, супер-ЭВМ позволяет людям производить расчеты, которые нельзя было выполнить до этого. В результате можно получать новые знания о явлениях, ранее человечеству не известных. Такое положение можно сравнить с открытием новых законов и явлений природы. Супер-ЭВМ в буквальном смысле помогают делать открытия. Во-вторых, разработка предельных по характеристикам машин приводит к необходимости совершенствования методов создания и самой структуры машины. Полученные при этом достижения впоследствии с успехом используются и при разработке других более медленных машин.

В связи с приведенным выше определением супер-ЭВМ нельзя говорить о каких-то их специфических особенностях во все времена. Можно лишь говорить об особенностях или проблемах современных супер-ЭВМ. В следующий период для супер-ЭВМ будущего эти проблемы будут решены, но возникнут другие, актуальные для создания супер-ЭВМ нового поколения. При разработке машины предельной производительности все должно быть предельным.

Все статьи данного сборника посвящены различным проблемам супер-ЭВМ. Эта же статья рассматривает важные вопросы их структуры, или, как говорят, логического построения.

В определенном смысле ЭВМ подобна алгоритму решения большой задачи. Сколько бы ни была сложна задача, она разбивается на совокупность элемен-

тарных операций над числами (сложение, умножение и т. д.), которые, в свою очередь, сводятся к совсем уж элементарным таблицам умножения и сложения цифр. Элементарные операции носят совершенно универсальный характер и не специфичны для какой-либо конкретной задачи. Конкретность задачи выражается во взаимосвязи операций, в связи между операциями по исходным данным и результатам. Аналогично, любая ЭВМ строится из элементарных логических кирпичиков операций, обрабатывающих простейшие данные, которые присутствуют в ней в большом количестве. Индивидуальность каждой машины — это конкретный способ или схема соединения между собой ее узлов. Упомянутые элементарные логические операции обладают важным свойством, используя их и соединяя нужными способами, можно построить любую достаточно сложную функцию, т. е. эта система элементарных функций универсальна. Практика разработки машин привела конструкторов к убежденности, что среди большого числа возможных систем элементарных функций следует выбирать простейшие. Поэтому в настоящее время все машины, в том числе и супер-ЭВМ, строятся на базе двоичной арифметики, т. е. элементарными цифрами в них являются ноль и единица. Ясно, что проще нельзя. А в качестве элементарных логических кирпичиков функций выбраны двухместные функции, т. е. функции с двумя входами и одним значением этих функций. В общем подсчете их немного — всего 16, но полезных много меньше.

Физическая реализация этих элементарных функций и методы их связи меняются в машинах от поколения к поколению. Скорость работы машины, конечно, зависит от скорости работы каждого элемента, от скорости передачи информации от элемента к элементу и от свойств общей логической схемы соединения элементов, в частности, от степени параллельности работы элементов, именно об этом мы поговорим здесь более подробно.

Чтобы понять проблемы структуры супер-ЭВМ настоящего времени, полезно взглянуть на тот путь, который прошла структура и архитектура ЭВМ. Первые машины имели достаточно простую структурную схему, которая состояла из четырех крупных блоков, или устройств: арифметического устройства, устройства ввода-

вывода, запоминающего устройства и устройства управления.

В арифметическом устройстве выполнялись операции, исходные данные и промежуточные результаты хранились в запоминающем устройстве. В этом же запоминающем устройстве хранятся команды, которые управляют работой машины. Приблизительно такую структуру имела первая отечественная быстродействующая вычислительная машина, созданная под руководством родоначальника советской вычислительной техники академика С. А. Лебедева в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР.

Команды в этой машине имели приблизительно следующий вид:

Команда арифметической операции (+, —, × и т. д.)	Адрес первого операнда в запоминающем устройстве	Адрес второго операнда в запоминающем устройстве	Адрес результата операции
---	--	--	---------------------------

Последовательность таких команд считывается из запоминающего устройства, и каждая команда выполняется следующим образом. Из ячеек запоминающего устройства по адресам числа, указанным в команде, считываются операнды для текущей операции, затем эта операция выполняется в арифметическом устройстве и ее результат помещается в запоминающее устройство по адресу, указанному в команде.

Временную диаграмму работы такой машины можно представить себе следующим образом: выполняется первая команда, для чего считывается первый операнд из запоминающего устройства, считывается второй операнд из запоминающего устройства, выполняется операция в арифметическом устройстве, записывается результат в запоминающее устройство. Затем эта последовательность действий машины повторяется для второй, третьей и т. д. команд. Отсюда хорошо видно, что все блоки в этой машине работают последовательно, ничего не работает параллельно. Сначала считываются числа одно за другим, затем выполняются операции, и далее результат записывается в память. К этому надо еще добавить, что когда начинает работать ввод или вывод данных, прекращаются арифметические операции. Таким образом, единственный блок в этих ма-

шинах, который работал параллельно с основными устройствами, — это устройство управления. По своему характеру устройство управления должно работать параллельно, только так можно организовать работу основных устройств. Отсутствие параллельности в первых машинах было обусловлено по меньшей мере двумя факторами. Во-первых, большие физические размеры и низкая надежность оборудования не позволяли создать сложной конструкции. Тем более нельзя было ставить вопрос о введении нескольких однотипных параллельно работающих устройств. Во-вторых, люди просто не имели опыта организации параллельного счета и параллельной работы устройств, а это, как показало дальнейшее развитие, оказалось очень просто.

В дальнейшем по мере прогресса технологии и сокращения размеров элементов, повышения их надежности в машинах все больше и больше стали использовать параллельные структуры. При этом прогресс в этой области на каждом этапе развития происходил именно в классе супер-ЭВМ своего времени. Вместе с повышенным миниатюризации элементов росла их скорость. Этот рост можно очень грубо оценить как линейный. Однако с ростом миниатюризации и надежности конструкторы получили возможность в одной машине использовать значительно больше элементов. Неземлемо возросла интеграция элементов. Рост числа элементов в процессе миниатюризации пропорционален уже не первой степени, а квадрату, даже кубу сокращения линейных размеров. Это позволяло надеяться при параллельной работе на столь же большое возрастание скорости работы ЭВМ. И конструкторы стали активно искать пути создания параллельных структур машины. Уже следующие варианты конструкций машин позволяли устройству ввода-вывода работать параллельно с арифметическим устройством. Кроме того, появилась возможность обеспечивать параллельную работу запоминающего и арифметического устройств.

Таким образом, все четыре устройства, входящие в конструкцию первых машин, оказались работающими параллельно.

Дальнейший рост интеграции позволил в одной машине использовать несколько однотипных устройств, работающих параллельно. Пожалуй, впервые это произошло с запоминающим устройством. Стали использо-

вать несколько блоков запоминающих устройств, в которых равномерно размещалось все адресное пространство памяти. Стали говорить о расслоении памяти.

Теперь многие обращения в память выполнялись параллельно и сокращались по суммарному времени. Если при этом обеспечить более быстрое арифметическое устройство, то можно значительно ускорить работу машины.

Затем стали вводить несколько арифметических устройств. Эти устройства были специализированы по операциям. Отдельно стал делаться умножитель, отдельно сумматор, отдельно делитель и т. д. Специализированные устройства работали, естественно, быстрее универсальных, тем более что и внутри арифметических устройств стали использовать параллельные алгоритмы выполнения каждой арифметической операции. Кроме того, различные арифметические устройства стали работать параллельно. Это привело к дальнейшему повышению быстродействия.

Наконец, стали использовать параллельную работу в пределах одной машины нескольких устройств управления и устройств ввода-вывода.

Машина, имеющая несколько устройств управления, может выполнять несколько программ одновременно. Такие машины стали называть многопроцессорными. И вот развитие структуры супер-ЭВМ достигло такого уровня, когда каждый тип устройства представлен несколькими экземплярами, и все эти устройства, как однотипные, так и разнотипные, имеют возможность работать одновременно — параллельно.

Казалось бы, с точки зрения структур достигнуто совершенство. При параллельной работе увеличение числа устройств по мере совершенствования технологии и повышения интеграции должны привести к пропорциональному росту производительности. Однако все оказалось не так просто.

По мере роста числа устройств росло число вариантов их взаимной коммутации в рамках одной машины. Приведем две возможные схемы: традиционную многопроцессорную систему и матричную, разработанную в Иллинойском университете США. Эти схемы отличаются сложностью коммутации, так, в первой схеме каждое устройство управления соединяется с каждым блоком памяти. В такой структуре сложность коммутации уве-

личивается пропорционально квадрату чисел устройств, в нее входящих, и, исходя из практических соображений, невозможно соединить больше 16 устройств управления, не потеряв значительно в производительности. Казалось, все преимущества на стороне второй схемы, так как увеличение числа параллельно работающих устройств не усложняет удельную (на одно устройство) коммутацию. Однако практика показывает, что дело обстоит значительно сложнее. Не надо забывать, что перед создателями супер-ЭВМ стоит задача повышения производительности системы, в том числе при решении одной мощной задачи. Поэтому структура должна быть такой, чтобы программисты имели возможность написать реальную программу, достаточно эффективно загружающую все параллельно работающие устройства. То, что это не всегда возможно, видно из построения предельного примера. Если, например, мы в качестве структуры сверхпараллельной супер-ЭВМ выберем структуру, состоящую из большого числа никак не связанных между собой более простых машин, то, хотя такая структура может формально обеспечить достаточно большое число выполняемых операций в секунду, нельзя даже говорить о возможности решения какой-либо одной большой задачи на такой структуре.

Для того чтобы иметь возможность фактически заставить параллельно работать различные устройства супер-ЭВМ, эта структура должна быть в определенном смысле адекватна структуре задач, которые должны на ней решаться.

Правильный учет структуры задач и методов программирования с самого начала развития вычислительных машин и супер-ЭВМ, в частности, определял основные направления развития структур ЭВМ и супер-ЭВМ. Удобство программирования — одна из важнейших проблем вычислительной техники, и в этой области, именно в классе супер-ЭВМ, на отечественных машинах достигнуты максимальные успехи. Созданы машины, наиболее удобные в программировании и сокращающие трудозатраты на программирование в несколько раз.

Вообще говоря, проблема программирования является очень сложной и определяющей в развитии ЭВМ и супер-ЭВМ в частности. Дело в том, что по информации

онной сложности программы для ЭВМ, по всей видимости, превосходят любой другой задокументированный результат человеческой деятельности. Этот вопрос оказался настолько серьезным, что на границе 60-х и 70-х гг. стали говорить о кризисе программирования, который стал значительным тормозом в развитии средств вычислительной техники. Его приблизительно можно описать следующим образом. Существует достаточное количество крайне полезных и весьма сложных задач, для решения которых достаточно существующая производительность и другие функциональные характеристики разработанных машин, но программу для этих задач невозможно составить существующими методами программирования ввиду большой информационной сложности. При этом увеличение числа программистов не приводит к успеху. Практика программирования с достоверностью приводит к выводу, что важнейшим методом облегчения программирования является использование специально созданных для изложения алгоритмов универсальных языков программирования, называемых языками высокого уровня. Хорошо понимая это, разработчики вычислительных машин стали ориентировать их структуру на эффективную реализацию этих языков. В частности, в некоторых наших отечественных супер-ЭВМ удалось полностью избавиться от программирования низкого уровня.

Возвращаясь теперь к изложенным выше вариантам структур ЭВМ, отметим, что к важным недостаткам многих из них относится тот факт, что реальные задачи не удавалось запрограммировать для них так, чтобы получить достаточно высокую загрузку параллельно работающего оборудования. Казалось бы, разработчики архитектуры дают возможность использовать высокопараллельный счет и как следствие получить большую скорость вычисления, а программисты не могут «достаточно хорошо» запрограммировать задачи. Конечно, здесь беда совсем не в слабости программистов, а в неправильно выбранной структуре машин. При этом речь идет об очень большой потере эффективности. При плохо разработанной структуре производительность системы составляет единицы процентов от предельно достижимого при полной загрузке параллельно работающих устройств.

