

36*

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Э. В. ЕВРЕИНОВ, Ю. Г. КОСАРЕВ

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

ВТОРИЧНОЕ ИЗДАНИЕ

НОВОСИБИРСК

1963

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Э.В.Евреинов, Ю.Г.Косарев

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Вторичное издание

Издательство Сибирского отделения АН СССР
Н О В О С И Б И Р С К . 1963

А н н о т а ц и я

В данной работе рассматриваются пути построения вычислительных систем производительностью свыше миллиарда операций в секунду. Эта задача не может быть решена на существующей технической базе. Она не может быть решена и только за счет повышения быстродействия элементов. Возникает необходимость параллельного выполнения большого числа операций. Для этой цели предлагается использовать вычислительные системы, представляющие собой коллективы однородных электронных вычислительных машин (ЭВМ). В таких системах управление иерархическое, а обмен информацией может осуществляться между любыми ЭВМ.

В статье указаны основные проблемы, которые необходимо решить в различных областях науки и техники для достижения нужной производительности, а также предлагается этапный план построения вычислительной системы.

§ I. В В Е Д Е Н И Е

Для последнего десятилетия характерно бурное развитие вычислительной техники. Если в 1952 году в мире имелись единичные экземпляры электронных вычислительных машин (ЭВМ), то к 1962 году их насчитываются десятки тысяч. В тысячи раз возросла и производительность ЭВМ.

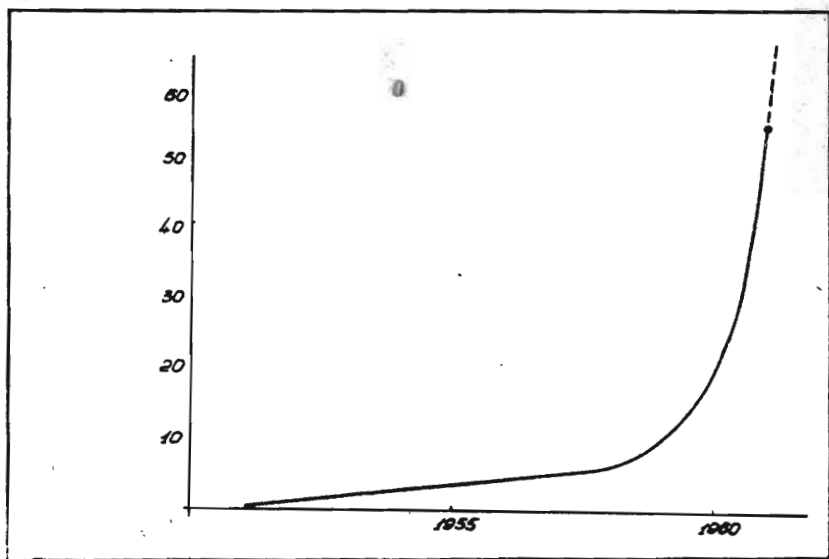
Как видно из рисунков I-3, темпы развития вычислительной техники все время возрастают. Применение вычислительных машин во многих областях науки и техники оказалось чрезвычайно выгодным, так как получаемый эффект уже в течение года, а нередко и нескольких месяцев, полностью окупает все затраты. Резко растет и число областей человеческой деятельности, где используются ЭВМ (см. рис. 4).

Значение вычислительных машин не ограничивается увеличением производительности труда. Как показано в работе [2], задача управления народным хозяйством не может быть эффективно решена без применения ЭВМ. Аналогично обстоит дело с проблемой научно-технической информации [3].

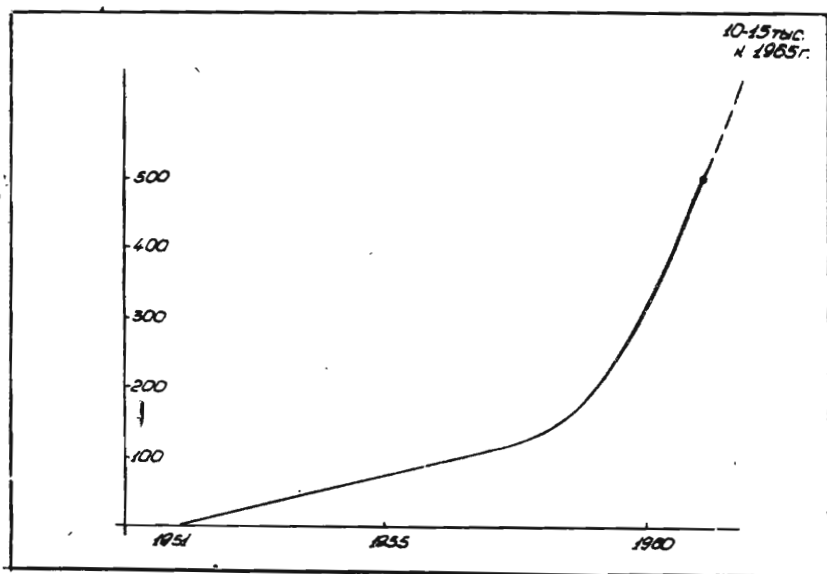
Области применения ЭВМ в зависимости от трудоёмкости задач можно разделить на две группы.

К первой группе относятся массовые задачи, со сравнительно небольшим объемом вычислений, такие, как задачи управления производственными процессами, задачи, связанные с проектно-конструкторскими работами, большинство экономических задач и задач управления народным хозяйством, значительное число научных задач и т.п.

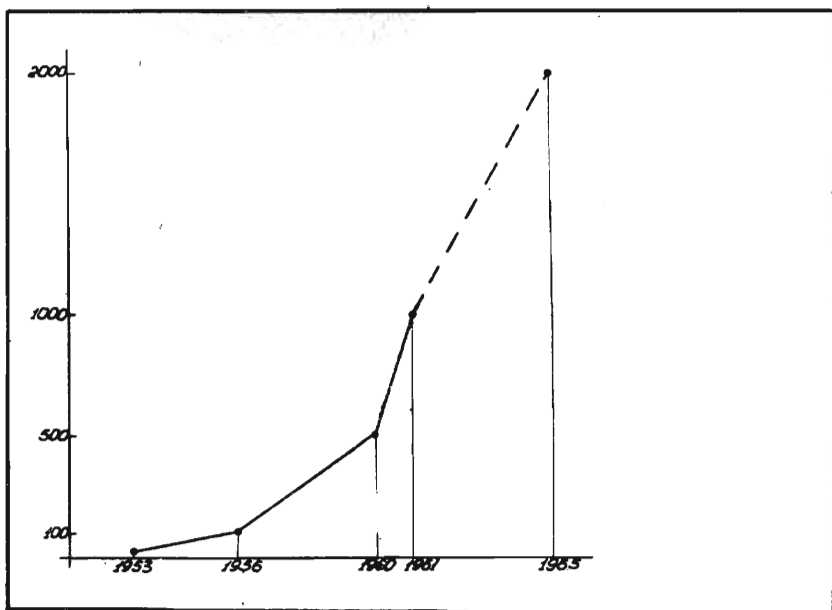
Для успешного решения этой группы задач важна с у м -



Р и с.1. График роста мощности парка ЭВМ в США (опер/сек) [1].

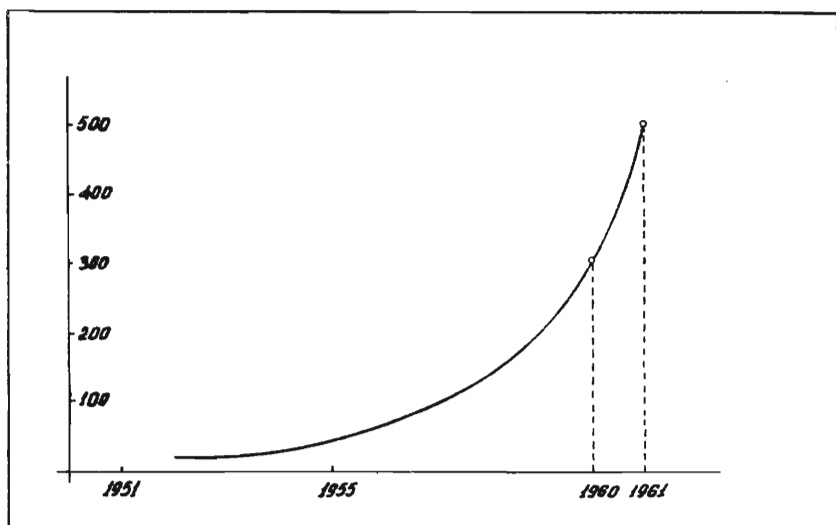


Р и с.2. График роста количества универсальных Э.В.М. в США [1].



Р и с.3. График роста продажи
ЭВМ в США в 1965 г. (в млн.дол.) [1]

рис. 1.2.



Р и с.4. График роста количества
областей применения ЭВМ [1]

рис. 1.1.

марная производительность всего парка ЭВМ.

Ко второй группе относятся задачи, требующие для своего решения выполнения огромного числа операций. Это сложные научно-технические задачи; задачи ядерной физики; задачи, связанные с освоением космоса; задачи проектирования, связанные с выбором оптимального варианта; задачи динамической метеорологии и т.п. [4,5] .

