

САМАЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
МАШИНА *)

Д. Слотник

ЭВМ ИЛЛИАК-4 состоит из 64 независимых вычислительных устройств, которые, работая одновременно, будут в состоянии решать сложные проблемы за доли времени, необходимого для любой другой машины.

ЭВМ ИЛЛИАК-4, работы над которой сейчас близки к завершению, принадлежит к четвертому поколению замечательных машин, разработанных в Иллинойском университете. ИЛЛИАК-1, ламповая машина, построенная в 1952 г., могла выполнять 11 000 арифметических операций в секунду, ИЛЛИАК-2, диодно-транзисторная ЭВМ, созданная в 1963 г., могла выполнять 500 тыс. операций в секунду. Машина ИЛЛИАК-3, начавшая работать в 1966 г., является ЭВМ специального назначения, спроектированной для автоматического просмотра больших количеств визуальных данных. Поскольку эта ЭВМ обрабатывает не цифровую информацию, она не может быть сравнена с предыдущими ЭВМ типа ИЛЛИАК по скорости в терминах числа операций в секунду. ЭВМ ИЛЛИАК-4, использующая последние достижения полупроводниковой технологии, по существу является батареей из 64 подчиненных ЭВМ, способных выполнять от 100 млн. до 200 млн. операций в секунду (рис. 1). Но даже эта базовая производительность, хотя она выше, чем для любой из когда-либо построенных ЭВМ, не выражает настоящих возможностей ИЛЛИАК-4.

В отличие от трех своих предшественниц и всех ЭВМ, находящихся сейчас в продаже и решающих задачи с помощью серий последовательных итераций, ИЛЛИАК-4 разработана для выполнения 64 вычислений одновременно. Для эффективного использования такой структуры вычислений решаемая проблема должна быть «послушна» скорее параллельной, чем последовательной обработке. В действительности задачи этого рода составляют значительную часть общего спектра вычислений, простирающегося от расчетов платежных ведомостей с помощью линейного программирования до моделей общей циркуляции атмосферы, используемых в предсказаниях погоды. Например, типичная задача линейного программирования, которая может занять большую ЭВМ современного поколения на 6—9 часов, могла бы быть решена ИЛЛИАК-4 менее чем за две минуты, т. е. дать сокращение времени по меньшей мере в 200 раз.

Подсистемы для ИЛЛИАК-4 производятся на многих заводах и доставляются в корпорацию «Бароуз» в г. Паоли (Пенсильвания) для окончательной сборки и проверки. Когда через несколько месяцев машина будет готова, она станет доступной с помощью высокоскоростных телефонных

*) D. L. Slotnick, The Fastest Computer, Scientific American 224 (2), 76 (1971). Перевод Г. А. Ососкова.

Автор статьи, профессор Д. Слотник, является директором Центра перспективных исследований в области электронно-вычислительных машин при Иллинойском университете, США.

линий для различных пользователей, включая Вычислительный центр Иллинойского университета.

Предельная скорость работы ЭВМ, основанных на последовательном выполнении операций (рис. 2), определяется скоростью распространения

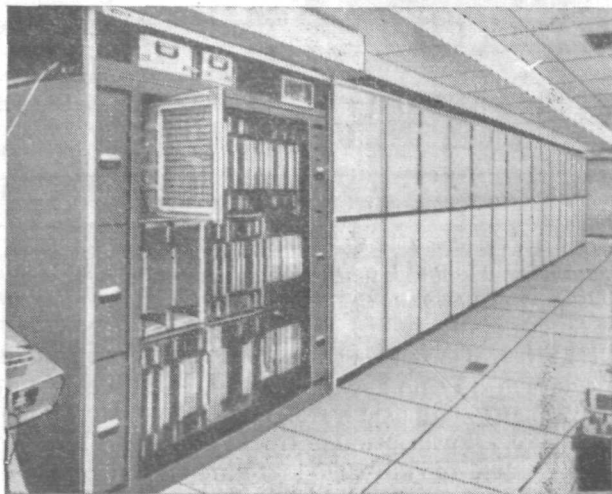


Рис. 1. В лабораториях Грейт-Вэлли фирмы «Бароуз» в г. Паоли (Пенсильвания) вскоре будет введена в строй действующих машин ЭВМ ИЛЛИАК-4.

В отличие от обычных ЭВМ, выполняющих логические и арифметические операции строго последовательно, ИЛЛИАК-4 будет решать сложные задачи методом «всё сразу», координируя одновременную работу 64 подчиненных ЭВМ, являющихся независимыми процессорами. ИЛЛИАК-4 была задумана и разработана в Вычислительном центре Иллинойского университета.