Безусловно положительно зарекомендовала себя хорошо известная теперь многопроцессорная архитектура. Однако она не позволяет увеличить число процессоров из-за сложности коммутации. Поиски параллельных структур, адекватных решаемым алгоритмам, обратили внимание конструкторов ЭВМ на векторные вычисления. Создать структуру, на которой можно было бы получить высокопараллельную обработку векторных вычислений, оказалось не так сложно. Сейчас можно смело сказать, что если бы любая задача полностью сподилась к работе над векторами достаточно большой длины, можно было бы разработать систему с высокоэффективной параллельностью. И таких проектов чисто векторных супер-ЭВМ появилось немало. Однако опыт их использования показал, что в любой, даже самой векторной задаче существует достаточно много скалярных вычислений.

В реальных задачах число скалярных вычислений может составлять 30—50%. Таким образом, если все 70% векторных вычислений в задаче методами распараллеливания выполнять практически за нулевое время, то вся задача будет считаться быстрее не более чем в 3 раза. Методы распараллеливания векторного счета стали включать во все существующие супер-ЭВМ. Однако стало ясно, что ключевой будет проблема распараллеливания скалярных вычислений. Именно в этой области в настоящее время ведутся интенсивные поисковые научные работы разработчиков структуры ЭВМ. Существует целый ряд крупномасштабных проектов как у нас в стране, так и за рубежом, направленных на решение этой сложнейшей проблемы.

Области применения высокопроизводительных ЭВМ

В. Ю. Волконский

ВВЕДЕНИЕ

Термин «супер-ЭВМ» появился на рубеже 80-х гг. Так стали называть универсальные ЭВМ с производительностью 100 и более миллионов математических (арифметических и логических) операций в секунду. К настоящему времени уже сложился солидный парк таких машин (по данным на начало 1986 г. в мире было установлено 165 супер-ЭВМ). Отличительной чертой супер-ЭВМ является их универсальность, благодаря которой возможно применение таких машин для широкого круга областей. Большую часть упомянутого парка супер-ЭВМ составляют машины двух американских фирм: «Cray Research Inc» — 116 машин и CDC — 40. Учитывая, что в любой области применения от момента установки ЭВМ до появления интересных результатов ее практического использования, как правило, проходит определенный срок, в статье приводятся данные об использовании супер-ЭВМ указанных двух фирм.

В Советском Союзе супер-ЭВМ появились совсем недавно и еще не накоплен достаточный опыт их практического использования. Кроме того, личный опыт автора статьи ограничивается использованием больших ЭВМ при разработке системного программного обеспечения высокопроизводительных универсальных ЭВМ. Поэтому данные, представленные в статье, получены преимущественно из литературы об использовании супер-ЭВМ за рубежом. Основу материала составил специальный тематический выпуск журнала ТИИЭР «Супер-ЭВМ: воздействие на развитие науки и техники»^{*}.

Области применения супер-ЭВМ уже сегодня достаточно разнообразны. Атомная энергетика и добыча полезных ископаемых, проектирование летательных аппаратов и расчет инженерных конструкций, фундаментальные исследования в физике, химии, биологии, медицине и других науках, метеорология и океанология, эко-

^{*} ТИИЭР. — Т. 72. — № 1. — 1984.

номическое планирование и управление производством, автоматизированное проектирование и управление технологическими процессами — вот далеко не полный перечень областей, в которых уже сейчас на супер-ЭВМ решаются задачи, требующие от нескольких минут до многих часов машинного времени. Ниже приводятся несколько примеров практического использования супер-ЭВМ. При этом основное внимание уделяется следующим аспектам: что нового дает применение супер-ЭВМ в рассматриваемых областях; каким образом ведется освоение этих машин; какие проблемы встают перед учеными и инженерами при использовании супер-ЭВМ; какие требования предъявляются к новым поколениям этих машин.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Пожалуй, одной из наиболее характерных областей применения супер-ЭВМ является вычислительная аэродинамика, задача которой состоит в расчете обтекания тел посредством численного решения уравнений жидкости и газа с целью оптимизации параметров разрабатываемой конструкции. Такой расчет позволяет существенно сокращать сроки проектирования и удешевлять разработку новых образцов.

О каком ускорении идет речь? Рассмотрим типичный цикл проектирования современного самолета. Он включает в себя большое количество лабораторных и натурных испытаний. С целью оптимизации параметров разрабатываемой конструкции создаются ее уменьшенные модели, которые продуваются в аэродинамических трубах. По результатам продувки вносятся изменения в конструкцию, и вновь организуется продувка. Этот процесс многократно повторяется. Наконец после модельных испытаний изготавливаются отдельные наиболее важные элементы конструкции (турбина, крыло) и также исследуются в аэродинамических трубах. О сложности и длительности таких экспериментов говорят следующие данные: для разработки самолета «Боинг-747» потребовалось 10 000 ч экспериментов в аэродинамических трубах, для бомбардировщика В-1 — 25 000 ч и, наконец, для аппарата «Шаттл» — 50 000 ч. Такое количество экспериментальных исследований требует ис-

пользования большого количества дорогостоящих аэродинамических труб и длительных сроков испытаний (5—10 лет). При этом метод трубных испытаний не свободен от целого ряда искажений, вызванных влияниями стенок трубы и удерживающих модель креплений, а кроме того, в трубе не удается моделировать все виды возможных реальных обтеканий.

В то же время численные расчеты позволяют в отдельных случаях уменьшить сопротивление самолета на 20—30%, увеличить дальность полета в 1,5—2 раза, уменьшить расход топлива и значительно улучшить взлетно-посадочные характеристики. Например, из оценок затрат на проектирование самолета НІМАТ фирмы «Rockwell International Co» следует, что стоимость испытаний в аэродинамической трубе десяти вариантов крыльев превысила бы в 26 раз стоимость проведенных расчетов.

Таким образом, задача численного моделирования в аэродинамике становится крайне актуальной по многим экономическим соображениям. Благоприятным фактором для проведения такого моделирования является наличие готового математического аппарата, поскольку система дифференциальных уравнений, описывающая движение вязких жидкостей и газов, сформулирована еще в прошлом веке. И тем не менее до настоящего времени эта система не может быть решена в полном объеме численными методами из-за чрезвычайной сложности расчетов турбулентности. Приходится прибегать к различным упрощающим математическим моделям, и тем не менее даже при таких допущениях расчет пространственной модели самолета в среде, учитывающей ее вязкость, требует выполнения до 10^{15} арифметических операций. На супер-ЭВМ с производительностью несколько сот миллионов арифметических операций в секунду потребовалось бы несколько тысяч часов для проведения такого расчета, что совершенно неприемлемо. Выход из этого положения специалисты видят в следующем. Во-первых, постоянно растет производительность ЭВМ. Уже начинают появляться ЭВМ миллиардной производительности, а к 1990 г. предполагается создать ЭВМ с десятиллиардной производительностью. Во-вторых, постоянно совершенствуются численные алгоритмы. Так, за 15 лет численных исследований

основные алгоритмы на одной и той же ЭВМ ускорялись в 1000 раз. Если эта тенденция сохранится, то в самое ближайшее время станет возможным проведение широкомасштабных численных экспериментов на супер-ЭВМ, что должно будет существенно уменьшить количество натуральных испытаний и экспериментов и тем самым сократить сроки и стоимость разработки новых образцов аэрокосмической техники.

Испытания с помощью расчетов на ЭВМ, видимо, будут единственным средством проверки воздействия на проектируемый аппарат тех сред, в которых нельзя провести натурные испытания (например, атмосфера другой планеты).

Что же нового привнесло появление супер-ЭВМ в численную аэродинамику? Появилась возможность ввести в практику проектирования расчеты обтекания элементов конструкции потоками вязких газов (считается, что для практического использования численных методов в проектировании время расчета одного варианта не должно превышать 15 мин). Появилась возможность выполнять полные расчеты обтекания трехмерной модели самолета в среде без учета вязкости. В настоящий момент стали возможны такие стационарные трехмерные расчеты в среде с учетом вязкости, для проведения которых требуется от 1 до 20 ч счета на супер-ЭВМ типа Cray-1 или Сувер-205.

Специалисты считают, что важнейшую роль в успехе применения численных методов в аэродинамике играет создание универсальной модели турбулентности. В настоящий момент для учета свойств вязкости используются полуэмпирические модели. С появлением супер-ЭВМ появилась возможность численного моделирования простейших турбулентных течений. Подобные расчеты дают такую информацию о физике турбулентности, которую невозможно получить с помощью экспериментов.

С ростом производительности ЭВМ усложняются уравнения движения, поддающиеся решению, и возрастает роль численного расчета в проектировании, дополняющего и заменяющего эксперименты в аэродинамических трубах.

ЗАДАЧИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Одной из важнейших задач атомной энергетики является задача моделирования возможных аварий на атомных электростанциях (АЭС) в процессе их эксплуатации и проведения научных исследований и экспериментов. Известно, что с 1971 по 1984 г. в четырнадцати странах произошла 151 авария на АЭС, а число различных «инцидентов», т. е. отклонений от штатных режимов эксплуатации на АЭС, по данным американской организации «Паблик ситизен», достигает 4500 в год. Учитывая, что крупные аварии на АЭС серьезно влияют на окружающую среду, здоровье и жизнь людей, а также требуют колоссальных материальных затрат на ликвидацию их последствий (что показала, например, авария на Чернобыльской АЭС, произошедшая в нашей стране 28 апреля 1986 г.) крайне важно уметь заранее предсказывать возможные отклонения реакторов от предусмотренных режимов работы. Вот как описывается один из первых опытов проведения подобных расчетов. «С 1974 г. в Лос-Аламосской национальной лаборатории США началась разработка численных моделей возможных аварий в ядерных реакторах. Одна из разработанных в лаборатории программ, получившая название TRAC, предназначена для анализа аварий в реакторах на легкой (обычной) воде. После аварии на «Три-Майл-Айленд» в 1979 г. эта программа была использована для исследования начального этапа (первых трех часов) аварии с целью определения причин чрезмерного перегрева и оценки степени повреждения активной зоны реактора. И хотя программа TRAC разрабатывалась для моделирования аварий, ограниченных во времени несколькими минутами, поставленная задача была успешно решена.

При моделировании быстрых переходных процессов, происходящих в реакторе, его подразделяют на несколько сотен расчетных ячеек. При такой дискретизации задачи критерии устойчивости и точности использованных в программе численных методов ограничивают временной шаг несколькими миллисекундами. Поскольку ставилась задача моделирования работы реактора на «Три-Майл-Айленд» в течение нескольких часов, миллисекундный временной шаг оказался неприемле-

мым. Подходящий временной шаг ограничивал дискретизацию примерно сотней ячеек (т. е. схема была несколько загрублена) и тем не менее на моделирование было затрачено 20 часов работы ЭВМ CDC-7600¹.

Прежде всего потребовалось определить начальные и граничные условия, а также последовательность принятых оператором и стационарным устройством управления действий, повлиявших на моделируемые параметры. Поскольку данные о воздействии устройства управления были неполными, пришлось сделать некоторые разумные предположения. Кроме того, было неясно, позволит ли уровень дискретизации, обусловленный ограничением временного шага, получить приемлемые результаты.

Тем не менее данные моделирования, характеризующие давление, температуру и уровень воды, полностью соответствовали результатам измерений этих величин во время аварии на «Три-Майл-Айленд». Такое совпадение результатов позволило надеяться на правдоподобность и других вычисленных значений.

При исследовании аварии особенно важно было оценить количество водорода, выделенного при окислении оболочек тепловыделяющих элементов — ТВЭЛов. Одним из основных результатов, полученных при моделировании с помощью программы TRAC, были максимальные значения температуры оболочек ТВЭЛов, т. е. информация, недоступная для непосредственного измерения. Эти и последующие вычисления позволили оценить степень окисления, а следовательно, и количество выделенного водорода.

Учитывая важность подобного моделирования для безопасного функционирования ядерных реакторов, желательно, чтобы соответствующие вычислительные средства были доступны операторам реакторов. Тогда при возникновении аварийной ситуации представляется возможность найти выход из нее. На практике время соответствующих вычислений не должно превышать нескольких минут, но для этого необходима ЭВМ с производи-

¹ Производительность CDC-7600 может достигать 20 млн. арифметических операций в секунду. Ее производительность в 1,5—2 раза ниже скалярной и в 3—5 раз — векторной производительности супер-ЭВМ Cray-1.

тельностью по крайней мере в 100 раз выше, чем у первого поколения супер-ЭВМ, т. е. порядка 10 млрд. операций в секунду».