Успех в решении задач второй группы зависит от достигнутого уровня производительности ЭВМ. При этом производительность ЭВМ определяет не только круг задач, поддающихся решению, но и общие темпы научных исследований. Дело в том, что основные усилия исследователей тратятся, как правило, на создание методов, которые сводили бы решение данной задачи к определенному числу операций, поддающемуся выполнению на имеющейся технике.

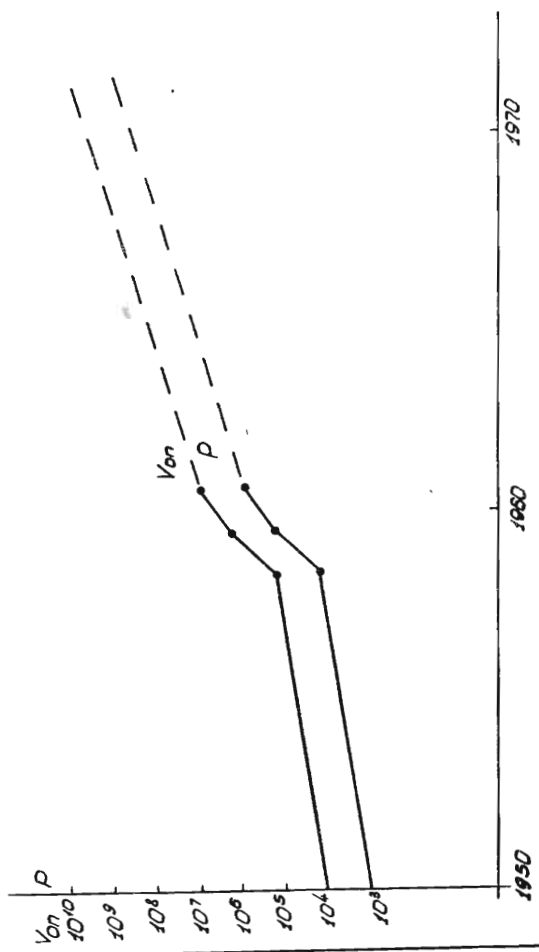
По мере проникновения в глубины атомного ядра, космоса, тайны живой природы, процессов мышления и т.п. потребуются решать все более и более сложные задачи. Поэтому повышение производительности ЭВМ, как незаменимого инструмента познания, будет всегда являться одной из основных проблем науки.

Существуют важнейшие задачи, которые не поддаются решению на современной вычислительной технике.

Еще в 1956 году указывались примеры таких задач. [6]. При этом делался вывод, что решение двумерных и трехмерных задач математической физики, в частности, трехмерных задач газовой динамики и расчет гетерогенных котлов, требуют создания ЭВМ с быстродействием в несколько миллионов операций в секунду.

Попытаемся оценить, какая производительность ЭВМ потребуется на ближайшие 10-15 лет. Вопрос этот сложен, и на него можно ответить в значительной мере предположительно. Экстраполяция кривой роста производительности ЭВМ (рис. 5) дает оценку для требуемой производительности ЭВМ в 1970-75 гг порядка 10^9 опер/сек. Такой же вывод сделан в статье [7] на основании анализа задач.

Достижение подобной производительности является сложнейшей проблемой, которая для своего решения потребует широкого фронта исследований во многих областях науки и техники, и прежде всего в физике, математике, химии, вакуумной технике,



Р и с. 5. График роста производительности и объема оперативной памяти V от ЭВМ

радиоэлектронике. Эта проблема не может быть решена за короткий срок, поэтому к ней пора приступать уже сейчас.

Цель данной работы – рассмотреть возможные пути создания универсальных вычислительных машин с уровнем производительности свыше 10^9 операций в секунду и объемом памяти не менее 10^{10} двоичных единиц. Эти машины должны обладать большой гибкостью, достаточной для решения разнообразных задач, и в то же время иметь хорошие технологические и эксплуатационные качества.

С этой целью были последовательно рассмотрены: (1) возможности существующей технической базы (§ 2); (2) возможность решения данной задачи за счет повышения быстродействия элементов (§ 3); (3) возможность решения данной задачи за счет параллельного выполнения большого числа операций (§§ 4 – 7).

Возможности повышения производительности за счет совершенствования методов решения задач на основе самообучения ЭВМ в работе не рассматривались. В этой весьма перспективной области сделаны только первые шаги. К тому же использование методов обучения и самообучения не исключает рассмотренных в данной работе методов, и, более того, реализация последних может явиться технической основой для эффективного использования процессов обучения и самообучения.

§ 2. ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭВМ НА СУЩЕСТВУЮЩЕМ УРОВНЕ ТЕХНИКИ

Главной тенденцией на пути повышения производительности ЭВМ является стремление к совмещению во времени возможно большего числа частей вычислительного процесса. Эта тенденция проявляется на различных уровнях.

Совмещается во времени выполнение различных операций. Например, одновременно с выполнением операции производится выборка команды следующей операции (частичное совмещение), либо одновременно с выполнением предыдущей операции производится выборка исходных данных для последующей операции (полное совмещение) [8, 9].

Совмещаются микрооперации внутри операции. Например, при выполнении операции умножения происходит совмещение сложения переносов со сложением следующего промежуточного слагаемого, либо одновременное умножение на несколько разрядов множителя, либо, наконец, параллельное умножение на все разряды множителя. Совмещение микроопераций часто сопровождается переходом к

более сложным командам и увеличению набора команд. Переход к усложненной системе команд приводит к трудностям в программировании. Поэтому такое направление тесно связано с разработкой систем автоматического программирования и входных языков для описания алгоритмов [10, 11, 12].

Совмещаются различные группы операций. Например, операции ввода и вывода информации совмещаются с выполнением всех остальных и т.п. [13].

Совмещается решение нескольких задач на одной ЭВМ, то есть в различных устройствах машины одновременно выполняются части разных задач. Под влиянием этой тенденции меняются не только отдельные схемы, но и основные конфигурации ЭВМ. Появились ЭВМ, состоящие из нескольких машин с различными функциями. Например, ввод, вывод и простейшие преобразования информации выполняются одной машиной, вычислительные и логические операции — другой, а организация процесса вычислений выполняется третьей машиной, либо одной из предыдущих [14, 15]. Еще большей гибкостью обладают ЭВМ, в которых одновременное выполнение большого числа арифметических, логических действий и преобразование информации достигается за счет увеличения числа устройств, выполняющих определенные операции автономно [16].

При решении какой-либо массовой задачи или задач определенного класса можно добиться повышения производительности за счет отказа от универсальности и перехода к построению специализированной машины, где для каждой операции или группы операций отводится специальное устройство. Этим достигается одновременное выполнение большого числа операций [17, 18].

Анализ ЭВМ, в которых реализованы указанные выше принципы, показывает, что таким путем производительность универсальных машин повышается примерно на порядок. При переходе к специализированным ЭВМ она может повышаться на два-три порядка.

Следует заметить, что увеличение производительности ЭВМ перечисленными способами одновременно ведет к росту общего числа элементов.

Другим методом повышения производительности является увеличение быстродействия элементов. Для современных машин характерно применение ламповых, транзисторных и ферритовых элементов. В существующих машинах достигнуты следующие уровни быстродействия: для ламповых — порядка нескольких миллио-

нов переключений в секунду, для транзисторных - нескольких десятков миллионов, для ферритовых - нескольких сотен тысяч.

Существующая технология изготовления этих элементов не позволяет надеяться на заметное увеличение быстродействия. К тому же они и не обладают высокой надежностью. Поэтому, фактически, указанные скорости можно считать предельными. Срок службы ламповых элементов составляет несколько десятков тысяч часов, полупроводниковых и магнитных - на порядок выше.

Сравнительно низкая надежность не позволяет существенно увеличить общее число элементов и в полной мере использовать возможности параллельного выполнения процесса вычисления. Опыт построения крупных ламповых и полупроводниковых машин показывает, что объем оборудования таких машин близок к предельному из-за трудностей разработки, изготовления и наладки [15, 19, 20]. Поэтому при конструировании и изготовлении современных машин весьма остро стоят вопросы повышения уровня проектирования, технологии изготовления и наладки. Весьма затрудняет повышение уровня проектирования существующий способ описания ЭВМ с помощью огромного числа графических схем.

С недавнего времени успешно применяется математическое (формульное) описание инженерной документации, что позволило начать автоматизацию процессов проектирования ЭВМ [21, 22]. Уже применяется автоматизация отдельных этапов проектирования. Например, автоматизированы выбор основных параметров ЭВМ путем моделирования ее работы на ЭВМ и изготовление заводской документации [23]. Намечается тенденция к полной автоматизации проектирования и технологии изготовления ЭВМ.

Для современных машин характерно применение мелкоблочного принципа конструирования, основанного на построении машины из небольшого набора стандартных элементов. Это связано с низкой надежностью элементов и необходимостью их частой замены в процессе наладки и эксплуатации, а также с некоторым удобством разработки и изготовления.

Совершенствование конструкции ЭВМ идет в основном по пути перехода к построению машины из конструктивно независимых унифицированных функциональных устройств, имеющих свою систему питания, стандартный вход и выход и состоящих из набора стандартных элементов.