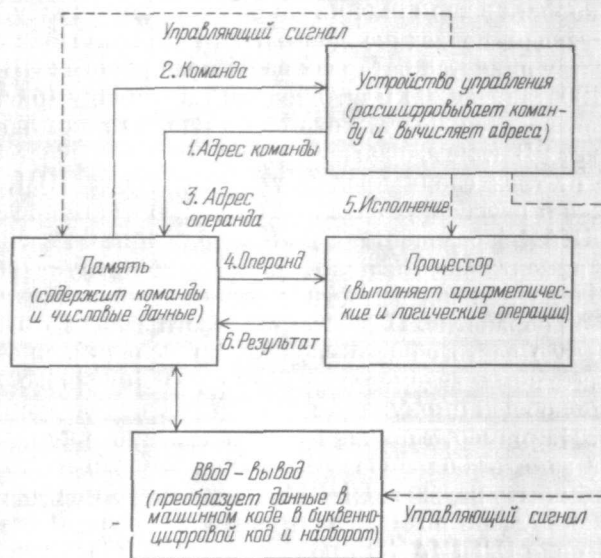


Рис. 2. ЭВМ последовательного действия.

Счетчик устройства управления определяет адрес следующей подлежащей исполнению команды в программе и передает этот адрес в память (1). Память возвращает найденную команду в устройство управления (2). Команда, кроме кода арифметической или логической операции, содержит адрес операнда, т. е. числа, над которым должна быть произведена эта операция. Этот адрес опять посылается в память (3), которая передает найденный по этому адресу операнд в процессор (4). Устройство управления передает затем процессору последовательность электронных сигналов, содержащих микроструктуру арифметической или логической операции, встретившейся в программе (5). Результат вычислений запоминается в указанной ячейке памяти (6) для использования в последующих операциях или преобразования его для выдачи на печать. Наиболее совершенные ЭВМ реализуют все это за несколько миллисекунд. Для решения сложных проблем могут потребоваться миллиарды повторений подобных циклов.

сигнала в электрическом проводнике. На практике это меньше скорости света, проходящего около одного фута (~ 30 см) за одну наносекунду (10^{-9} сек). Хотя интегральные цепи, которые содержат транзисторы, упакованные с плотностью от нескольких сотен до нескольких тысяч на квадратный дюйм ($\sim 6,5$ см²), во многом помогли сократить длину соединений внутри ЭВМ, проектировщики все больше опасаются, что новые способы логической организации потребуют прохождения барьера, установленного скоростью света.

За последние десять лет проектировщики ввели много изменений в строго последовательный порядок операций. Одним из подходов было совмещение во времени работы центрального процессора и работы

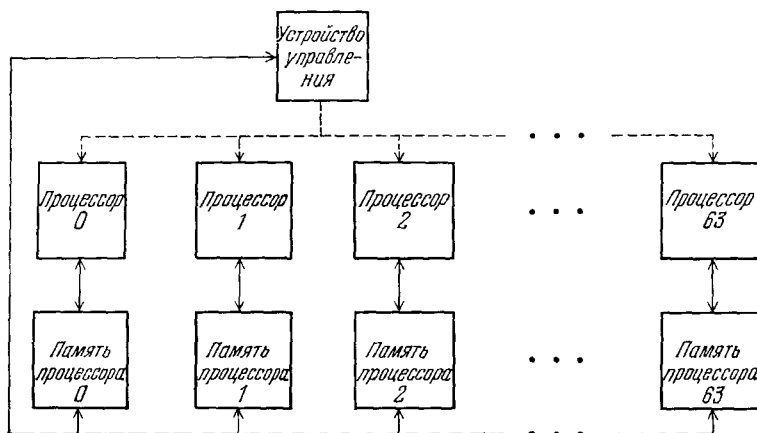


Рис. 3. Параллельная организация ЭВМ ИЛЛИАК-4 позволяет устройству управления руководить операциями 64 процессоров, каждого с его собственной памятью.

Имеется большой класс математических задач, которые могут быть решены по признаку «всё сразу» с помощью независимых процессоров, работающих одновременно и, вдобавок, со скоростью вдвое большей, чем процессор обычной ЭВМ последовательного действия.

устройств ввода-вывода (таких, как магнитофоны и печатающие устройства). Посредством тонко организованного разделения функциональных устройств ЭВМ была достигнута высокая степень совмещения во времени. Предпринимаемые в настоящее время попытки использовать поточную организацию (режим «pipelining») обработки операндов позволят добиться дальнейшего значительного возрастания скорости.

Однако оба метода — и совмещение во времени, и использование «pipelining» — фундаментально ограничены в улучшении скоростных характеристик, которое они могут дать.