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одной из основных причин, сдерживающих широкое использование супер-ЭВМ, является их высокая стоимость. Риск не получить отдачи от более чем десяти-миллионных затрат, останавливает многие организации от приобретения для своих нужд супер-ЭВМ. Выход из подобных затруднений возможен. Для этого необходимо создание сетей на базе супер-ЭВМ, в рамках которых объединились бы усилия и возможности многих исследователей, работающих в различных организациях, научных центрах, лабораториях и университетах. Примером такого подхода может служить сеть, созданная на базе Национального вычислительного центра (НВЦ) исследований термоядерного синтеза в Лоуренсовской национальной лаборатории (Ливермор, США).

В условиях угрозы истощения запасов природного топлива задача поиска новых видов энергии, и в первую очередь связанной с явлением термоядерного синтеза, является крупнейшей проблемой для ученых всего мира. Роль численного моделирования при изучении поведения плазмы при ее взаимодействии с магнитными полями, т. е. в теории термоядерного синтеза с магнитным удержанием, была осознана задолго до появления супер-ЭВМ, однако благодаря огромным вычислительным мощностям этих машин в НВЦ удалось объединить усилия многих исследователей, сделать их более эффективными. Сеть, созданная в 1976 г., к началу 1984 г. обслуживала 2000 исследователей из 23 исследовательских организаций, расположенных по всей территории США. При этом пользователям сети обеспечивался доступ ко всем имеющимся в НВЦ программам, данным, общей информации.

Ядром рассматриваемой сети являются две супер-ЭВМ Cray-1, а также большая ЭВМ CDC-7600¹. Эти три ЭВМ обеспечивают основную потребность пользователей в вычислительных мощностях.

¹ По данным на начало 1984 г.

Все пользователи сети могут работать на супер-ЭВМ со своих терминалов в интерактивном режиме, т. е. непосредственно взаимодействуя с машиной, хотя и предусмотрен режим пакетной обработки заданий, который, как правило, используется в ночное время. Связь с НВЦ осуществляется по каналам, использующим для передачи информации на удаленные расстояния специальные спутники связи. Несмотря на сложный режим эксплуатации, работа сети характеризуется очень высокими показателями: 90—95% времени работы центральных процессоров супер-ЭВМ расходуется на пользовательские задачи (т. е. потери на системные нужды крайне незначительны); 90% пользовательских задач обчисляется менее чем за 1 с, в общей сложности на них расходуется менее 2% процессорного времени. Таким образом, основные задачи (с большим временем счета) получают почти все время работы центральных процессоров супер-ЭВМ — основного ресурса, необходимого для проведения сложных исследовательских расчетов. В сети предусмотрены средства помощи пользователям, включающие в себя снабжение документацией, необходимыми программами, обмен сообщениями и новостями, возможность работы с графическими устройствами и многое другое.

Численное моделирование, выполняемое на НВЦ, ведется по всем основным направлениям термоядерных исследований. Для этих целей привлекаются различные модели поведения плазмы, причем благодаря большим вычислительным мощностям супер-ЭВМ расчетными методами удается получать результаты, близкие к экспериментальным. Последнее обусловлено еще и тем, что с переходом на супер-ЭВМ появилась возможность использования трехмерных моделей поведения плазмы. Возможности численного моделирования служат необходимым дополнением к экспериментальным исследованиям, позволяя объяснить ранее непонятные результаты экспериментов и тем самым ускоряя процесс познания изучаемых физических явлений. Это, пожалуй, наиболее важная сторона численного моделирования. Другим практически важным достижением следует считать широкое привлечение супер-ЭВМ для расчетов параметров экспериментальных установок, близких к реакторам.

Естественно, что по мере освоения численного моделирования в термоядерных исследованиях перед учеными встают новые задачи. Уже сейчас ясно, что для привлечения трехмерных моделей к расчетам сложных процессов, близких к реальным, требуются ЭВМ следующего поколения, имеющие по крайней мере на порядок большую производительность и больший объем памяти.

Роль сетей на базе супер-ЭВМ трудно переоценить. Опыт НВЦ показывает высокую эффективность и экономичность такого использования супер-ЭВМ.

ЗАДАЧИ МЕТЕОРОЛОГИИ

Своевременность и точность прогнозов погоды считаются главной целью метеорологии. Еще 10 лет назад возможность прогноза на 10-дневный срок была весьма проблематичной, а сегодня они регулярно выпускаются в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды. Подобно своим предшественникам нынешние поколения супер-ЭВМ продолжают играть фундаментальную роль в прогнозировании. Увеличение быстродействия и объема памяти супер-ЭВМ сказалось на масштабе и качестве исследований. Однако на нынешнем этапе рост доступности ресурсов зависит и от характера вычислений, и от способности пользователя адаптировать эти вычисления к новой архитектуре. На пользователя теперь возлагается больше ответственности за загрузку ЭВМ. Эффективное использование современного поколения супер-ЭВМ требует больших усилий со стороны коллектива специалистов, сведущих как в численных алгоритмах и архитектуре машины, так и в прикладных науках.

Точный прогноз погоды требует построения математических моделей, в которых приходится решать трудоемкие задачи газовой динамики и учитывать при этом большое количество физических процессов, происходящих в самой атмосфере, на поверхности Мирового океана, на поверхности Земли. К настоящему времени во многих странах созданы модели общей циркуляции атмосферы, различающиеся используемыми численными методами и параметрами, описывающими состояние моделируемых процессов. Возможности, предоставляемые современными супер-ЭВМ, позволяют создавать модели,

используемые не только для краткосрочных, среднесрочных, долгосрочных прогнозов, но и объединяющие в себе все эти возможности, а также возможности проведения климатических исследований. На выбор используемых численных методов существенное влияние оказывает архитектура супер-ЭВМ.

Характерная для нынешнего поколения супер-ЭВМ специализация под задачи векторной обработки вызывает переход к так называемым спектральным моделям атмосферы, в которых широко используются алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ). Эти модели при прочих равных условиях обладают большей точностью по сравнению с другими, но если использование их на предыдущих поколениях ЭВМ сдерживалось значительными временными затратами на работу алгоритма БПФ, то в векторных вариантах этих программ время работы векторных алгоритмов БПФ составляет не более 2% времени работы модели.

Для адаптации прогностических моделей к векторно-конвейерным архитектурам супер-ЭВМ приходится использовать специальные встроенные функции, а также перепрограммировать в виде, удобном для векторизации, наиболее трудоемкие участки программ. Эффект от такой работы оказывается значительным. Так, при разработке программы, выполненной американскими специалистами непосредственно для ЭВМ Cray-1, последующая оптимизация привела к двукратному ускорению ее работы, а при переносе программы, разработанной советскими учеными, со скалярной ЭВМ БЭСМ-6 на Cray-1 адаптация программы дала более чем пятикратное ее ускорение по сравнению с первоначальным вариантом.

Значение оптимизации программы прогноза особенно важно для краткосрочного прогнозирования, для которого существенно своевременность результата. Чем раньше получен прогноз, тем он более полезен. Специалисты считают, что прогноз на сутки или двое должен быть составлен через 6—12 ч после получения данных наблюдений. В этот интервал включается не только время, необходимое для численного расчета, но также время передачи данных наблюдений в центр прогноза, время их превращения в форму начальных условий для модели и время передачи прогноза потребителю.

При использовании оптимизированной спектральной модели на Cray-1 с достаточно детальным разрешением по пространству требуется 15—20 мин процессорного времени для расчета на одни модельные сутки, что позволяет использовать эту модель для ежедневного десятисуточного прогноза. Использование этой модели для среднесрочного 100-суточного прогноза с более грубым разрешением по пространству требует 30 мин процессорного времени. С помощью этой версии модели практически возможными оказываются эксперименты по моделированию климата, а также анализ чувствительности модельных результатов к деталям численных и физических аспектов.

Важное значение имеет изучение влияния хозяйственной деятельности человека на климат. Строительство крупных водохранилищ, каналов, гидроэлектростанций, сжигание большого количества топлива, вырубка лесов все более и более влияют на окружающую среду.

На современных супер-ЭВМ возможно проведение экспериментов по оценке влияния какого-либо отдельного фактора на климат, например, изменение процентного состава углекислого газа в воздухе. Однако для комплексной программы исследований подобного рода потребуются новые поколения супер-ЭВМ.

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Качественно новый уровень использования супер-ЭВМ в тех областях, где точные математические расчеты не могут быть применены, возможен на базе так называемых экспертных систем. Экспертными системами называются программы, которые в той или иной области знаний заменяют по узкому кругу профессиональных вопросов высококвалифицированного специалиста — эксперта.

В настоящий момент в мире уже созданы десятки экспертных систем. Что же дает супер-ЭВМ таким системам? Экспертная система — это комплекс программ и данных, основу которого составляет база знаний, являющаяся набором правил и фактов, описывающих знания эксперта. База знаний включает в себя также входные данные, т. е. данные о той задаче, которую необхо-

дно решить, и выходные данные, которые являются результатом работы системы. Важнейшим элементом экспертной системы являются механизмы логического вывода, используемые для получения результатов по входной информации. Большие экспертные системы, которые достигают нескольких тысяч правил, требуют для своей работы огромных вычислительных ресурсов. В японском проекте ЭВМ пятого поколения, который вызвал огромный резонанс во всем мире и привел к разработке самостоятельных программ развития высокопроизводительных ЭВМ практически во всех индустриальных странах, предусматривается создание к 1990 году супер-ЭВМ с производительностью от 100 млн. до 1 млрд. логических выводов в секунду (следует заметить, что на один логический вывод приходится от 100 до 1000 обычных машинных операций). Использование супер-ЭВМ с такой производительностью позволит существенно повысить интеллектуальные возможности современных ЭВМ, сделает их применение еще более комфортабельным и полезным.

ПРОИЗВОДСТВО КИНОФИЛЬМОВ

Несколько неожиданным может показаться использование супер-ЭВМ для производства кинофильмов. Тем не менее американская фирма «Digital Productions» использует для производства высококачественных цветных фильмов двухпроцессорную супер-ЭВМ Сгау-ХМР. Эта информация может и не вызвать никаких эмоций, так как практически на любой современной персональной ЭВМ при наличии соответствующей графической техники можно сделать мультипликационный фильм. Примером этого являются многочисленные видео-игры, которыми оснащаются персональные ЭВМ. Но для изготовления высококачественной мультипликации, не уступающей по качеству фильмам, создаваемым по технологии Диснея промышленными кинофирмами, требуются действительно огромные вычислительные мощности. Дело в том, что ЭВМ в этом случае берет на себя значительную часть работы, необходимой для построения целой сцены (эпизода) фильма. В задачи ЭВМ входит разбивка эпизода на кадры, определение в них положения каждого объекта,

участвующего в эпизоде, и, наконец, полное «раскрашивание» кадров в соответствии с замыслом художника и режиссера. Конечно, в процессе производства такого «машинного» фильма роль художников, режиссеров, инженеров и других людей, ответственных за творческое содержание картины и правила поведения участвующих в ней персонажей, достаточно существенна. Ведь все образы, объекты, предметы, занятые в сцене, создаются воображением художника. Затем они тщательно зарисовываются и заносятся в память ЭВМ в виде множества многоугольников, образующих поверхность каждого участвующего в сцене объекта. Далее художники и режиссеры на специальной аппаратуре «отрабатывают движения» персонажей, т. е. задают последовательность положений объекта в сцене. Эта информация о каждом объекте записывается в память супер-ЭВМ, и уже опираясь на нее, а кроме того, используя информацию о цвете, оптических свойствах материалов, освещении и т. д., которые также задаются художниками, режиссерами и инженерами, супер-ЭВМ выполняет работу по разбивке эпизода на кадры и их «раскрашивание». При формировании кадров сцены супер-ЭВМ самостоятельно может выполнить часть работы, связанной с перемещением объектов. Для этого в ЭВМ закладывается ряд физических законов, таких, как гравитация, отражение и поглощение света различными материалами и поверхностями и т. д. Так, например, если требуется изобразить скатывающийся с горы мяч, супер-ЭВМ может очень точно рассчитать его местоположение в каждом кадре эпизода, зная коэффициент трения мяча о поверхность, форму поверхности и закон гравитации.

Более детальное описание технологии и ее возможностей заняло бы слишком много места. Однако чтобы продемонстрировать масштабы выполняемой супер-ЭВМ работы, можно привести следующие данные. Каждый кадр, представленный на цветном растровом дисплее размером 1280×1024 точек, требует для задания цвета в точке 24 бита (по 8 бит для каждого из трех основных цветов — красного, зеленого и синего). Значит, для одного кадра требуется 4 Мбайт памяти.