Переход к применению унифицированных устройств открывает возможность приспособления машин для решения конкретных задач путем добавления дополнительных блоков оперативной и

долговременной памяти, входных и выходных устройств, арифметических и других устройств.

Для технологии изготовления характерным является следующее: (1) переход к печатному монтажу; (2) автоматизация производства отдельных элементов блоков памяти и других устройств; (3) широкое использование поточных линий; (4) унификация устройств ЭВМ, что позволяет на одной и той же технологической базе получать различные типы конфигураций ЭВМ [24,25,26].

Несмотря на указанные усовершенствования, технологический процесс в целом остается весьма сложным и не поддается в сколько-нибудь значительной степени автоматизации.

В области наладки и технической эксплуатации намечаются следующие основные направления: (1) полная автономность наладки отдельных устройств и схем; (2) использование программных методов обнаружения неисправностей; (3) введение избыточности в информацию как средства для обнаружения ошибок; (4) применение ЭВМ для отыскания неисправностей в других ЭВМ [27,28,29,30]. Несмотря на это, наладка и эксплуатация ЭВМ остаются весьма сложными и требуют многочисленного и высококвалифицированного персонала.

Причина затруднений в проектировании, технологии изготовления и эксплуатации кроется в самом характере используемых элементов (ламп, транзисторов и ферритов). Они требуют применения большого числа деталей (сопротивлений, конденсаторов, индуктивностей и т.п.), а следовательно и множества соединений. Невысокая надежность элементов влечет за собой применение мелкочленного принципа как основы конструкции машины, вследствие чего неизбежно появляется большое число разъемных контактов и других соединений.

Итак, существующая техническая база не дает возможности заметно повысить производительность ЭВМ (в лучшем случае путем затраты больших усилий и средств производительность может быть доведена до $10^6 - 10^7$ опер/сек) и не позволяет существенно упростить конструкцию, технологию изготовления, наладку и эксплуатацию ЭВМ.

§ 3. ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭВМ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИИ

Как видно из рис. 6, элементы, которые уже получены или

	Наименование	Время перекл. (н сек)	Произв. машины (оп/сек)
1.	Магнитные и ферро-электрические элементы	10	10^7
2.	Параметрические элементы	10	10^7
3.	Криоэлектрические элементы	10	10^7
4.	Туннельные элементы	1	10^8

Рис. 6. Таблица быстродействия новых физических элементов [31, 32]

	Производительность машины (опер/сек)	Линейный размер машины (см)
1.	10^6	$3 \cdot 10^3$
2.	10^7	$3 \cdot 10^2$
3.	10^8	$3 \cdot 10^1$
4.	10^9	3
5.	10^{10}	$3 \cdot 10^{-1}$
6.	10^{11}	$3 \cdot 10^{-2}$

Рис. 7. Таблица зависимости между быстродействием машины и ее предельными линейными размерами.

в ближайшем будущем будут получены, обладают скоростями переключения меньшими, чем это требуется для построения ЭВМ с производительностью свыше 10^9 опер/сек. Кроме того, изготавливаемые в настоящее время элементы не удовлетворительны по размерам, мощности рассеяния, разбросу параметров и надежности. Тем более они не удовлетворяют некоторым общим требованиям, которые налагаются машиной в целом, и, прежде всего, по габаритам и технологии изготовления.

Как известно, между скоростью работы элементов и размерами машины существует определенная зависимость, обусловленная наличием запаздывания сигналов в машине. Соответствующая таблица зависимости приведена на рис. 7. Из нее видно, что при скоростях работы ЭВМ свыше 10^9 опер/сек размеры машины должны быть менее 3 см. Итак, повышение скорости работы машины выше определенных пределов неизбежно связано с переходом к микроминиатюрным конструкциям.

Другим вопросом является технология изготовления ЭВМ. При производительности 10^9 опер/сек общее число элементов будет более 10^{10} . Вполне очевидно, что изготовление такой машины возможно лишь на основе полной автоматизации всего процесса изготовления ЭВМ.

Таким образом, возникает проблема разработки микроминиатюрных элементов, обладающих высокой скоростью переключения, малым уровнем рассеиваемой мощности, высокой надежностью и, что весьма важно, позволяющих изготавливать ЭВМ в едином, полностью автоматизированном, технологическом процессе. Так как технология во многом определяет параметры элементов, то она является центральной проблемой для построения ЭВМ миллиардного диапазона.

В настоящее время в технологии изготовления микроминиатюрных схем сложилось три основных направления:

- (1) микромодули,
- (2) пленочная электроника,
- (3) молекулярная электроника.

Первое направление заключается в построении схем из набора стандартных элементов — микромодулей, изготавливаемых из миниатюрных деталей (транзисторов, ферритов, ламп, сопротивлений, конденсаторов и т.п.). При этом может быть достигнута плотность около 30 деталей/см³ [33, 34].

Второе направление — пленочная электроника — основано на построении электронных схем путем нанесения различными способами (химическим, вакуумным осаждением) тонких пленок определен —

ных веществ. Путем последовательного нанесения различных материалов можно, в принципе, строить сколь угодно сложные электронные схемы и получать как отдельные устройства, так и машину в целом. При этом может быть достигнута плотность упаковки $(2 - 3) \times 10^3$ деталей/см³ [35,36,37].

Молекулярная электроника основана на построении электронных схем из куска твердого тела путем внесения в него различных примесей. В принципе, этим способом также возможно получение как отдельных устройств, так и машин в целом. Плотность упаковки достигает $1,5 \times 10^3$ деталей/см³ [38,39,40].

Из перечисленных направлений наиболее перспективными являются пленочная и молекулярная электроника. Использование микромодулей для построения ЭВМ производительностью миллиардного диапазона неперспективно как вследствие малой плотности упаковки деталей, так и из-за трудности автоматизации процесса сборки схем из микромодулей.

Наиболее перспективным способом построения схем на основе пленочной и молекулярной электроники является использование электронного и ионного лучей [41,42,43,44,45]. Свойства электронных потоков могут использоваться в области микроминиатюризации для многих целей.

Во-первых, — для нагрева тонких слоев материалов. При этом используется то обстоятельство, что электроны с энергией менее 300 кэВ полностью поглощаются в тонком слое толщиной порядка 1000 Å. Плотность энергии в луче может быть достаточно высока. Благодаря возможности регулирования тока, формы и направления луча осуществимы высокая точность и мгновенное управление действием, производимым электронным потоком. Таким способом можно испарять материал с небольших участков и получать любые конфигурации схем. Достигнутая при этом разрешающая способность составляет 1 — 10 мк.

Во-вторых, — как инструмент нетеплового воздействия электронов. Электронное изображение проектируется на поверхность образца, покрытого пленкой химического реактива. Полученное скрытое изображение при электронной бомбардировке проявляется в местах нагрева. Части образца, не подвергшиеся бомбардировке электронами, вытравливаются. Разрешающая способность при этом способе составляет около 0,1 мк.

В третьих, — для растровой электронной микроскопии, что позволяет получать данные о качестве образца и использовать их для автоматического управления процессом изготовления схем ма-

шины. Разрешающая способность при этом составляет около 0,03 мк.

В четвертых, — для генерирования характеристического рентгеновского излучения, применяемого для надежного распознавания материала образцов. Предельная разрешающая способность при этом имеет порядок 1 мк. Вес наименьшей частицы, которая еще может быть обнаружена, составляет только 10^{-14} г.

Еще большие возможности открывает применение направленного ионного луча. Ионный источник дает луч с большим током. Луч фокусируется, отклоняется с помощью системы управления и осаждается на подложку. Использование положительных ионов вместо электронов устраняет затруднения, вызываемые появлением рентгеновских лучей при работе с высокими напряжениями. При этом открывается перспектива создания трехмерных схем, получаемых способом осаждения. Устраняется необходимость в большей части операций по монтажу и соединению деталей, что повышает надежность системы.

Таким образом, методы обработки материалов электронным и ионным лучами делают реальной постановку вопроса о полной автоматизации изготовления электронной вычислительной машины в едином непрерывном процессе. Проблема является комплексной и требует решения следующих задач:

- (1) создания микроминиатюрных, высокочастотных, надежных, с малой потребляемой мощностью элементов вычислительной техники на основе пленочной или молекулярной электроники;
- (2) технологии изготовления схем из указанных элементов;
- (3) разработки методов получения и управления тонкими электронными и ионными пучками, а также способов осаждения ионов на подложку и т.п.;
- (4) разработки алгоритмов и системы управления технологическими процессами для изготовления ЭВМ.

§ 4. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Из предыдущего параграфа можно сделать два важных вывода:

1. Достижение производительности ЭВМ свыше 10^9 операций в секунду только за счет повышения быстродействия элементов связано с огромными трудностями и вряд ли возможно в ближайшее время.

2. Известные новые физические и технологические принципы делают вполне реальным построение машин с числом элемен-

тов свыше 10^{10} на основе полностью автоматизированного процесса изготовления.

Поэтому дальнейшее повышение производительности возможно лишь за счет усложнения логической структуры машины.

Как уже упоминалось в § 3, при повышении производительности за счет увеличения рабочей частоты элементов необходимо уменьшать размеры ЭВМ.

Для того чтобы избежать учета запаздываний сигналов в линиях связей внутри машины, необходимо выполнение соотношения:

$$L_{np} \ll \lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (1)$$

где L_{np} - наибольшая длина связи внутри машины,
 λ - длина волны, соответствующая рабочей частоте машины - ν ,
 c - скорость света.

Или
$$L_{np} = \frac{1}{\gamma} \frac{c}{\nu}, \quad (1)$$

где γ - коэффициент превышения длины волны над длиной связи. Величина этого коэффициента характеризует допустимую относительную величину фазового сдвига сигнала в линиях связей внутри машины. Обычно $\gamma = 10 + 100$.

От предельной длины связи нетрудно перейти к предельному объему машины.

$$V_{np} = a L_{np}^3 = a \left(\frac{c}{\gamma}\right)^3 \frac{1}{\nu^3}, \quad (2)$$

где a - коэффициент, учитывающий геометрическую конфигурацию машины.

Предельное число элементов будет равно

$$N_{np} = \rho V_{np} = \rho a \left(\frac{c}{\gamma}\right)^3 \frac{1}{\nu^3} = A \frac{1}{\nu^3}, \quad (3)$$

где ρ - максимально допустимое число элементов в единице объема, определяемое уровнем технологии. Через A обозначена часть выражения, не зависящая от рабочей частоты.

Предположим, что производительность ЭВМ прямо пропорциональна числу элементов, из которых она состоит. Заметим, что при таком предположении мы не забываем величину производительности. Действительно, если, например, число элементов увеличивается в целое число раз, то можно считать, что вместо од-

ной машины мы получаем несколько. Кроме того, производительность прямо пропорциональна рабочей частоте, то есть:

$$\rho = \beta N \nu, \quad (4)$$

где β - коэффициент пропорциональности.

На основании (4) и (3) получаем, что предельно возможная производительность ЭВМ может быть увеличена за счет уменьшения частоты при одновременном увеличении числа элементов до предельно допустимого

$$\rho_{np} = \beta \frac{1}{\nu^2}, \quad (5)$$

где $\beta = \beta A$.

Уменьшение рабочей частоты, например, на один порядок позволяет увеличить предельное число элементов в машине на три порядка и получить тем самым увеличение производительности примерно в 100 раз. Иными словами, производительность машины при таком подходе уже не лимитируется рабочей частотой и может быть существенно увеличена. Предельная производительность будет уже определяться такими факторами, как надежность элементов, временем изготовления и т.п.

Рассмотрим вопрос о соотношении между объемом оперативной памяти (ОП) (V_{on}) и производительностью. У существующих машин эти величины тесно связаны друг с другом. Общее время решения задачи, в основном, складывается из времени счета и времени ввода и вывода информации.

$$T = t_{cz} + t_{od} \quad (6)$$

Первый член убывает линейно с увеличением скорости выполнения операций. Второй - убывает с увеличением объема ОП. Однако установление строгого соотношения между t_{od} и V_{on} весьма затруднительно, так как оно заметно колеблется от задачи к задаче. На практике отношение объема ОП (в двоичных единицах) к числу операций в секунду обычно равно 10 - 100 (см. рис. 5). Опыт решения задач показывает, что существующие объемы памяти не являются чрезмерными, поэтому можно предположить, что указанное соотношение останется справедливым и для ЭВМ с более высокой производительностью. Значит, можно считать, что объем ОП должен увеличиваться с ростом производительности примерно линейно.

С увеличением рабочей частоты происходит перераспределение относительных затрат оборудования между блоками ЭВМ. Доля, приходящаяся на арифметическое устройство и устройство управ -

ления, уменьшается по сравнению с затратами на ОП и при быстродействии свыше $10^6 - 10^7$ опер/сек составляет небольшую часть от общего объема оборудования ^{х)}.

Таким образом, приходим к важному выводу, что при указанных быстродействиях усложнение арифметического устройства и устройства управления ЭВМ и связанное с этим увеличение в довольно широких пределах (на I-I,5 порядка) числа элементов в этих устройствах несущественно с точки зрения общих затрат оборудования.

Перейдем теперь к обсуждению вопроса, как наилучшим образом использовать предоставившуюся возможность увеличения числа логических элементов.

(I) П р и м е н е н и е б о л ь ш о г о ч и с л а
с п е ц и а л и з и р о в а н н ы х б л о к о в .

Примером машины, состоящей из специализированных блоков, является известная французская машина Г-60, в которой имеются арифметический блок, логический блок, блоки обмена информацией с внешним устройством и долговременной памятью [16].

Дальнейшим развитием этой идеи является проект ЭВМ из большого числа блоков-модулей, каждый из которых выполняет в данный момент одну и ту же операцию, задаваемую общим блоком управления. Указанный проект предназначен, по мысли авторов, для решения пространственных задач, а также для распознавания образов [46]. Такая модификация позволяет значительно повысить скорость решения определенного класса задач. Эффективность этой схемы в общем случае невелика, так как все блоки в каждый момент времени выполняют одну и ту же команду и имеют одно и то же направление движения информации.

В работах [47, 48] предлагается более совершенная система организации блоков-модулей, при которой модули могут выполнять в данный момент различные операции. Тем самым расширяется класс задач. Однако при большом числе блоков машина получается весьма сложной конструкции и требует сложной системы программирования. Кроме того, при решении конкретных задач значительная часть оборудования простаивала бы из-за основ-

х) При этих подсчетах подразумевалось, что элементы памяти и элементы логической схемы эквивалентны друг другу по затратам оборудования. Это предположение отражает тот факт, что переход к новым физическим принципам стирает различие между указанными типами элементов.

ных недостатков этого направления (малый объем памяти и отсутствие непосредственной связи между большинством модулей).

(2) Объединение ЭВМ с помощью единой информационной сети.

Простейшими примерами подобной сети машин служит объединение машин СЕАК и ДИСЕАК для решения общих задач [49] и система ПАЙЛОТ, состоящая из трех различных ЭВМ [50]. Намечается тенденция более широкого объединения ЭВМ в единую информационную сеть, аналогично единой энергетической сети. В информационную сеть, кроме ЭВМ, включаются также отдельные устройства сбора, преобразования, приема и передачи информации [51, 52, 53, 54].

Для существующих информационных сетей характерен низкий уровень организации. Общее число каналов связи невелико, машины соединяются через общий центр. Машины в сети сравнительно немногие, и они, как правило, разнотипны. При таких условиях трудно достичь значительного сокращения времени решения задач. Главной задачей подобных сетей в настоящее время является обмен информацией вне цикла работы машин.

Следует отметить, что применение сетей ЭВМ для ускорения решения задач наталкивается на принципиальную трудность. Время распространения сигнала между машинами в сети, как правило, значительно превышает время выполнения одной операции. Таким образом, появляется ограничение на минимальное число операций, выполняемых подряд одной машиной. Из-за этого уменьшается число частей, на которое разделяется процесс решения задачи, и тем самым сокращается количество ЭВМ, участвующих в вычислениях.

(3) Коллективы вычислительных машин.

Наиболее перспективным, по нашему мнению, является применение коллективов однородных универсальных ЭВМ, программно организуемых на выполнение заданного алгоритма. Такие коллективы машин мы будем называть вычислительными системами (ВС). Элементом ВС является универсальная ЭВМ, имеющая свою систему управления, арифметическое устройство, оперативную память и устройства для ввода и вывода информации. Такие машины в дальнейшем условимся называть элементарными (ЭМ).

ВС имеет высокую степень организации, основанную на том, что ЭМ на каждом такте вычислений может быть связана с любыми

другими ЭМ и что число каналов связи обеспечивает одновременный обмен информацией (в том числе управляющей) между любыми парами ЭМ.

ВС обладает большей гибкостью при решении задач и более удобна в эксплуатации, чем сети и системы, состоящие из логических модулей.

Следует отметить, что процесс решения задач на ВС в какой-то мере сходен с процессом решения задач на аналоговых вычислительных машинах (дифференциальные анализаторы и электронные интеграторы и т.п.) [55, 56]. Каждому блоку аналоговой машины соответствует элементарная универсальная машина ВС. В отличие от аналоговых машин (1) каждая ЭМ может выполнять любую функцию, (2) организация ЭМ для выполнения заданного алгоритма производится автоматически.

Сочетание достоинств аналоговых и универсальных электронных вычислительных машин делает удобным решение на ВС и задач моделирования, и проведения сложных вычислений.

В заключение отметим, что вычислительные системы позволяют получать высокие уровни производительности путем объединения ЭМ со сравнительно невысоким быстродействием. Например, ВС из 10^3 ЭМ с быстродействием 10^6 опер/сек каждая будет иметь производительность порядка 10^9 опер/сек.

Заметим, что ВС по количеству оборудования будет практически такой же, что и ЭМ, у которой та же производительность была бы достигнута за счет увеличения рабочей частоты элементов на несколько порядков. Объясняется это тем, что общее число элементов машины при высоких уровнях производительности определяется объемом ОП.

Теоретически ВС позволяет получать сколь угодно высокую производительность. Однако эффективное использование этой производительности возможно лишь при разделении процесса вычислений на достаточно большое число независимых частей.