Для записи такого же кадра на цветную пленку¹

¹ Разрешение цветной пленки составляет 3000×4000 точек — 3 цвета \times на 10 бит для каждого цвета.

требуемый объем памяти возрастает на порядок и достигает 45 Мбайт. В зависимости от сложности кадра на его «рисование» (для записи на пленку) потребуется от нескольких секунд до нескольких часов времени работы супер-ЭВМ. Правда, такое время требуется тогда, когда уже принято окончательное решение о сделанном эпизоде и его нужно готовить к записи на пленку. Для работы по доводке эпизода используется просмотр фрагментов фильма на экранах дисплеев с меньшей разрешающей способностью, например, как в телевидении (512×640). И вот в этом случае супер-ЭВМ справляется с работой по формированию кадров за реальное время, требуемое для их нормального просмотра с частотой 24 кадра в секунду. Ясно, что с такой работой может справиться только очень высокопроизводительная ЭВМ, способная выполнять несколько сот миллионов операций в секунду. Но одной скорости работы машины уже оказывается недостаточно. Для того чтобы весь объем формируемой информации можно было сохранить, нужны высокоскоростные средства передачи информации (каналы ввода-вывода) из памяти ЭВМ, в которой формируется кадр, на дисплей или во вторичную (внешнюю) память. Поэтому наличие высокоскоростных каналов передачи информации является неотъемлемой частью супер-ЭВМ, особенно для задач, требующих обработки информации в реальном масштабе времени. Не менее важно оснащение супер-ЭВМ большой внешней памятью на магнитных дисках. Например, чтобы подготовить к записи на пленку десятисекундный фрагмент фильма, требуется сформировать 2500 Мбайт информации. Для ее хранения в супер-ЭВМ, как правило, используются магнитные диски емкостью в 600—1200 Мбайт с высокой плотностью записи.

Описанная технология производства фильмов с помощью супер-ЭВМ позволяет ускорить их производство. На двухпроцессорный ЭВМ Cray-XMP можно произвести 144 млн фильма в год, что в 4 раза производительнее, чем по технологии Диснея. Кинопродукция супер-ЭВМ может использоваться не только для развлечения, но и в качестве совершенствования интерфейса между ЭВМ и пользователями во многих областях применения этих машин. Энтузиасты этого направления использования супер-ЭВМ считают, что «образы, созданные мето-

дами машинной графики, станут когда-нибудь средством, способным лучше всяких слов передать суть идей и событий».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные примеры, безусловно, не ограничивают то множество областей, в которых уже сегодня применяются супер-ЭВМ. Тем не менее на этих примерах можно усмотреть ряд закономерностей, характерных для первого этапа освоения машины сверхвысокой производительности.

Во-первых, супер-ЭВМ обеспечивают качественный скачок в практическом использовании методов машинного моделирования. Переход от двумерного к трехмерному моделированию позволяет избавиться от ограничений и неточностей, связанных с использованием двумерного приближения для реальных трехмерных изделий и процессов.

Во-вторых, использование супер-ЭВМ стимулирует совершенствование численных методов, применяемых для машинного моделирования. Оптимизация и адаптация алгоритмов вносят значительный вклад в эффективность использования нынешних поколений супер-ЭВМ.

В-третьих, супер-ЭВМ позволяют расширить диапазон применения и усложнить задачи, требующие решения в реальном масштабе времени.

Наконец, роль супер-ЭВМ возрастает при использовании ее в сетях, что позволяет интегрировать усилия многих специалистов, ведущих исследования в конкретной области науки или техники. Кроме того, отдача от супер-ЭВМ может возрасти, если ее использование сочетается с другими достижениями в области микроэлектроники, в частности, с графическими, речевыми и прочими более интеллектуальными средствами взаимодействия пользователя с ЭВМ.

Несмотря на некоторые трудности, обусловленные особенностями программирования на векторно-конвейерных супер-ЭВМ, перед дальнейшим использованием супер-ЭВМ во многих областях науки и техники, экономики и управления открываются широкие перспективы. Но для этого уже сегодня необходимо создать новые поколения еще более мощных супер-ЭВМ.

Автоматизация проектирования

Г. Л. Лакшин

Суперкомпьютер превосходит самого себя, проектируя своего преемника.

Название статьи Э. Вакка и Н. Линкольна (см.: Электроника. — 1981. — Т. 54. — № 13, 1981).



Интуитивно-прагматический подход к любой автоматизации и, в частности, к автоматизации проектирования связан с оценкой стоимости затрат на такую автоматизацию и соотношением этих затрат с ожидаемым экономическим эффектом от использования автоматизации. Этот подход практически неприменим к автоматизации проектирования

супер-ЭВМ, поскольку без развитой системы автоматизированного проектирования (САПР) спроектировать и изготовить супер-ЭВМ невозможно. Уровень развития САПР в такой же степени характеризует реализуемость проекта супер-ЭВМ, как уровень развития технологии.

Автоматизация проектирования вычислительной техники бурно развивается. Уже разработано и продолжает разрабатываться множество систем и пакетов прикладных программ, позволяющих решать отдельные задачи автоматизации проектирования или обеспечивающих сквозное проектирование, например, больших интегральных схем (БИС). Эти программы различаются по стоимости, качеству решения соответствующих задач универсальности и широте предлагаемых возможностей.

В отличие от таких коммерческих систем САПР супер-ЭВМ всегда уникальны. Во всяком случае, пока нет

информации об использовании готовой САПР для проектирования супер-ЭВМ. Конечно, речь не идет о разработке с нуля каждый раз новой системы для каждой новой супер-ЭВМ, да это и невозможно, поскольку срок ее разработки оказался бы не меньше срока проектирования самой машины. Более того, сами задачи автоматизации проектирования, в общем, традиционны и отдельные этапы проектирования могут быть реализованы подсистемами, успешно применяемыми и в других разработках. Но, как правило, это подсистемы собственной разработки (хотя известны исключения), которые имеют удобный интерфейс для обмена информацией и хорошо «общаются» друг с другом. На сегодняшний день все супер-ЭВМ проектируются на собственных системах автоматизированного проектирования, разработанных или доработанных непосредственно для реализации конкретного проекта. Это большие комплексные САПР, поддерживающие все этапы проектирования и использующие мощные инструментальные средства, включая супер-ЭВМ предыдущих поколений.

К важной особенности САПР супер-ЭВМ относится сочетание широких возможностей, предоставляемых входящими в САПР подсистемами с жестко регламентированной дисциплиной проектирования. Такая дисциплина, с одной стороны, несколько ограничивает возможности разработчиков, а с другой — позволяет четко отслеживать текущее состояние проекта, гарантирует выполнение всех предусмотренных требований и не допускает появления ошибок, естественно возникающих из-за большого объема и высокой сложности проектируемой аппаратуры.

Уникальность САПР супер-ЭВМ не позволяет однозначно определить их состав, структуру, возможности и принципы организации. Более того, ряд фирм, разрабатывающих супер-ЭВМ, не публикует материалов по своим системам автоматизации проектирования, считая их, по-видимому, технологическим секретом фирмы.

Тем не менее можно попытаться проанализировать общие черты САПР супер-ЭВМ, поскольку все они решают объективно существующие проблемы, возникающие в процессе проектирования.

Процесс проектирования супер-ЭВМ занимает несколько лет и условно проходит следующие стадии: разработка архитектуры и структуры машины;

выбор конструкции и элементной базы;
разработка логических схем;
конструкторско-техническое проектирование;
изготовление и наладка опытного образца;
серийный выпуск.

Первый этап, по-видимому, не следует включать в цикл проектирования. Дело в том, что он связан со всем предшествующим опытом разработчиков машины и, оценивая сроки его выполнения, можно сказать: на него уходит «полгода и вся жизнь». Этот этап во многом определяет успех всей дальнейшей разработки, но практически не поддается автоматизации. При выборе архитектуры, естественно, учитывается опыт предыдущих разработок, класс нерешенных на сегодняшний день задач (которые в первую очередь должна решать создаваемая машина), необходимость преемственности разработанного ранее программного обеспечения, уровень технологии и т. д. При этом почти все параметры будущей разработки непрерывно меняются. В течение срока разработки появляются новые машины, меняется класс нерешенных задач, возникают новые задачи, анализируются новые архитектурные решения, не говоря уже об изменениях в элементной базе и технологии. Эти обстоятельства вносят некоторую долю риска на ранних этапах разработки, потому что уже в ее начале необходимо правильно оценить, например, возможности технологии и элементной базы, которые появятся к моменту реализации проекта. Неправильный прогноз может привести, с одной стороны, к нереализуемости проекта в планируемые сроки, а с другой, связанной с неполным использованием возможностей технологии и элементной базы к моменту реализации проекта — к потере производительности супер-ЭВМ.

Возвращаясь к проблемам автоматизации проектирования, следует отметить, что на этапе выбора архитектурных и структурных решений автоматизация проектирования может сводиться лишь к созданию моделей будущих систем с целью проверки их сбалансированности и оценки будущей производительности. Проблемы создания таких моделирующих комплексов связаны с достаточно высокой сложностью их разработки и практическим отсутствием времени на их реализацию, поскольку откладывание начала разработки до полной проверки принятых решений на модели неизбежно приво-

дит к моральному старению проекта. Поэтому создание таких моделей для супер-ЭВМ — достаточно редкое явление.

В тех случаях, когда подобные модели создаются, их исследование ведется параллельно разработке машины и призвано корректировать принятые решения в процессе реализации проекта.

Выбор конструкций будущей ЭВМ лишь условно может быть выделен в самостоятельный этап, поскольку вне конкретной конструкции невозможно говорить о структуре и архитектуре машины. Это в полной мере относится и к выбору элементной базы. Сегодня практически для всех супер-ЭВМ в качестве элементной базы используются большие интегральные схемы. Наряду с проблемой выбора элементной базы, серьезной проблемой является и ее проектирование. Важной особенностью БИС является их неремонтопригодность, и поэтому любая ошибка, допущенная на этапе проектирования БИС, не может быть устранена на этапе наладки машины с помощью проводного монтажа и дополнительных элементов. Таким образом, ошибка в БИС требует перепроектирования и изготовления новой партии БИС данного типа, что существенно задержит сроки наладки и завершения проекта. Поэтому проектирование БИС занимает особое место в процессе проектирования и требует особого внимания.

В настоящее время степень интеграции больших интегральных схем, выпускаемых в мире, колеблется от нескольких сотен до сотен тысяч выводов на кристалл. Условно их можно разбить на матричные и заказные. Матричные БИС выполняются на основе так называемых базовых матричных кристаллов (БМК), обладают регулярной структурой, хорошо поддаются автоматизации проектирования, но имеют существенно меньшую интеграцию, чем заказные схемы. Заказные БИС, собственно, являются уже сверхбольшими интегральными схемами (СБИС). Они имеют существенно большую интеграцию, являются законченными функциональными образованиями, более полно используют площадь кристалла, как правило, долго разрабатываются и выпускаются большими партиями. В настоящее время на СБИС реализуются микропроцессорные наборы, память, различные адаптеры и даже процессоры мини-ЭВМ.

При проектировании супер-ЭВМ используются в основном матричные БИС.

Когда определены архитектура, структура, конструкция и элементная база будущей ЭВМ, начинается этап логического проектирования, т. е. проектирования схем отдельных функциональных устройств на выбранных логических элементах в рамках определенной конструкции. Этот этап хорошо распараллеливается между группами разработчиков устройств.

Перед системами автоматизированного проектирования на этом этапе ставятся задачи предоставления средств для удобного описания логических схем (языка описания аппаратуры) и обеспечения возможности проверки на математической модели правильности принятых решений — логической верификации. Языки описания аппаратуры отличаются большим разнообразием как по форме, так и по уровню описания схем. В зависимости от используемых вычислительных средств и традиций, сложившихся в коллективах разработчиков, а также от уровня интеграции элементной базы проекта используются различные формы представления исходных данных проектируемых схем. В последнее время довольно широко стали использоваться графические языки описания аппаратуры, обеспечивающие высокую наглядность описания. Вместе с тем продолжают применять и языки формульного типа, основными достоинствами которых являются компактность описания и возможность оперативного внесения изменений средствами редактирования текстов. Общей чертой современных языков описания аппаратуры является ориентация на иерархическое описание проекта.