§ 5. АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ, ЭФФЕКТИВНО РЕАЛИЗУЕМЫХ НА ВС

Из принципа построения ВС автоматически следует, что алгоритмы задач, эффективно выполняемых на ВС, должны допускать разделение процесса решения на большое число независимых выполняемых операций.

Для тех задач, которые не обладают подобным свойством, применение ВС будет малоэффективным. Подчеркнем, что здесь речь идет о задачах, требующих выполнения не менее 10^{10} опера-

ций, так как с меньшим объемом вычислений может успешно справиться и одна машина. ВС могут также оказаться бесполезными при управлении быстротекущими процессами, если требуемое время решения задачи менее некоторой величины t_{min} , определяемой временем выполнения одной операции элементарной машиной. Для указанных типов задач потребуется разработка ЭВМ, работающих на более высоких частотах, чем это допустимо в ВС. Следует отметить, что перечисленные выше типы задач — редкие исключения, поэтому мы на них останавливаться не будем.

Вопрос о свойствах алгоритмов, с точки зрения возможности представления процесса их реализации в виде большого числа параллельно выполняемых операций, мало изучен. До сих пор основное внимание уделялось разработке алгоритмов, рассчитанных на последовательное выполнение операций.

С целью выяснения классов алгоритмов, допускающих эффективное распараллеливание, представим алгоритмы в виде группы последовательно выполняемых операций. Для простоты возьмем за основу набор операций, обычно применяемых в серийных ЭВМ, и условимся, что все операции имеют одинаковую длительность.

Разобьем операции, составляющие вычислительный алгоритм, на группы. В первую группу отнесем все операции, которые могут быть выполнены с использованием только входных данных, во вторую — все те, которые могут быть выполнены с использованием входных данных и результатов операций первой группы, в третью — все операции, которые могут быть выполнены с использованием только входных данных и результатов первых двух групп и т.д. Общее число групп, на которые при этом распадается весь вычислительный алгоритм обозначим через h_m . Число операций i -ой группы — через $\ell(i)$. Общее число операций, составляющих вычислительный алгоритм, обозначим через ℓ ,

$$\ell = \sum_{i=1}^{h_m} \ell(i)$$

Вычислительный процесс может включать в себя повторяющиеся участки (циклы), причем число повторов может не задаваться заранее, а определяется в ходе решения. Далее, вычислительный процесс также может включать в себя разветвления.

Величина h_m и функция $\ell(i)$, строго говоря, определены не для самого вычислительного процесса, а для его конкретных реализаций, которые получают фиксацией длин циклов и выбором ветвей в точках разветвления.

Рассмотрим вычислительный алгоритм, для которого величина h_m и функция $\ell(i)$ определены. Величину h_m назовем минимальной длиной алгоритма, а функцию $\ell(i)$ — функцией пошагового распараллеливания. Величина алгоритма h_m пропорциональна минимальному времени реализации данного алгоритма.

В качестве количественной меры эффективности распараллеливания может быть принята величина

$$\bar{\ell} = \frac{\ell}{h_m} = \frac{1}{h_m} \sum_{i=1}^{h_m} \ell(i)$$

— среднее значение функции $\ell(h_m)$. Обозначим через L величину $\max_{1 \leq i \leq h_m} \ell(i)$. Величину $\beta_m = \frac{L}{\bar{\ell}} = \frac{L h_m}{\ell}$

будем называть средней ценой операции при минимальном времени реализации. Величина β_m характеризует усредненные относительные затраты оборудования на одну операцию. При этом предполагается, что на каждом шаге можно одновременно выполнять число операций, равное L . Иными словами, считается, что ВС состоит из L — машин. На каждом i -м шаге часть машин $(N - \ell(i)) \geq 0$ будет простаивать. Тогда $1/\beta_m$ будет характеризовать средний коэффициент использования машин, а β_m — среднее число машин, приходящихся на одну операцию.

Возникает вопрос об уменьшении величины β_m за счет перераспределения операций между шагами. Рассмотрим сначала случай, когда такое перераспределение не сопровождается увеличением числа шагов.

Пусть, например, функция $\ell(i)$ принимает на j -м шаге наибольшее значение, то есть $\ell(j) = L$. Тогда задача будет заключаться в том, чтобы, не нарушая процесса решения, перенести часть операций с j -го шага на последующие. Предположим, что часть операций j -го шага не влияет на выполнение операций $(j+1)$ -го шага. Тогда, не нарушая общей схемы алгоритма, можно перенести эту часть операций на $(j+1)$ шаг. Если на j -м шаге подобных операций нет, а на $(j+1)$ -м шаге есть операции, от которых не зависит ни одна из операций $(j+2)$ -шага, то при перемещении этих операций с $(j+1)$ -го шага на $(j+2)$ -й может появиться возможность перемещения операций с j -го шага на $(j+1)$ и т.д. Перебрав все возможные комбинации сдвигов, не приводящих к увеличению числа шагов, выберем схему с наименьшей ценой операции. Пошаговую функцию распределения числа операций, соответствующую этой минимальной

схеме, будем в дальнейшем обозначать $\ell^*(i)$.

Если при построении функции $\ell^*(i)$ допустить увеличение числа шагов и для каждого $n_k = n_m + k$, где k - дополнительное число шагов, построить минимальные схемы $\ell_k(i)$, то мы получим семейство характеристик для различных значений k . Для каждой схемы $\ell_k(i)$ можно указать среднюю цену операций β_k .

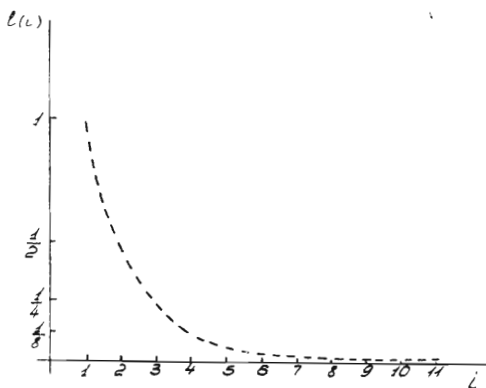
Для установления необходимого числа машин удобнее пользоваться характеристиками, обратными выше приведенным,

$$t = f_1(N),$$

$$\beta = f_2(N),$$

где N - число машин, участвующих в работе,
 $t = n_k \tau$ - время выполнения алгоритма,
 τ - время выполнения одной операции.

Рассмотрим, например, построение характеристик для перемножения двух квадратных матриц n -го порядка. Функция $\ell(i)$ будет в этом случае иметь вид, показанный на рис. 8.



Р и с. 8. Функция $\ell(i)$ для алгоритма умножения квадратных матриц порядка $n = 2^{10}$

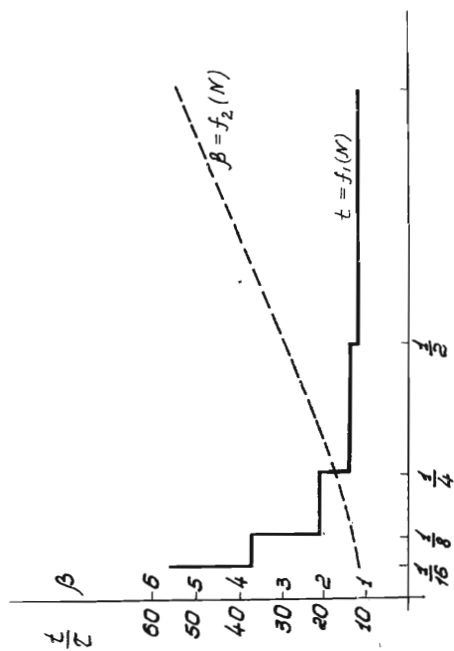
Нетрудно заметить, что в данной задаче не удается перенести часть операций с предыдущих шагов на последующие без увеличения общего числа шагов, то есть функция $l^*(i)$ совпадает с $l(i)$. Зависимости $t = f_1(N)$ и $\beta = f_2(N)$ для данной задачи имеют вид, показанный на рис. 9.

При построении указанных выше функций подразумевалось, что никаких ограничений на обращение к ОП не накладывается. На практике количество одновременных обращений к ОП строго определено. Обычно допускается одно обращение к ОП, не разделенной на блоки, а если ОП состоит из ряда блоков с самостоятельной системой выборки, число обращений равно числу блоков. Будем считать, что в ВС ОП каждой из элементарных машин допускает одно обращение на каждом такте. Иными словами вся информация должна быть разбита на N групп, и в каждый момент времени (на каждом шаге) можно производить операцию только над одним числом из каждой группы. Построение функций $l(i)$, $l^*(i)$, $t = f_1(N)$, $\beta = f_2(N)$ при этом ограничении дает возможность путем анализа большого числа алгоритмов сформулировать требования к числу элементарных машин с учетом ограничений, связанных с выборкой из ОП.

Для определения требований к структуре ВС (то есть к системе обмена информацией между ЭМ и к системе управления работой ВС) указанных выше функций недостаточно. Для этих целей необходимо исследовать информационные и управляющие связи между отдельными операциями.

Введем некоторые определения. Мы будем говорить, что (1) операция y непосредственно информационно зависит от операции x , если операция y производится над результатом операции x ; (2) операция x непосредственно управляет операциями y_1 и y_2 , если результат операции x определяет, какая из этих двух операций должна выполняться, и если при этом операция x непосредственно предшествует операциям y_1 и y_2 .

Заметим, что нередко между операциями могут быть одновременно и информационные и управляющие связи. Пусть, например, требуется выполнить операцию y_1 над числом z , если $z < a$, и операцию y_2 , в противном случае. Операция x (сравнение числа z с a) в этом случае предшествует операции y_1 по информации и непосредственно управляет операциями y_1 и y_2 . Для каждого алгоритма можно построить две схемы (схему информационных связей и схему управляющих связей)



Р и с. 9. Функции $\beta = f_2(N)$, $t = f_1(N)$ для алгоритма умножения матриц порядка $n = 2^{10}$

либо одну объединенную схему с указанием типа связи. Такие схемы могут быть определены в виде графов [57, 58] (рис. 10).

Из всего выше сказанного вытекает необходимость в решении следующих проблем:

1. Исследование свойств имеющихся алгоритмов с точки зрения эффективного распараллеливания процесса их выполнения.
2. Разработка алгоритмов, наилучшим образом приспособленных для их реализации на ВС.
3. Разработка языка описания алгоритмов и оценок их эффективности.
4. Разработка требований к параметрам ВС (числу машин, объему ОП, логической структуре и т.д.) на основе анализа алгоритмов.

§ 6. СТРУКТУРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

При выборе структуры ВС мы будем исходить из двух условий: (1) структура ВС должна обладать большой гибкостью, позволяющей легко приспособляться к выполнению любых задач; (2) на основании требований технологии, надежности и программирования структура ВС должна быть по возможности простой и однородной.

ВС состоит из трех основных частей: (1) элементарных машин, (2) системы обмена информацией внутри ВС, (3) системы обмена информацией с внешними источниками.

Предполагается, что все ЭМ одинаковы и осуществляют полный набор арифметических и логических операций, аналогично существующим ЭВМ. В отличие от обычных ЭВМ набор этих операций не фиксируется жестко, а устанавливается программным путем перед решением данной задачи (или части задачи). Практическое осуществление этой идеи не должно встретить больших затруднений и может быть выполнено на основе принципа микропрограммирования [59]. В качестве варианта технической реализации можно предположить, что элементарная машина состоит из нескольких микромашин. Каждая из микромашин имеет упрощенное арифметическое устройство, устройство управления и блок ОП. Другим отличием системы команд является наличие команд подключения каналов связи.

Система связи внутри ВС должна обеспечивать обмен информацией (в том числе и управляющей) между ЭМ. Технически каналы связи можно реализовать, используя два принципа: (1) непосредственное соединение ЭМ с помощью проводников и уст-

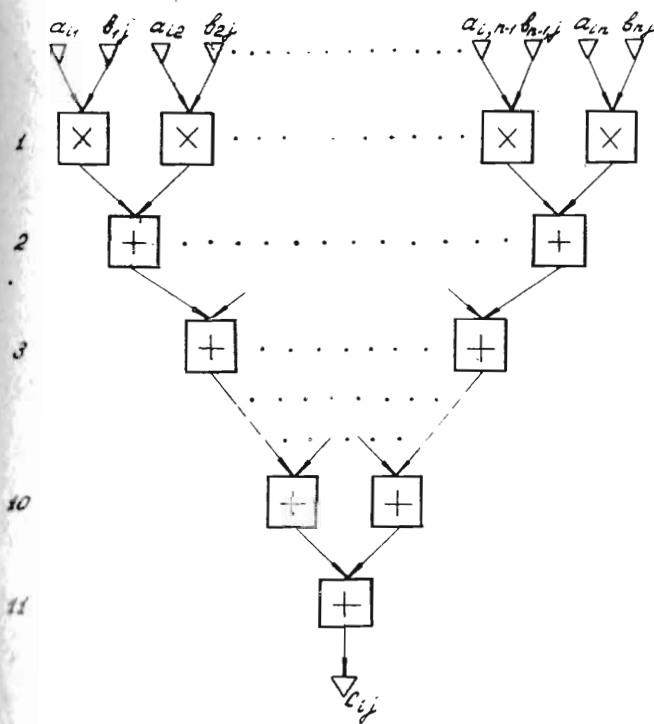


Рис 10 Граф-схема вычисления C_{ij} элемента матрицы. $C_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} b_{kj}$, $n=2^{10}$.

ройств коммутаций; (2) использование радиочастотного принципа связи. В последнем случае у каждой машины имеется приемник, настроенный на фиксированную частоту, и передатчик, настраиваемый на любую из N частот (либо, наоборот, может фиксироваться частота передачи). Заметим, что технология изготовления микроминиатюрных приемников и передатчиков может быть той же, что и для всей ВС.

Требование обмена информацией между двумя любыми ЭМ ВС сводятся к построению коммутатора с N входами и N выходами. При частотном принципе такой коммутатор получается автоматически. При использовании проводящих связей одноступенчатый коммутатор потребует применения N^2 коммутирующих элементов. Это число элементов слишком велико, и поэтому возникает задача построения многоступенчатого коммутатора с минимальным числом элементов.

При построении системы связи возникает также вопрос о выборе способа передачи информации (последовательного, параллельного или комбинированного); иными словами, необходимо сделать выбор между увеличением времени передачи и ростом числа каналов связи.

Обмен информацией с внешними источниками может быть построен на тех же принципах, что и обмен информацией между ЭМ. Заметим, что наличие огромных объемов памяти позволяет хранить в ВС достаточно полную информацию из той области, к которой принадлежат решаемые задачи. Эта информация может вводиться заранее перед настройкой ВС на данный класс задач. Время ввода этой информации не будет особенно велико, так как ввод может, в принципе, осуществляться одновременно по N каналам связи (то есть при участии всех ЭМ в ВС). Аналогично обстоит дело и с выводом информации. Для обмена информацией с внешними источниками наиболее целесообразно применять частотный принцип. В этом случае каждая ЭМ будет иметь свою заданную частоту работы, на которую должны настраиваться внешние источники информации. В качестве таких источников могут быть другие ВС, информационные сети, отдельные ЭВМ, различные устройства преобразования информации и т.д. Предполагается, что ВС будет сопрягаться с устройствами восприятия и воспроизведения зрительных образов и речи. Все эти устройства для связи с ВС должны иметь приемники и передатчики.

Одним из центральных вопросов, возникающих при разработке структуры ВС, является способ управления работой ЭМ.

Наиболее удачным решением этого вопроса является, по нашему мнению, построение ВС в виде связанных иерархических уровней. К первому уровню относятся элементарные машины. Ко второму — объединение из K_1 элементарных машин. В этом объединении каждая из K_1 машин связана со всеми машинами объединения, находящимися в непосредственном соседстве с данной. Одна из K_1 машин имеет непосредственные связи со всеми машинами объединения и называется центральной. Центральная машина управляет работой всех машин объединения и, кроме того, принимает участие в работе как элементарная машина. Пример возможного объединения машин показан на рис. II, а. Точками на нем обозначены элементарные машины, а линиями — связи. В данном примере $K_1 = 9$. На третьем уровне производится объединение центральных машин в группы по K_2 машин. Объединение из K_2 центральных машин третьего уровня образует четвертый уровень и т.д. На всех уровнях машины, входящие в одну группу, объединяются по той же схеме, что и элементарные машины.

Весьма целесообразными являются такие варианты структуры, когда элементарные машины входят одновременно в несколько объединений, как это показано, например, на рис. II, б. Этот вариант обладает большой гибкостью в распределении ЭМ между различными объединениями. Каждой центральной машине может быть придано от I до IO ЭМ. Ограничения, налагаемые на число разветвлений на каждом уровне δ ($\delta \leq 10$) и на максимальную высоту дерева H , равную числу иерархических уровней S , по-видимому, допускают достаточную свободу и позволяют получить большой диапазон конфигураций деревьев.

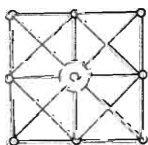
Каналы связи для управления ВС могут быть, в принципе, теми же, что и информационные. Не вызывает, впрочем, затруднений и создание самостоятельной системы связи для управления ВС.

В заключение отметим, что изложенные выше варианты структуры ВС удовлетворяют обоим условиям, сформулированным в начале данного параграфа, и могут быть взяты в качестве исходных данных для разработки детальной структуры ВС.

§ 7. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Программирование для ВС имеет ряд особенностей и сводится к решению следующих четырех задач:

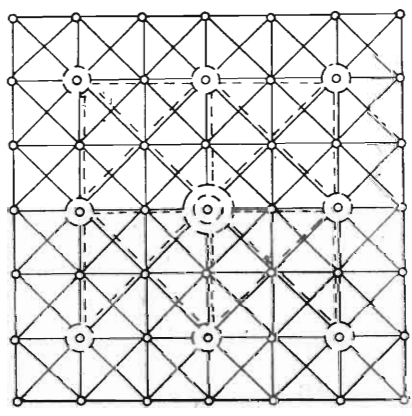
(I) Составление плана распределения операций между элементарными машинами и их объединениями.