Чем сложнее разрабатывается аппаратура, тем естественнее представляется желание описывать принципы построения и функционирования схем вместо их структурной реализации, поручая последнюю программам автоматизации проектирования. Эта проблема получила название автоматического синтеза схем. Ее решение позволило бы существенно сократить сроки проектирования и повысить качество реализации проекта в том смысле, что программа синтеза генерирует правильные, работоспособные схемы. Однако для предельных машин программы автоматического синтеза используются пока редко, как раз из-за необходимости проектировать предельные схемы. Причем в одних случаях крити-

ческим параметром может оказаться быстродействие, в других — объем проектируемых схем, в третьих — и то и другое. По-видимому, этим и объясняется сравнительно редкое использование автоматического синтеза при проектировании супер-ЭВМ.

Центральной проблемой этапа логического проектирования является моделирование. Возможности системы моделирования во многом определяют качество проектирования будущей ЭВМ. Поскольку макетирование супер-ЭВМ практически неосуществимо, моделирование является единственным инструментом проверки принятых решений на ранних стадиях разработки. При этом система моделирования должна позволить осуществлять как моделирование отдельных БИС, так и моделирование сложных функциональных устройств, вплоть до процессора. В связи с этим к системе моделирования предъявляются высокие требования по эффективности выполнения моделирующих программ для схем большого объема. Чтобы обеспечить высокую скорость моделирования в качестве инструментальных ЭВМ, на которых реализуются моделирующие программы, используются самые мощные из существующих ЭВМ. Например, для моделирования супер-ЭВМ CYBER-205 фирмы CDC использовалась ЭВМ CYBER-203, для SX1, SX2 фирмы NEC — ACOS-900 и т.д.

Наиболее полная проверка проектируемых схем осуществляется при моделировании на уровне проектирования, т.е. элементами модели являются те базовые элементы, на которых ведется проектирование схем, а поскольку в основе современных супер-ЭВМ лежат большие интегральные схемы, описываемые на сравнительно низком уровне, весь процессор оказывается представленным в этой модели почти на вентиляльном уровне. При этом объем моделируемых схем достигает сотен тысяч элементов и добиться высокой скорости моделирования оказывается практически невозможно. Для решения этой проблемы необходимо повысить качественные показатели всего процесса моделирования. Идея состоит в том, чтобы в модели некоторые группы элементов заменить более крупными элементами, дополнительно описав их функционирование. Таким образом, в системе логического проектирования появляются два языка описания аппаратуры: структурный, предназначенный для описания собственно схем, и функциональный — для

описания функционирования схем. И, естественно, система моделирования должна позволять моделировать схемы, фрагменты которых могут быть представлены различными описаниями. Любопытно, что необходимость описания схем на различных уровнях детализации, вытекающая из соображений организации эффективного моделирования, имеет еще одно обоснование. Специалисты фирмы IBM утверждают, что описание и моделирование проекта лишь на одном уровне не позволяет осуществить достаточно полную логическую верификацию проекта, реализованного на БИС, и для качественного проектирования необходимо иметь несколько описаний разных уровней (по-видимому, двух достаточно).

На сегодняшний день функциональное и структурное описание проекта находят применение в основном в функциональном описании БИС и замене схем БИС в моделях более сложных устройств их функциональными описаниями. Это позволяет, как правило, почти на порядок поднять скорость моделирования больших устройств там, где эта скорость наиболее критична.

К другой возможности, появляющейся с возникновением функционального языка, относится создание на нем независимых от конструктивной иерархии проекта (и в какой-то степени от конкретной схемной реализации) описаний отдельных функциональных узлов. При этом появляются два самостоятельных описания проекта, которые можно сравнивать, независимо или совместно моделируя и добиваясь одинаковых результатов. Такой подход, несомненно, очень привлекателен, потому что позволяет реально приблизиться к стратегии нисходящего проектирования, но требует значительных временных затрат, и поэтому в полной мере применить его при проектировании супер-ЭВМ чрезвычайно сложно. Вместе с тем смещенное моделирование функциональных и структурных описаний узлов и устройств ЭВМ широко применяется практически во всех разработках больших вычислительных машин.

К другому эффективному средству повышения скорости моделирования относится применение специпроцессоров моделирования, позволяющих почти в 1000 раз повысить скорость этого процесса. В частности, такие специпроцессоры были разработаны фирмами IBM, NEC и др.

Однако на сегодняшний день как раз для проектиро-

вания супер-ЭВМ такие спецпроцессоры пока не использовались. По-видимому, это связано с большими сложностями в подготовке для них информации, в частности, тестов со сложностью анализа результатов и относительной неоперативностью внесения изменений в проектируемые схемы. С другой стороны, в настоящее время большие вычислительные машины способны осуществлять моделирование практически в режиме реального времени разработчика. Они позволяют легко редактировать тесты, удобно представлять результаты моделирования и быстро вносить изменения в проектируемые схемы. Тем не менее можно ожидать, что в скором времени спецпроцессоры моделирования будут использоваться при проектировании супер-ЭВМ, как они уже используются при проектировании сверхбольших интегральных схем.

Конструкторско-техническое проектирование служит ядром систем автоматизации проектирования супер-ЭВМ. Можно с уверенностью сказать, что без достижения определенного уровня систем конструкторско-технического проектирования супер-ЭВМ были бы просто нереализуемы. К задаче этого этапа относится конкретная реализация разработанных логических схем на определенных конструктивах. Выходная информация сосредоточена в носителях управляющей информации (как правило, перфоленты или магнитные ленты) для станков с ЧПУ и необходимая «бумажная» документация для производства и эксплуатации. Этап конструкторско-технического проектирования проходят все используемые в проекте конструктивы — от БИС до шкафов (или стоек). Для супер-ЭВМ автоматизация проектирования для всех конструктивов должна быть близка к 100%, только в этом случае можно говорить о сравнительно коротких сроках проектирования. Естественно, это накладывает определенные ограничения на выбор конструкции будущей машины, и возможность автоматизированного проектирования играет не последнюю роль при определении конструкции супер-ЭВМ.

Этап конструкторского проектирования для каждого конструктива предполагает решение задач компоновки, размещения и трассировки. Все эти задачи для своего оптимального решения требуют значительно большего объема вычислений, чем могут предоставить сегодняшние, а также и будущие супер-ЭВМ. Однако за послед-

ные 20 лет разработаны и продолжают разрабатываться методы, позволяющие находить удовлетворительные решения этих задач. В то же время сами задачи постоянно изменяются, появляются новые требования к их решению, возникают новые ограничения. Так при трассировке печатных плат долгое время ограничивались нахождением решения, минимизирующего количество неоттрассированных соединений, поскольку проводной монтаж отрицательно сказывался на технологичности и надежности готового изделия. Поэтому критерием качества решения задачи размещения была возможность 100%-ной трассировки. С повышением скорости срабатывания элементов, вклад задержек в линиях связи в общую задержку распространения сигналов (склады-вающуюся из задержек в элементах и задержек в линиях связи) существенно повысился. Это сразу привело к появлению новых требований, предъявляемых к задачам конструкторского проектирования.

О задаче анализа временных соотношений следует сказать особо. Сложность этой задачи для схем большого объема известна давно. Пока элементы были сравнительно медленными (десятки и единицы наносекунд) и все определялось задержками только в них (задержками в линиях связи можно было пренебречь), для синхронных схем задача сводилась только к определению количества уровней логики между триггерными станциями. Но даже эта задача была предельно сложной, что привело к практически полному отказу от использования асинхронных схем в больших машинах. Параллельно с повышением скорости срабатывания элементов росла и степень интеграции, росли возможности технологии — уменьшились ширина печатных проводников, диаметры сквозных и переходных отверстий, шаг выводов микросхем и т. д. Однако рос и объем проектируемых машин. Задача анализа временных соотношений в схемах проектируемых устройств становилась все более актуальной и получила название временной верификации. Если логическая верификация — это проверка правильности логического проектирования, то временная — проверка выполнения временных ограничений.

Первые попытки проведения временной верификации — это «перемоделирование» схем после проведения этапа конструкторского проектирования с учетом его результатов (конкретной трассировки межсоедине-

ний). Адекватность моделирования при этом существенно повышается. Но проблема нахождения тестов, которые выявляют нарушения временных ограничений, остается открытой.

В настоящее время чаще используют методы временной верификации, основанные на переборе путей графа, представляющего схему устройства. Эта методика требует значительных объемов вычислительных работ, но позволяет выявить и проанализировать все критические пути распространения сигналов в схемах. Процедура временной верификации используется до этапа конструкторско-технического проектирования для получения грубых оценок. Применяется она и непосредственно во время проектирования для получения приемлемых результатов и сразу после выполнения проектирования для контроля полученных решений.

На примере использования БИС можно показать, какие требования предъявляются к системам автоматизированного проектирования по оперативности выполнения этапа конструкторско-технического проектирования. В современных больших вычислительных системах в зависимости от степени интеграции БИС с учетом коэффициента применяемости используется от нескольких десятков до нескольких сотен различных типов БИС. После завершения логической верификации проекта требуется осуществить конструкторское проектирование, например, 100 типов БИС. Предполагается, что к этому моменту имеются их верифицированные с точки зрения логики работы логические схемы, осуществлен контроль правил проектирования в части нагрузочных способностей элементов, выделяемой мощности и т. д. А также проведены грубые оценки задержек распространения в них сигналов, насколько это позволяют процессы до выполнения размещения и трассировки, и имеются гарантии их реализуемости в данном кристалле. Почти все современные системы способны выдать оценку трассируемости схем по информации о проценте используемого оборудования и данным о конкретных применяемых элементах и количестве точек, которые требуется соединить.

Даже в этом случае, допустив отсутствие возвратов на перепроектирование и организовав проектирование в параллель 3—5 БИС, для проектирования всех БИС, допустим за 3 месяца, требуется пропускать через сис-

тому одну схему за 3—4 дня. Если учесть при этом требование 100%-ной трассировки и естественное желание разработчика максимально использовать имеющееся оборудование (площадь кристалла), приводящие к невозможности полностью автоматического проектирования, то для систем, предусматривающих возможность ручного (интерактивного) допроектирования, осуществить такую пропускную способность оказывается чрезвычайно трудно. Примерно такая же ситуация складывается на остальных этапах проектирования, что еще раз подчеркивает важность четкой организации процесса проектирования и необходимость высокой степени отработки средств автоматизации проектирования.

Хочется сказать несколько слов о происходящем в настоящее время изменении подхода к САПР на последнем этапе проектирования. Речь идет о внесении изменений в проект по результатам наладки опытного образца. Еще сравнительно недавно при разработке конструкций выдвигались требования по возможности оперативного внесения изменений на заключительных этапах проектирования и соответствующие требования по отслеживанию изменений предъявлялись к системам автоматизированного проектирования. В настоящее время, с одной стороны, развитие средств САПР дает основания ставить вопрос о практически безошибочном проектировании, а с другой стороны, неремонтопригодность БИС и компактификация применяемых конструкций практически делают невозможным проведение значительных исправлений.

Несколько в стороне остались традиционно занимающие большое место в системе автоматизации проектирования вопросы тестопригодности разрабатываемых схем и автоматизированного синтеза тестов, но здесь, пожалуй, особенности проектирования именно супер-ЭВМ проявляются значительно меньше.

Конструкция супер-ЭВМ

Ю. С. Рябцев



Создавая конструкцию супер-ЭВМ, разработчик видит свою задачу в оптимальном размещении всего довольно большого электронного оборудования и обеспечении его работоспособности на всем периоде эксплуатации. Среди множества рассматриваемых проблем ключевыми являются две — коммутация и отвод тепла. Поэтому рас-

смотрение конструктивно-технологических вопросов сведено к анализу решения этих двух задач.

Практически все конструкции супер-ЭВМ оригинальны. Унифицированные решения не тиражируются даже в рамках одного изготовителя. Вызвано это тем, что супер-ЭВМ проектируется с использованием предельных возможностей существующей технологии, которая к тому же быстро, в предельно сжатые сроки прогрессирует. Поэтому использование старых решений или согласование новых решений с другими группами разработчиков не приводит к успеху. В смысле отработки новых подходов и новых решений супер-ЭВМ для промышленности компьютеры выполняют функции, подобные предельным (гоночным и рекордным) автомобилям в автомобилестроении. Многие решения, апробированные в супер-ЭВМ, становятся типовыми в других классах вычислительных систем. Например, кондуктивно-жидкостное охлаждение, принятое для супер-ЭВМ Сгау-1 и МК «Эльбрус-2» в 70-х годах, нашло применение в других классах ЭВМ в 80-х годах.

Основной трудностью при описании конструкций супер-ЭВМ, как, впрочем, и любых сложных систем, является их многомерность, в которой подчас не отыщешь главного звена, позволяющего забыть про остальные.

Для преодоления этой трудности рассмотрим задачу создания конструкции супер-ЭВМ в следующей последовательности: цели, основные требования и закономерности, технические решения.

Основные цели в порядке важности: надежность, производительность, стоимость.

Термину «надежность» в данном случае наиболее близко его бытовое понимание (надежное устройство — это устройство, успешно выполняющее свои функции в течение длительного времени без ремонта). В техническом смысле надежность означает низкий уровень дефектов при изготовлении и низкую интенсивность проявления скрытых дефектов при эксплуатации (допустимый уровень дефектности не должен превышать единиц дефектных компонент на миллион), приемлемую ремонтпригодность и удобство обслуживания.

Требование высокой производительности при создании конструкций супер-ЭВМ означает обеспечение максимально возможной частоты обработки информации при предельном уменьшении времени взаимодействия между узлами и устройствами ЭВМ. В конструктивном смысле это означает предельное уменьшение длин связей внутри устройств и между устройствами ЭВМ. Необходимо отметить, что эти задачи решаются одновременно с задачей размещения, резко увеличенного по сравнению с другими классами ЭВМ, объема оборудования и систем коммутации устройств, так как рост производительности достигается как за счет повышения быстродействия элементной базы, так и за счет организации одновременной работы многих устройств.

Приоритеты целей можно пояснить на следующих примерах.

1) Если период появления сбоев или отказов в супер-ЭВМ меньше среднего времени решения сложной задачи или ее контролируемой части (супер-ЭВМ в основном и делают для решения сложных задач), то говорить о производительности супер-ЭВМ или ее стоимости не имеет смысла, так как задачи практически не решаются. При повышении надежности свыше минимально допустимого уровня повышается и производительность за счет снижения потерь на повторный счет. Дальнейшее повышение надежности приводит к существен-

ному снижению стоимости эксплуатации, которая часто значительно превышает стоимость изготовления.

2) Повышение производительности супер-ЭВМ ведет не просто к повышению эффективности работы оборудования, а к сокращению календарных сроков создания новых изделий или к существенному повышению их качественных сторон, что приводит к непропорционально большому выигрышу у пользователя.

3) На определенном технологическом уровне различные технические решения могут приводить к изменению стоимости условной единицы оборудования в пределах десятков процентов и к изменению надежности и производительности в несколько раз, поэтому, минимизируя стоимость изготовления, можно резко потерять в эффективности использования ЭВМ. Тем не менее стоимость супер-ЭВМ, как абсолютная (стоимость изделия), так и относительная (стоимость выполнения одной операции), является важнейшим параметром системы. Высокая и сверхвысокая стоимость супер-ЭВМ существенно ограничивает круг пользователей, не имеющих возможности произвести крупные разовые затраты, а также затрудняет организацию серийного производства.

Исходные данные, требования и закономерности.

В супер-ЭВМ на интегральных схемах средней степени сложности осуществляются соединения между $10^6 \div 10^7$ выводами корпусов ИС и еще в $100 \div 1000$ раз больше соединений внутри ИС между электронными компонентами (транзисторами, резисторами и т. д.). В супер-ЭВМ на БИС число соединений между корпусами БИС уменьшается, но не так сильно, как можно было бы ожидать, так как в значительной степени возрастает объем оборудования. Аналогов супер-ЭВМ по сложности организации связей в современной технике нет. Поэтому первое впечатление человека, познакоившегося впервые с внутренностью шкафов супер-ЭВМ и увидевшего гигантское количество проводов — это сомнение в возможности их правильно соединения.

Естественно, гигантское количество соединений не может быть выполнено за одну технологическую операцию, поэтому весь комплекс связей должен быть расчленен на модули. Анализ многих ЭВМ показал, что между объемом логического оборудования в модуле и количеством связей модуля с другими частями систе-

мы существует закономерная зависимость — с ростом интеграции модуля число его выводов растет пропорционально корню квадратному от коэффициента увеличения интеграции. Эту закономерность обычно учитывают при конструировании всех типов узлов супер-ЭВМ.

Для обеспечения высокого быстродействия конструкция супер-ЭВМ должна обеспечивать минимальное время передачи информации между элементами, а не просто минимальную длину связей. При одинаковых длинах проводников время передачи по ним существенно зависит от их качественных показателей: диэлектрической постоянной, изолятора, однородности электрических характеристик и т. д. Поэтому в супер-ЭВМ нашли широкое применение высокочастотные элементы коммутации типа многослойных полосковых печатных плат, миниатюрных коаксиальных кабелей, высокочастотных соединителей и других элементов коммутации.

Каждый элемент в супер-ЭВМ представляет из себя одновременно и приемник сигналов и усилитель и находится под воздействием массы одновременно переключаемых усилителей того же типа, а также весьма мощных внутренних генераторов помех (ключевых источников питания, переключающихся реле, искрящих контактов двигателей) и внешних источников помех типа промышленного оборудования, грозовых разрядов и т. д. Все это остро ставит задачу электромагнитной совместимости различного оборудования и помехоустойчивости монтажа. Сверхбыстродействующие логические элементы с их малыми перепадами выходных напряжений являются широкополосными и чувствительными приемниками электрических сигналов.

Точная оценка стоимости создаваемой ЭВМ практически невозможна. Однако при конструировании всегда необходимо производить и стоимостную оценку принимаемых решений. Последнее время делались многочисленные попытки оценить стоимость одной связи в зависимости от технологии ее изготовления. Было показано, что отношение стоимостей одной связи между элементами, выполненной коаксиальным кабелем, в многослойной печатной плате, БИСе равно $1,0 : 0,1 : 0,0001$. Отсюда становится понятным стремление большинства межсоединений выполнять на уровне БИС. Имеется еще одно, близкое к сказанному, утверждение: при определенном технологическом уровне стои-

мость единицы длины связи не зависит от технологии ее изготовления. Это утверждение дает оценки, близкие к приведенным, и позволяет довольно уверенно давать относительную оценку стоимости различных технических решений.

При всем стремлении разработчиков элементной базы к снижению потребляемой мощности на отдельную логическую схему суммарная потребляемая мощность супер-ЭВМ различных поколений не снижается и достигает десятков киловатт на процессор и сотен киловатт на систему. Вызвано это решением задачи роста производительности за счет роста объема оборудования. В сочетании с требованием повышенной плотности упаковки это приводит к увеличению плотности тепловыделения до 100—300 Вт/дм³ (для сравнения вспомним, что ламповые телевизоры имели тепловую плотность порядка $3 \div 5$ Вт/дм³).

Принимая технические решения по обеспечению эффективного охлаждения устройств ЭВМ, обязательно учитывают следующие температурные зависимости элементной базы:

— при увеличении температуры кристалла ИС, БИС на $12 \div 15^\circ\text{C}$ его надежность снижается вдвое;

— при увеличении разницы температуры между хладагентом (воздух, жидкость) и кристаллом увеличивается вероятность отказов компонент при циклах включения — выключения питания (эта составляющая отказов в ряде случаев является определяющей);

— некоторые типы элементов имеют сильные зависимости помехоустойчивости и быстродействия от температуры и градиента температур внутри устройства.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Обеспечение приемлемого уровня дефектности достигается при разработке конструкции правильным расчленением оборудования на различные уровни модулей. Модулем первого уровня является корпус компонента (ИС, БИС, резистор, транзистор и т. д.); модулем второго уровня является сменный узел, соединяемый с системой с помощью электрического соединителя; к модулю третьего уровня относится блок, объединяющий несколько (до 100) сменных узлов; модуль четвертого уровня — шкаф. Размер любого выбирается из сообра-

жения обеспечения его бездефектности, либо удобства отбраковки дефектных модулей и простоты выполнения ремонта.

Для ряда ЭВМ введено обеспечение бездефектности методом отбраковки, а не ремонта, модулей и компонент вплоть до легкоъемных узлов. Ключом к высокой надежности является введение эффективных отбраковочных испытаний для выявления скрытых дефектов изготовления в компонентах и узлах (например, проверке функционирования в широком диапазоне температур, при воздействии широкополосной случайной вибрации, при широком изменении питающих напряжений и т. д.). Конструкции узлов супер-ЭВМ, как правило, обеспечивают возможность высокотехнологичного автоматизированного изготовления и проведение высокоэффективных отбраковочных испытаний.

Элементная база конкретных супер-ЭВМ, как правило, предельна для данного уровня технологии по быстродействию, но не по интеграции. Это вызвано тем, что логические схемы устройств супер-ЭВМ требуют, как правило, много выводов и поэтому хуже интегрируются, чем устройства ЭВМ низших классов. Одним из технических решений, определяющих качество конструкции супер-ЭВМ, является создание высокоплотных корпусов для ИС и БИС. По мере развития технологии именно в супер-ЭВМ были применены корпуса с шагом выводов 1,25 мм, 0,625 мм, 0,5 мм и числом выводов от 24 до 256.

К основному коммутационному элементу в супер-ЭВМ относится полосковая многослойная печатная плата (МПП). В совершенствовании МПП к настоящему времени достигнут существенный прогресс, и вызван он в основном потребностями больших ЭВМ и супер-ЭВМ. Если в начале 70-х гг. МПП имели плотность порядка $10 \div 20$ м/дм² (суммарная длина связей МПП на единицу поверхности), то в 80-е гг. плотность достигла $80 \div 100$ м/дм² и в рекордных по плотности МПП $400 \div 800$ м/дм². При этом обеспечивается поддержание электрических характеристик с высокой точностью и хорошая помехоустойчивость цепей.

С увеличением плотности упаковки оборудования неизбежно растет функциональный объем съемного модуля при уменьшении его физических размеров, следовательно, без разработки высокоплотных соединителей

невозможно создать хорошую конструкцию супер-ЭВМ. Это потребовало перехода на другой класс точности изготовления и применения новых материалов. Если в 70-е гг. наиболее сложными были соединители с шагом контактов 2,5 мм и числом контактов порядка $100 \div 200$, то в 80-е гг. для больших и супер-ЭВМ были созданы соединители с шагом контактов 1,25 мм и числом контактов $500 \div 1800$.

Высокая плотность упаковки электронного оборудования потребовала новых решений систем охлаждения устройств ЭВМ. Были разработаны системы:

— струйного охлаждения БИС с потоком воздуха, превышающим 20 м/с;

— кондуктивно-жидкостного охлаждения узлов ЭВМ, которые в этом классе нашли широкое применение (основной принцип заключается в размещении ИС, БИС на теплопроводящих шинах, которые через эффективные тепловые разъемы подключены к системе трубопроводов с циркулирующей жидкостью);

— охлаждением с погружением компонент в циркулирующую жидкость.

Эти системы охлаждения позволили отводить до 200 Вт с кубического дециметра объема при температуре кристаллов ИС, БИС порядка $70 \div 80^\circ\text{C}$. В качестве примера конструктивных решений в супер-ЭВМ коротко рассмотрим конструкции фирмы «Cray Research», которая является несомненным лидером по числу новых конструктивно-технологических решений. Следует также отметить, что производительность новых супер-ЭВМ, создаваемых этой фирмой, увеличивается с одновременным и весьма значительным уменьшением габаритов супер-ЭВМ.

Для разрабатываемой супер-ЭВМ Cray-3 время машинного цикла по сравнению с супер-ЭВМ Cray-1 сократится в 12 раз и достигнет 1—2 нс, т. е. в 12 раз возрастет быстродействие в расчете на один процессор. Супер-ЭВМ Cray-3 будет иметь размеры $30 \times 30 \times 30$ см. Длина монтажных проводников в этой ЭВМ не превышает 75 мм (в ЭВМ Cray-2 длины связей не превышали 41 см, в ЭВМ Cray-1 — 123 см). Столь высокая степень миниатюризации, достигнутая в конструкции машины, стала возможна лишь при автоматизации всех технологических операций, начиная с разделения арсенидгаллиевых пластин на кристаллы и кончая проволочным

монтажом смежных плат. Новая супер-ЭВМ будет содержать 16 процессоров, в то время как супер-ЭВМ Cray-1 — однопроцессорная машина, переходная модель супер-ЭВМ X-MP имеет от 1 до 4 процессоров, Cray-2 — 4 процессора.