а

о - элементарная машина

⊙ - центральная машина 1-го уровня



б

⊙ - центральная машина
2-го уровня

Р и с.11. Вариант схемы организации
управления ВС

(2) Распределение потоков информации между каналами связи.

(3) Выбор системы команд для каждой элементарной машины.

(4) Составление программы работы каждой элементарной машины и всех иерархических уровней объединения машин.

Первая задача по своему характеру аналогична задаче линейного и динамического программирования. Для ее решения, по-видимому, можно будет воспользоваться готовым математическим аппаратом [60, 61].

Задача распределения потоков информации между каналами связи однотипна с транспортными задачами, рассматриваемыми в математической экономике. Для этих задач также существует развитый математический аппарат [62, 63, 64].

Выбор системы команд перед решением задачи (либо этапа задачи) до этого в практике программирования не встречался, так как на всех существующих ЭВМ принимается неизменяемая система команд. Возможность изменения системы команд программным путем увеличивает гибкость ВС и позволяет учитывать особенности каждого из алгоритмов. Для эффективного использования этой возможности необходимо разработать программный метод выбора оптимальной системы операций элементарных машин для конкретного алгоритма. Эта задача, конечно, должна решаться одновременной с первой.

Четвертая задача требует нового подхода к программированию. Алгоритм решения задачи должен быть построен в виде S иерархических ступеней. Тогда в центральной машине ВС будет содержаться программа работы центральных машин ($S-1$)-го уровня. Центральные машины ($S-1$)-го уровня будут содержать программу работы центральных машин следующего уровня и т.д. И, наконец, центральные машины, образующие второй уровень, будут управлять элементарными машинами.

Рассмотрим некоторый алгоритм A^* , выполняемый на ВС.

Пусть A_{ij} - операторы, составляющие алгоритм A ($j = 1, 2, \dots, K_i$; $i = 1, 2, \dots, S-1$), где K_i - число операторов i -го уровня. Тогда $A = f_S(A_{1,S-1}, A_{2,S-1}, \dots, A_{K_{S-1},S-1})$.

Каждый из операторов $A_{j,S-1}$ в свою очередь является функцией операторов следующего уровня:

$$A_{j,S-1} = f_{j,S-1}(A_{1,S-2}, A_{2,S-2}, \dots, A_{K_{S-2},S-2}).$$

Каждый оператор $A_{j,S-2}$ подобным же образом выражается через операторы ($S-3$)-го уровня и т.д., пока, наконец, не дойдем

до второго уровня: $A_{j,2} = f_{j,2}(A_{1,1}, A_{2,1}, \dots, A_{k,1})$, где операторы $A_{1,1} \dots A_{k,1}$ являются операциями, выполняемыми элементарными машинами.

Таким образом, каждая центральная машина j -го уровня будет содержать программу для j -го уровня объединения машин. Эта программа будет состоять из элементарных команд (выполняемых самой машиной) и операторов (выполняемых объединениями машин). Она также должна предусматривать использование каналов связи между центральными машинами нижележащего уровня.

В отличие от обычных программ для ЭВМ, в которых одновременно выполняется только одна операция, эти программы, подобно программам ЭВМ Г-60, должны предусматривать одновременное выполнение нескольких операций [30].

Разработка системы программирования для ВС потребует решения следующих проблем:

1. Разработка входного языка и программирующей программы.

2. Автоматизация составления оптимального плана организации ВС для выполнения конкретного алгоритма. Этот план должен учитывать распределение операторов между иерархическими объединениями элементарных машин, распределение информации между блоками памяти и распределение потоков информации по каналам связи.

3. Автоматизация выбора системы команд элементарных машин (в том числе и центральных).

4. Выбор оптимальной системы команд для микромашин (или микроблоков), из которых набираются операции элементарных машин.

§ 8. ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В заключение выскажем некоторые предположительные соображения об основных параметрах ВС. Исходя из требований задач, необходимая производительность ВС должна быть не менее 10^9 операций в секунду при объеме оперативной памяти порядка 10^{10} двоичных единиц. Эта производительность может быть реализована ВС, состоящей из 10^3 элементарных машин, каждая из которых может выполнить 10^6 операций в секунду.

Учитывая тенденции развития вычислительной техники, ВС должна быть связана как с единой информационной сетью, так и с человеком. В связи с этим ВС должна будет воспринимать и передавать информацию в виде радиосигналов, звуковых колебаний и

зрительных образов.

На основе анализа параметров ВС и возможных путей технической реализации можно сделать вывод, что ВС должна быть изготовлена в едином полностью автоматизированном технологическом процессе в виде твердого тела, размеры которого определяются из учета физических и технологических требований (время распространения сигнала внутри ВС, мощность рассеяния, время изготовления системы и др.)

Основными проблемами, которые предстоит решить, являются:

1. Разработка методов решения задач на ВС.
2. Разработка системы программирования для ВС.
3. Разработка оптимального варианта структуры ВС.
4. Разработка физических и технологических основ построения ВС.
5. Автоматизация процессов проектирования и изготовления ВС.

Хотя все эти проблемы объединены общей целью, однако каждая из них может разрабатываться в значительной мере независимо от других и представляет самостоятельный интерес, выходящий за рамки построения ВС.

Представление алгоритмов в виде совокупности параллельно выполняемых операторов несомненно может оказаться полезным для теории алгоритмов.

Разработка системы программирования для ВС включает в себя рассмотрение проблемы управления коллективом машин, работающих над выполнением определенного алгоритма. Эта проблема возникает и на более низких уровнях организации ЭВМ, например, в сетях ЭВМ и системах, имеющих ряд самостоятельных арифметических и логических блоков и т.п. Данная проблема имеет несомненный интерес для теории коллективов.

Переход от фиксированной системы команд в системе, настраиваемой на выполнение того или иного алгоритма, может найти применение и в существующих ЭВМ.

Вопросы разработки оптимальной структуры ВС связаны с решением общих задач организации коллективов и построения оптимальной системы связи для обмена информацией между членами коллектива (в том числе и управляющей информацией). Последняя задача имеет много общего с задачей построения общей информационной сети в пределах государства или ряда государств.

Разработка физических и технологических основ построе -

ния ВС является кардинальной задачей всей радиоэлектроники. Ее решение позволит создать новую техническую базу для изготовления многочисленной радиоэлектронной аппаратуры. Для вычислительной техники появится возможность массового выпуска недорогих универсальных вычислительных машин, предназначенных для решения задач средней трудности, и существенно увеличить общую мощность парка ЭВМ. Возникнет также реальная возможность построения большого парка специализированных ЭВМ для решения типовых задач. Это направление, по-видимому, сможет конкурировать с применением универсальных ЭВМ и ВС. Заметим, что построение специализированных ЭВМ на существующей технической базе приводит к неоправданным затратам сил и средств.

Последняя проблема - автоматизация процессов проектирования и изготовления ВС - является для настоящего времени наиболее важной. Ее значение далеко выходит за рамки вычислительной техники. На этой основе могут проектироваться и изготавливаться радиоэлектронные приборы. Многие вопросы, например, оптимальное расположение элементов, оптимальная конфигурация связей между ними, выбор рабочей точки с учетом разброса и изменения во времени параметров деталей с целью достижения максимальной надежности, моделирование работы сложной системы на ЭВМ и многие другие являются общими. С ними придется сталкиваться при проектировании не только электронных приборов, но и сложных машин и установок, самолетов, судов, промышленных и жилых зданий и т.п. Автоматизация процессов проектирования тесно связана с методами автоматизации научных исследований, успешное ее решение позволит провести на более высоком уровне работы по другим проблемам. С этой точки зрения пятая проблема является ключевой.

Конкретную реализацию создания ВС наиболее целесообразно проводить так, чтобы возможно раньше получить практические результаты. Этому условию отвечает, например, следующий вариант плана работы:

1 этап. Создание ВС путем объединения некоторого числа существующих типов ЭВМ с целью моделирования процесса решения задач на ВС. Подобное объединение несомненно представляет и практический интерес.

2 этап. Автоматизация изготовления элементов и блоков ЭВМ на основе применения вакуумного нанесения пленок и соединения элементов в схемы с помощью печатного монтажа. На этом этапе можно надеяться построить ВС производительностью до

10^7 опер/сек при числе электронных машин порядка 100.

3 этап. Автоматизация изготовления элементарных машин в целом и применение печатных схем для выполнения связей между электронными машинами. При этом можно ожидать, что производительность ВС достигает 10^8 опер/сек при числе электронных машин около 10^3 .

4 этап. Построение вычислительной системы миллиардного диапазона (выше 10^9 опер/сек) на основе изготовления ВС в едином полностью автоматизированном технологическом процессе.

Создание ВС является весьма сложной задачей, которую можно решить только при условии концентрации усилий больших научных, проектных и производственных коллективов, работающих в области кибернетики, физики, радиоэлектроники, химии, вакуумной техники, технологии производства ЭВМ и др.

В методологическом отношении успех решения проблемы в целом зависит от широкого применения ЭВМ на всех стадиях работы и от сочетания физического эксперимента с математическими методами, особенно с методами моделирования.