Специалисты фирмы «Cray Research» достигают повышения быстродействия за счет увеличения объемной плотности компоновки модуля. Супер-ЭВМ Cray-2 построена на логических СИС с уровнем интеграции 16 вентилях на кристалле. Восемь плат размером 100×200 мм объединены в модуль размером $100 \times 200 \times 25$ мм, в модуле содержится 700 ИС.

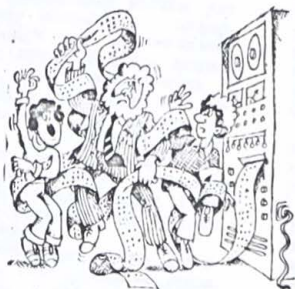
В Cray-2 применена система непосредственного жидкостного охлаждения путем погружения трехмерных модулей в охлаждающую жидкость — фторированный углеводород. Ремонтопригодность супер-ЭВМ Cray-2 физически не ограничена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ развития конструктивно-технологической базы современных супер-ЭВМ показывает, что высокая плотность компоновки ИС, уменьшение длин связей и в конечном счете сокращение машинного цикла достигаются за счет рационального выбора конструкции, средств коммутации и соответствующих методов охлаждения. Характерно, что при определении стоимости и надежности вычислительной системы в целом решающую роль в настоящее время играют конструкция и система охлаждения. При создании новых моделей супер-ЭВМ эти вопросы приобретают особую остроту.

Программное обеспечение супер-ЭВМ

С. В. Семенхин



Программное обеспечение — это комплекс программных средств, позволяющий в удобной форме использовать возможности вычислительной машины. Любая вычислительная система на уровне электронных схем (аппаратуры) ведет обработку данных, представленных в виде битов информации. В памяти машины расположены коды программ — последовательность операций и данные для этих операций — операнды. Центральный процессор обращается к оперативной памяти, получает очередную операцию и операнды и выполняет необходимые действия, соответствующие конкретной команде.

Понятно, что человек не в состоянии на уровне битов сформировать задание для ЭВМ, разместить его в памяти и получить понятный результат. Нужны более естественные и удобные средства и для указания последователь-

ности действий на аппаратном уровне. Это и является основной функцией программного обеспечения. Прежде чем перейти к обсуждению компонентов программного обеспечения, необходимо рассмотреть основные аппаратные возможности, типичные для любой машины, где следует выделить центральные (ЦУ) и внешние устройства (ВУ).

К центральным устройствам относятся центральный процессор (ЦП), процессор ввода-вывода (ПВВ), оперативная память (ОП). Оперативная память состоит из машинных слов, каждое из которых имеет свой номер (адрес) и может быть считано в центральный процессор. В словах оперативной памяти размещаются коды программ (операции) и данные. Основная функция центрального процессора — исполнение операций (команд) некоторой программы. Процессор ввода-вывода по управляющей команде автономно осуществляет обмен информацией между заданной областью ОП и внешним устройством. Параллельно, в конкретный момент времени, ПВВ может управлять обменом информацией с несколькими внешними устройствами. Внешние устройства можно разбить на два класса: устройства для хранения больших объемов информации — магнитные диски и терминальное оборудование. К тер-

минальному оборудованию относятся устройства типа дисплея и устройства для ввода информации, например АЦПУ.

Основными компонентами программного обеспечения являются операционная система, языки программирования, диалоговые (интерактивные) средства работы с терминалом, прикладные пакеты для решения конкретных информационных или научно-технических задач. Все эти компоненты можно расположить в некоторой иерархической последовательности по отношению к аппаратным средствам: пользователь, прикладные пакеты, диалоговые средства, язык программирования, транслятор, операционная система, аппаратура.

Таким образом, составленная иерархия несколько условна и не означает, например, что пользователь применяет только средства, представленные прикладными пакетами. Приведенная иерархия характеризует степень «отдаленности» компонентов от аппаратуры и наиболее тесные границы взаимодействия.

По отношению к компонентам программного обеспечения существуют различные классы пользователей. Некоторые работают только со средствами, предоставляемыми прикладными пакетами, другие создают новые прикладные программы, третьи разрабатывают новые диалоговые средства или языки программирования, но это не значит, что при создании, например, новых языков нельзя использовать существующие диалоговые средства. Более того,

сама ОС создается на некотором базовом языке программирования¹. Определяющими, наиболее важными компонентами являются операционная система и система программирования (язык и транслятор). К основной функции ОС относится поддержка (реализация) необходимых возможностей языка программирования, управление работой центральных устройств и организация работы по обмену информацией с внешними устройствами.

Язык программирования позволяет представить необходимый алгоритм в некотором текстовом виде.

Для любого языка программирования существует специальная программа-транслятор. Текст программы на языке представляет собой исходную информацию для работы транслятора. По этому тексту транслятор формирует код программы (генерация кода).

Для чтения текста программы, например, с терминала или магнитного диска и записи полученного кода на магнитный диск транслятора используют средства, предоставляемые ОС. Основной функцией диалоговых систем является разбор приказов, набираемых на терминале, или анализ изменений информации на экране и запуск необходимой реакции (соответствующих программ). Для чтения информации с терминала и записи на него результатов исполнения приказов, диалоговые системы используют или возможности языка или средства, предоставляемые ОС (языковые средства в конечном ито-

¹ В этой статье не рассматривается вопрос о первоначальном создании операционной системы для новой машины.

ге преобразуются в соответствующее обращение к ОС).

Языки программирования.

В рамках вычислительной системы действует несколько языков программирования соответствующих им трансляторов. Некоторые из них используются для создания прикладных программ, некоторые — для создания трансляторов и ОС. Как правило, в большинстве систем существует язык ассемблер, позволяющий в символьном виде использовать конкретные операции — команды ЦП — и в таком виде предоставлять необходимый алгоритм. Используются языки и с более широкими, лаконичными и удобными возможностями — языки высокого уровня (Фортран, Алгол, Паскаль и др.).

На ассемблерах создаются, как правило, ОС и трансляторы, на языках более высокого уровня — прикладные системы. Однако следует отметить принципиальную разницу между ассемблером и языками высокого уровня. Кроме различного рода изобразительных средств, принципиальное отличие заключается в организации защиты данных. При использовании ассемблеров ошибки в программах могут привести к искажению информации. В языках высокого уровня такое недопустимо. Очевидно, хорошим качеством системы можно назвать наличие базового языка высокого уровня, на котором можно создавать и ОС, и трансляторы, и прикладные программы.

Определяющими понятиями языков программирования являются «переменная» и «процедура». Им ставится в соответствие некоторое имя. Такое соответствие устанавливается в тексте программы с

помощью соответствующей конструкции языка, называемой «описание».

Пример.

```
. . . . .  
. . . . .  
. . . . .
```

Переменная
A, B, C, ...
K..

Программа,
в которой
введены пе-
ременные с
именами A,
B, C...

Используя имя переменной (идентификатор) в тексте программы, можно изменять значение переменной.

Пример.

```
...A:=3.14; ...C:=A; ...K:=A+  
+C*/D; ...
```

Приведенные конструкции транслируются в определенную последовательность команд, и исполняются ЦП. Имени переменной при исполнении операции соответствует определенный адрес слова оперативной памяти.

При описании процедуры, кроме ее имени, указывается текст процедуры, определяющий некоторую последовательность действий, которая при трансляции преобразуется в соответствующую последовательность команд. Каждая процедура может быть вызвана для исполнения в какой-то точке программы. Транслятор, преобразуя такой вызов процедуры (оператор процедуры), сформирует необходимую по-

следовательность операций. В результате исполнения этих операций ЦП перейдет на исполнение первой команды соответствующей процедуры. При описании процедуры могут быть объявлены и так называемые формальные параметры. Для них при исполнении, как и для переменных, отводятся соответствующие слова в памяти машины. Значения для этих «параметров — переменных» устанавливаются в момент вызова процедуры, т. е. в этот момент формальные параметры принимают фактические значения. Если в тексте процедуры используются идентификаторы формальных параметров, то при исполнении процедуры в вычислениях будут участвовать фактические значения этих параметров.

Описания переменных и процедур могут встречаться в начале определенных языковых конструкций, например, в начале программы или процедуры.

Следует отметить, что разница между программой и процедурой условна. Программа — это такая же процедура, только ее имя — это так называемое внешнее имя, которое определяет, где находится код программы для ее запуска. Запуск таких программ-процедур осуществляется с помощью средств, предоставляемых ОС.

Процедура обладает еще одним очень важным свойством — контекстом исполнения. Контекст исполнения определяет имена всех объектов (переменных, процедур...), которые доступны для конкретной процедуры.

Например, если в программе описаны переменные А, В, С и процедуры П1 и П2 в тексте которых, в свою оче-

редь, описаны соответственно переменные А1, В1, С1 и А2, В2, С2, то контекст процедуры П1 составляют переменные А, В, С, А1, В1, С1, а контекст процедуры П2 — А, В, С, А2, В2, С2.

В большинстве языков при описании переменных определяется и ее тип. Такие языки являются статическими по типам. В динамических языках в различные моменты исполнения могут быть различные по типам значения переменной. Не нарушая общего хода дальнейших рассуждений, можно считать, что с некоторым идентификатором в момент исполнения операции связано значение, определяющее некоторый объект.

К основным объектам, которые вводятся в языки, относятся: целые и вещественные числа, логические значения, массивы, процедуры, файлы, справочники и др.

Для работы с объектами различных типов разрешен только определенный набор операций. Например, числа можно складывать, умножать и т. п., массивы — индексировать, т. е. получать необходимый элемент массива. Например: $I := 5$; $K := M[I]$, здесь значением переменной К станет значение пятого элемента массива М. Над файлами разрешены операции записи и чтения, т. е. содержимое некоторого массива можно записать на файл и т. п. Например, ЗАП (М, ПЕЧ) — запись содержимого массива М на ФАЙЛ АЦПУ, т. е. печать.

Следует отметить, что объекты типа «файл» и «справочник» являются внешними объектами и часто реализуются в рамках так называемых язык-

ков управления заданиями или в приказах диалога, а в программу такие объекты передаются через параметры или специальные средства запуска программ.

Таким образом, используя средства конкретного языка программирования, можно создавать различные программы для решения необходимых задач, транслировать программы, полученный код, как файл, размещать на внешнем носителе и затем обращаться к нему по внешнему имени.

Пример.

```
Начало//транслятор  
((//ТЕКСТ, //КОД) конец
```

В этом примере запускается программа-процедура, код которой хранится по внешнему имени //транслятор. В качестве параметров транслятору передаются два файла //ТЕКСТ и //КОД. Используя эти фактические параметры (конкретные файлы), транслятор считывает текст и формирует необходимый код. В этих примерах используются внешние имена. Их создание и привязка к конкретному файлу производятся соответствующими языковыми конструкциями, различными по образительным средствам в различных языках.

Основные функции операционной системы. Операционная система расширяет функциональные возможности аппаратуры. Например, для реализации операции а+в транслятору достаточно команд, которые «умеет» выполнять ЦП.

Для реализации, например, генератора массива (выделение области памяти под массив) необходимо обратиться к соответствующей процедуре ОС. Итак, одной из функций ОС является поддержка реализации языковых

средств программирования: создание и уничтожение сложных объектов, таких, как массивы, файлы, справочники, реализация операции над такими объектами, например, чтение и запись в файл (операции обменов с ВУ), запуск программ по внешнему имени, связывание внешнего имени и файла и т. п.

Второй важнейшей функцией ОС является распределение ресурсов вычислительной системы. Дело в том, что реальные ресурсы машины ограничены, а в данный отрезок времени в машине могут находиться в стадии исполнения несколько задач.

Какие же ресурсы распределяет ОС? К важнейшим из них относятся время работы ЦП и оперативная и внешняя память. Кроме этих двух основных функций, ОС предоставляет средства для организации входа пользователя в систему, обрабатывает сбои и предоставляет средства для восстановления вычислительного процесса, собирает статистику о работе всех устройств и интенсивности их использования, обеспечивает защиту данных на основе аппаратных средств, реализует виртуальные возможности для массивов и программ.

Виртуальность — важное качество, определяющее автоматическое перемещение массивов и кодов процедур между оперативной памятью и магнитными дисками, если это необходимо. Таким образом, если происходит обращение к массиву или процедуре, которые в данный момент находятся на магнитном диске, то происходит автоматическое чтение их в оперативную память. Возможно, при этом происходит перемещение каких-то дру-

тих массивов или процедур из оперативной памяти на магнитный диск.

Как же воспользоваться средствами, реализованными в рамках операционной системы? Очевидно, для этого необходимо уметь вызывать ту или иную процедуру ОС из всего набора. Коды основных процедур всегда находятся в оперативной памяти, куда они перемещаются в процессе инициализации системы. Кроме процедур, в памяти находятся переменные ОС и массивы, где организованы различного рода таблицы, списки необходимой информации. Некоторые массивы существуют всегда, некоторые создаются и уничтожаются в процессе работы системы.

Для вызова процедур ОС в центральном процессоре существуют специальные команды. Например, возможна такая операция «ВХОДВОС», где n — порядковый номер процедуры ОС. Конечно, с номерами работать неудобно, поэтому, например, для всех трансляторов можно предусмотреть массив, где устанавливается соответствие между некоторым идентификатором и номером соответствующей процедуры ОС. Такой массив называется «интерфейс» с ОС и является постоянным контекстом трансляции. Имена всех интерфейсных процедур известны, и их можно явно указывать в программе. Например, ...ЗАПУСК ЗАДАЧИ (//КОДПРОГР). В этом примере осуществляется запуск программы с внешним именем //КОДПРОГР как некоторой задачи. Так, из программ можно явно обращаться к процедурам ОС для реализации тех или иных функций. Другой возможный способ

обращения к ОС — по прерыванию. Прерывание — это нарушение естественного хода выполнения команд программы и запуск необходимой процедуры. Сигналы прерываний могут возникать по различным причинам. Например, по окончании некоторого обмена информацией, который автономно проводил процессор ввода-вывода, или после нажатия соответствующей клавиши на дисплее, или по сигналу от некоторого внешнего объекта, работой которого управляет вычислительная машина, в случае когда в оперативной памяти отсутствует код или массив (в момент обращения) для организации чтения информации с магнитного диска. В разных системах прерывания реализуются по-разному. В некоторых, например, управление всегда передается специальной процедуре, а на специальный регистр ЦП заносится номер прерывания для последующего анализа и исполнения необходимой реакции. В других существует специальный массив — коммутатор прерываний, где находятся указатели на процедуры реакции (метки процедур). В этом случае по номеру прерывания ЦП обращается к коммутатору прерываний, выбирает соответствующую метку и запускает необходимую реакцию. После обработки прерывания, как и после запуска и завершения работы любой процедуры, управление возвращается в точку программы, где было вызвано прерывание.

Рассмотрим теперь пример входа с дисплея некоторого пользователя в систему, предоставляемые ему возможности для работы и поясним некоторые функции ОС.

При входе пользователя в систему с некоторого терминала ОС создает задачу и запускает в рамках этой задачи программу с фактическим параметром — указатель на файл-терминал. Используя этот параметр, запущенная программа может исполнять операции чтения информации (приказов) с терминала, разбирать их (анализировать текст) и запускать необходимые процедуры. Например, транслятор, редактор текста, исполнение некоторой ранее созданной программы по внешнему имени, создание файлов и занесение их в архив, т. е. установление соответствия между созданными файлами и некоторыми внешними именами и т. п.

Все эти действия осуществляются явным запуском необходимых процедур ОС или запуском системных программ по внешним именам из архива системы, доступного всем пользователям. Например, транслятор, редактор, вывод текста на печать и т. п. Это все возможно, когда в системе уже организована задача и пользователь набирает необходимые приказы.

Следует отметить, что в рамках задачи может быть организована и некоторая параллельная деятельность — созданы процессы. Дело в том, что некоторая программа или процедура может быть запущена для исполнения или последовательно, или параллельно отдельным процессом. Возникает вопрос: «Что значит параллельно, если в системе только один процессор?» Параллельная обработка задачи или процессов осуществляется разделением по времени работы центрального процессора, т. е. по некоторому кру-

говому алгоритму каждому процессу выделяется квант времени, после которого происходит переключение на другой процесс. Естественно, что такое же переключение происходит, если процесс ожидает окончания обмена с внешним устройством.

Прежде чем вернуться к анализу организации входа пользователя в систему, следует конкретизировать понятия задачи и процесса.

Относительно системы задача — это некоторый вид параллельной деятельности по исполнению программы от лица конкурентного пользователя в рамках выделенных ему ресурсов (бюджет по времени ЦП, объему требуемой внешней памяти и т. п.

Представитель задачи — «паспорт задачи», который служит массивом ОС и где хранится информация о текущем состоянии задачи. В рамках задачи могут исполняться несколько процессов. Представителем процесса тоже будет область памяти, где находится информация о состоянии процесса, например информация, необходимая для возобновления процесса исполнения на ЦП.

Итак, вернемся к задачам организации входа пользователя в систему. Все пользователи системы зарегистрированы в специальном файле, расположенном на магнитном диске. В этом файле для каждого пользователя, кроме его имени, указывается роль для входа, выделенные ему бюджет ресурсов (время ЦП, объем памяти на магнитном диске и т. п.), которые он не имеет права превышать, ссылка на его так называемый корневой справочник, элементами которого являют-

ся внешние имена и ссылки на файлы. Кроме такого файла «всех пользователей», в таблицах операционной системы хранятся указатели на все задачи (таблица задач) и таблица всех устройств, где отражено текущее состояние.

При первоначальном нажатии специальной клавиши в машину поступает сигнал, который, например, вызывает прерывание ЦП, и в определенное место памяти, связанное с номером дисплея, заносится информация о том, что дисплей стал активным.

Соответствующая процедура отработки прерывания создает в рамках некоторой всегда существующей системной задачи процесс знакомства с пользователем. Здесь как параллельная деятельность запускается специальная программа или процедура ОС, которой в качестве параметра передается указатель на файл-терминал.

Используя этот указатель, запущенная процедура требует от пользователя указать свое имя и пароль (запись на терминал) и ждет (чтения с терминала), когда пользователь ответит. Анализируя полученный ответ, процедура ОС сравнивает его с информацией из «файла пользователей» и в зависимости от результата создает или нет задачу конкретного пользователя, в рамках которой происходит его дальнейшая работа, т. е. исполнение различных программ. Здесь возможны явное или по прерыванию обращение к процедурам ОС для создания массивов, файлов, задач, процессов, организации виртуальных свойств, реализации операций чтения и записи для файлов, приостановки или уничтожения задач и процессов; переключение работы ЦП с одно-

го процесса на другой по исчерпанию кванта времени или по другому событию и т. п.

Все обсуждения, приведенные выше, никак не связывались с особенностями супер- или мини- и микро-ЭВМ. С точки зрения пользователей, создающих различного рода прикладные пакеты, например, для решения научно-технических задач, эти особенности не должны быть существенными, так как комфортабельная работа необходима на всех машинах любой производительности. Эти особенности по характеру не должны отличаться от особенностей, связанных с работой на различных ЭВМ (не обязательно супер) одинаковой производительности, но построенных по разным принципам. Относительно ОС и языков программирования (по крайней мере, базового языка) такие особенности необходимо учитывать.

Что же это за особенности? Любые супер-ЭВМ очень критичны, например, к переключению процессора с одной задачи на другую и вообще к различного рода прерываниям. В этом случае скорость вычислений резко падает. Это связано, например, с наличием в очень быстрых машинах буферной памяти для размещения данных и команд. Наличие такой буферной памяти позволяет ЦП только при первом обращении к какому-то слову оперативной памяти работать со сравнительно медленной скоростью, а затем использовать его копию из быстрого буфера. Переключение ЦП на другую деятельность и возобновление прерванных вычислений может вновь потребовать обращения к «медленной» оперативной памяти.

В некоторых системах, например, в комплексе с основ-

ной сверхбыстрой машиной работает средняя машина-сателлит, на которой ведется редактирование текстов, подготовка кода и необходимых данных. Затем эти данные передаются в основную машину, где осуществляется «производственный» счет. Благодаря этому, например, сокращается количество прерываний от терминала и основной вычислитель разгружается от работы, требующей частого переключения ЦП с одной деятельности на другую. Сократить количество таких переключений можно и по-другому. Например, организовать работу с внешними устройствами не по прерыванию, а осмотром и анализом деятельности аппаратуры в удобные моменты времени. Дело в том, что любая «счетная» задача в каких-то точках программы требует обмена информацией с ЗУ или для чтения данных и для записи результатов. Конечно, существуют асинхронные средства обменов, но обязательно есть момент, когда необходимо ждать окончания обмена. Этот момент и «удобен» для обработки различных внешних сигналов, например, при завершении каких-то обменов — в этот момент все равно необходимо переключение работы ЦП на другой процесс или задачу.

К сожалению, во многих супер-ЭВМ отказываются от реализации виртуальных механизмов, так как это связано с более сложной обработкой адресов переменных и реализацией сложного механизма автоматической «откачки-подкачки» необходимой информации. Такой отказ от реализации виртуальных механизмов накладывает существенные огра-

ничения на программирование и усложняет процесс создания необходимых программ.

Для трансляторов существенным являются архитектурные особенности супер-ЭВМ. В настоящий момент можно выделить два подхода — векторизация и распараллеливание исполнения операций. Векторизация — это введение специальных операций над векторами. Например, пусть есть три массива, и следует каждый элемент первого массива сложить с соответствующим элементом второго, а результат записать в тот же элемент третьего массива.

Это и есть пример векторной операции. Такие операции могут выполняться очень быстро с использованием так называемого «конвейера». В этом случае в стадии исполнения находитесь сразу несколько элементов векторов. Например, для какого-то элемента записывается результат, а какие-то только считываются из памяти. Используя такой принцип, можно получить скорость исполнения одной операции над соответствующими элементами векторов, равную тактовой частоте машины. За один такт в ЦП осуществляется много элементарных действий типа «передача информации регистр — регистр». В этом случае для машины с тактовой частотой 10^{-8} с можно достичь скорости для векторных операций $100 \cdot 10^6$ операций в секунду.

Другой подход — возможность параллельного исполнения операций. В этом случае в ЦП имеется несколько исполнительных устройств, каждое из которых умеет выполнять определенный набор операций. Например, два устрой-

ства для сложения, два — для умножения, одно выполняет логические операции и т. п. Каждое из устройств тоже может обладать свойствами «конвейера», но не по исполнению операций над вектором, а по исполнению операций над не связанными векторной структурой данными (скалярные вычисления). В этом случае, если для какой-то операции «*» необходим результат ранее исполняемой команды «+», то операция должна поступить на исполнение в ЦП только после завершения соответствующей операции «+».

Оба этих подхода для получения максимальной производительности ставят сложные требования к трансляторам.

Если не рассматривать специально простой случай явного использования векторной операции, то эти требования для векторных машин сводятся к автоматическому выявлению на стадии трансляции неявных векторных структур для использования быстрых векторных операций. И во втором случае на стадии трансляции необходимо выявить независимые по исполнению операции для организации их параллельной работы на разных исполнительных устройствах.

Перечисленные проблемы не относятся исключительно к супер-ЭВМ, однако их проявление стало актуальным именно в процессе поиска новых путей для повышения производительности.

Сборник статей
под общей редакцией
члена-корреспондента АН СССР
Г. Г. Рябова

СУПЕР-ЭВМ

Библиотечка «Вычислительная техника и ее применение»

Выпуск 10

Главный отраслевой редактор Л. А. Ерышкин
Редактор Б. М. Васильев
Мл. редактор Е. Е. Куликова
Оформление художника И. А. Емельяновой
Худож. редактор П. Л. Храмов
Техн. редактор О. А. Найденова
Корректор Л. С. Соколова

Сдано в набор 15.09.87. Подписано к печати 14.01.88. Т-06814. Формат бумаги 84×108/16. Бумага для глубокой печати. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,78. Уч.-изд. л. 3,78. Тираж 25 000 экз. Заказ 1760. Цена 20 коп.

Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 874828.

170000, г. Калинин. Областная типография. Студенческий пер. 23.