В заключение еще раз отметим, что переход от отдельных ЭВМ к вычислительной системе является наиболее реальным путем повышения производительности ЭВМ. В ходе работ над вычислительной системой будет решен ряд проблем, которые сами по себе могут сыграть большую роль в развитии науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современное состояние вычислительной техники. Отчет лаборатории Информации Института математики СО АН СССР. Новосибирск, 1962.
2. Берг А.И., Китов А.И., Ляпунов А.А. О возможностях автоматизации управления народным хозяйством. - В сб. "Проблемы кибернетики", вып. 6, 1961, 83-100.
3. Гутенмахер Л.И. Электронные информационно-логические машины. М., Изд-во АН СССР, 1960.
4. Лебедев С.А. Электронные цифровые вычислительные машины.- В сб. "Вычислительная техника и ее применение", 1959, 5-17.
5. Канторович Л.В. Перспективы развития и использования электронных счетных машин. - Математика, ее содержание, методы и значение, 1956, т. II, 382-389.
6. Келдыш М.В., Ляпунов А.А., Шура-Бура М.Р. Математические вопросы теории счетных машин. - Вестник АН СССР, 1956, № II, 16-37.
7. Дородницын А.А. Электронные помощники человека.-"Правда", 10 февраля 1961.
8. Turner B.R., Manos A., Zahdis N. Initial Experience in Multiprogramming on the Lewis Research Center 1103.- Computer 15th Nat. Conf. ACM., August. 1960.
9. Eckert I.P., Chu I.C., Tonik A.B., Schmitt W.F. Design of Univac-Lark system I. - Proc. E.I.C.C. December, 1-3, 1959, pp. 59-65.
10. IBM announces transistorized 7070. - Res. and Engng. 1958, 5, 38.
11. Lehman M. High-Speed digital multiplication. - IRE Trans. on Elektr. Computers, EC-6, 1957, pp. 204-205.
12. Frankovich J.M., Peterson H.P. A functional description of the Lincoln TX-2 Computer. - Proc. WYCC February 26-28, 1957, pp. 146-155.
13. Thornton J.E. and oth. The Univac M-460 Computer. - Proc. WYCC, 1959, pp.50-74.
14. Schmidt W.F., Tonik A.B. Sympathetically Programmed Computers. - Information Processing VI, 1959, pp.344-348.

15. Dunwell S.W. Design objectives for the IBM Stretch computer. - Proc. EJCC, 1957, pp. 20-22.
16. Dreyfuss P. System Design of the Gamma 60. - Proc. WYCC, 1959, pp. 130-132.
17. Beck R.M., Palevsky M. The DDA-Instrum. and Automat., 1958, 2, pp. 1836-1837.
18. Жданов Г.С., Власенко В.И. Счетные методы в рентгенографии и электронная счетная машина "Кристалл". - В сб. "Проблемы физ.химии", вып. I, М., Госхимиздат, 1958, 129-138.
19. Goldstine H.H., Goldstine A. The Electronic Numerical Integrator and Computer (Eniac) - Mathem. Tables and other Aids to Computation, 1946, 15, pp. 97-110.
20. Базилевский Ю.Я. Универсальная электронная вычислительная машина "Стрела". - Приборостроение, 1957, 3.
21. Zivesley R.K. The analysis of large structural systems. - The Computer Journal, 1960, v.3, 1, pp. 34-39.
22. Connoly T.A. Automatic System and logical Design Techniques for the RW-33 Computer System. - IRE Intern. Convent. Rec. 1960, v.8, P.2, pp. 124-133.
23. First computer-designed computer developed by Bell Laboratories. - Bell labs Rec., 1961, 2, p. 70.
24. Иванов Л.Ф., Филинов Е.Н. Устройства контроля для изготовления и наладки ферритовой памяти. - В сб. "Цифровая техника и вычислительные устройства". М., Изд-во АН СССР, 1959, 28-41.
25. Cryogenic Memory Plane Automatically Produces. - Proc. Engineering, 1960, 31, 53, p. 19.
26. Gulays S. New Design Concepts in printed Circuits. - Electronics, 1961, 34, 11, pp. 74-75.
27. Keit H.A. The polymorphic principle in data processing. - IRE WESCON Convent. Rec., 1960, 4, pp. 24-28.
28. Paulson R.L. The second phase of computer problems, - J.Mach. Account, 1960, 4, pp. 14-21.
29. Зимин В.А. Электронные вычислительные машины. М., Машгиз, 1962.
30. Вычислительные машины (СЭАК и ДИСЭАК). М., Машгиз, 1958.
31. Abeyta J., Borgini F., Crosby D.R. A computer Subsystem Using Kilomegacycle Subharmonic Oscillators. - Proc. IRE, 1961, 1, pp. 128-135.

32. Rajchman I.A. Computer Memories. A survey of the State-of-the-Art. - Proc. IRE, 1961, I, pp.104-127.
33. Project Tinkertoy. NBS.-Technical News Bulletin, Nov. 1953, pp. 161-170.
34. Danko. The Micro-module: A logical Approach to Microminiaturization. - Proc.Inst.Rad.Eng., 1959, 5, pp. 894-903.
35. Klass. Space to spark Avionics Revolution. - Aviation Week, Juny 1958, 16, p. 248.
36. Keonjian E. Mikrominiatur Electronic Circuitry for Space Guidance.-IRE Wescon Convent.Record, pp.92-99.
37. New Molecular Electronics. - Electronics, 1959, 12,6,p.43.
38. Kilby L.S. Semiconductor Solid Circuits. - Electronics, 1959, 7, 8, pp.110-111.
39. Авендеч Г. Микроминиатюризация и молекулярная электроника. ГРЭС, Перевод П-8962.
40. Микромодули и перспективы их развития. ГРЭС, Перевод П-8050.
41. Flynt W.E., Varo Manufacturing Co.-Research on an Ion Beam Deposition System for Microcircuit Fabrication.
42. Wehe H.G. Bell telephone Laboratories. - Electron Beams in Recording.
43. Ogilvie R.E. Massachusetts Institute of Technology. - Electron Beams in Analytical Work.
44. Wells O. Westinghouse Research Laboratory. - Electron Beams in Microelectronics.
45. Бейкиш Р. Электронный луч как технологическое средство. - Электроника, 1961, 30, 13-19.
46. Unger S.H. Pattern recognition and detection. - Proc.IRE, October, 1959, 47, pp. 1737-1752.
47. Holland J.H. A universal computer capable of executing an arbitrary number of subprogramms simultaneously - Proc. EJCC, December 1-3, 1959, pp. 108-113.
48. Holland J.H. Iterative circuits Computers. - Proc. EJCC, 1960, pp.259-265.
49. Leiner A.L., Alexander S.N. System organization of the Dyseac. - IRE. Trans.on Electr.Comput. EC-3, March, 1954, pp. 1-10.
50. Leiner A.L., Notz W.A., Smith I.L., Weinberger A. Pilot-a new multiple computer System. - J.ACM., July 1959, 6, pp. 313-335.

51. Heckelman T.J., Lazinski R.H. Information handling in the defence communications control complex. - Proc. EYCC, December 12-14, 1961, pp. 241-256.
52. Wier I.M. Digital communication techniques. - Proc. IRE, 1961, 1, pp. 196-209.
53. Fenimore G.E. Real-time Data processing for CAA airtraffic control. - Proc. EYCC, December 9-13, 1957, pp. 169-172.
54. Everett R.R., Zraket C.A., Benington H.D. SAGE—a data processing system for air defence. - Proc. EYCC, December 9-13, 1957, pp. 148-155.
55. Вольтский В.А., Бухман В.Е. Модели для решения краевых задач. М., Физматгиз, 1960.
56. Тетельбаум И.М. Электрическое моделирование. М., Физматгиз, 1959.
57. Калужнин Л.А. Об алгоритмизации задач. - В сб. "Проблемы кибернетики", вып. 2, 1959, 51-67.
58. Ершов А.И. Операторные алгоритмы. - В сб. "Проблемы кибернетики", вып. 3, 1960, 5-48.
59. Wilkes M.V. Micro-programming. - Proc. EYCC, December 3-5, 1958, pp.18-20.
60. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л., Изд-во ЛГУ, 1939.
61. Беллман Р. Динамическое программирование. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
62. Канторович Л.В. О перемещении масс. - ДАН СССР, 1942, 37, 7-8, 227-229.
63. Канторович Л.В., Гавурин М.К. Применение математических методов в вопросах анализа грузопотоков. - В сб. "Проблемы повышения эффективности работы транспорта", М., Изд-во АН СССР, 1949, 110-138.
64. Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б. Об одном классе задач планирования народного хозяйства. - В сб. "Проблемы кибернетики", вып. 5, 1961, 165-182.

Эдуард Владимирович Евреинов и Юрий Гаврилович Косарев
О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Редактор В.И.Кобкова
Корректор В.И.Данилевская

Подписано к печати 10/У - 62 г. № МНО 1641
Формат бумаги 60x92¹/16. Объем 2,66 п.л. уч.-изд.л. 2,05
Заказ 119. Тираж 400. Цена 21 коп.

Издательство Сибирского отделения АН СССР
Отпечатано в Институте математики СО АН СССР
Новосибирск, 72, Академическая, 43