Подход, примененный в ИЛЛИАК-4, преодолевает функциональные ограничения в предельной скорости ЭВМ путем допущения — по крайней мере в принципе — неограниченного числа вычислений. Проект ИЛЛИАК-4 был задуман по образцу ЭВМ СОЛОМОН, прототип которой был построен компанией «Вестингауз электрик» в начале 60-х годов. В этом проекте одно главное управляющее устройство посылает инструкции значительному числу независимых процессоров и передает адреса индивидуальным запоминающим устройствам, относящимся к этим процессорам («по-элементно» работающие запоминающие устройства). Таким образом, отдельная последовательность инструкций (программа) управляет некоторым числом процессоров, выполняющих одну и ту же инструкцию одновременно с числовыми данными, которые могут быть (и обычно являются) различными в памяти каждого из процессоров (рис. 3).

Каждый из 64 процессоров ЭВМ ИЛЛИАК-4 — мощное вычислительное устройство со своей собственной автономией (рис. 4). Оно может выполнять много разных арифметических операций над 64-разрядными двоичными числами, в которых цифры могут быть либо 0, либо 1 в соответствии с двумя позициями электронного устройства с двумя устойчивыми состояниями. Эти числа могут быть представлены в любом из шести воз-

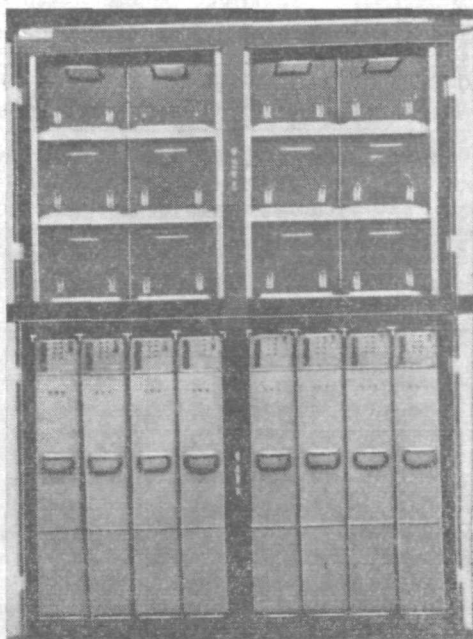


Рис. 4. Через открытые дверцы ЭВМ ИЛЛИАК-4 видны вертикальные стойки восьми из 64 независимых, но централизованно управляемых процессоров.

В двенадцати верхних секциях находятся блоки питания этих процессоров. В нижней части каждого из 16 шкафов, показанных на рис. 1, размещена группа из четырех процессоров.

можных форматов: число может обрабатываться как отдельное 64-разрядное число либо с фиксированной, либо с «плавающей» запятой (в соответствии с положением запятой в десятичной записи числа), либо 64 разряда могут быть разбиты на меньшие числа равной длины. Каждое из запоминающих устройств имеет емкость в 2048 64-разрядных чисел. Время, необходимое для извлечения числа из памяти (время выборки) равно 188 нсек, но из-за необходимости работы дополнительных логических цепей, разрешающих конфликты, когда две или более секций ИЛЛИАК-4 вызывают память одновременно, минимальное время между последовательными обращениями к памяти возрастает до 350 нсек.

Каждый процессор имеет более чем 100 тыс. различных электронных компонентов, собранных в 12 тыс. переключающихся цепей. Процессор вместе с его устройством памяти и соответствующей логикой называется элементарной машиной (ЭМ) *) (рис. 5—7). В системе, содержа-

щей более шести миллионов компонентов, можно ожидать выхода из строя какого-то компонента или линии связи раз в несколько часов. По этой причине много внимания было уделено процедурам проверки и диагностики. Каждая из 64 ЭМ будет регулярно подвергаться автоматической проверке по тестам из дополнительной библиотеки. Если ЭМ не пройдет один из этих тестов, она может быть быстро отключена и заменена с небольшой потерей рабочего времени. Точная причина поломки может быть установлена отдельной диагностической ЭВМ в то время, когда дефектное устройство изъято из рабочего состояния (рис. 8). Как только ошибка найдена и устранена, устройство возвращается в запас.

ИЛЛИАК-4 вообще не мог бы быть сконструирован без помощи других ЭВМ. Две ЭВМ средней мощности В-5500 работали в течение двух лет, готовя схемы для печатного монтажа системы и разрабатывая диагностические и тестовые программы для системной логики и электроники. Эти

*) По терминологии книги Э. В. Евреинова и Ю. Г. Косарева «Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности» (Новосибирск, «Наука», СО, 1966). (Прим. перев.)

трудоемкие работы по проектированию, программированию и исполнению велись под управлением А. Б. Керрола, который в течение этого времени был заместителем главного конструктора проекта.

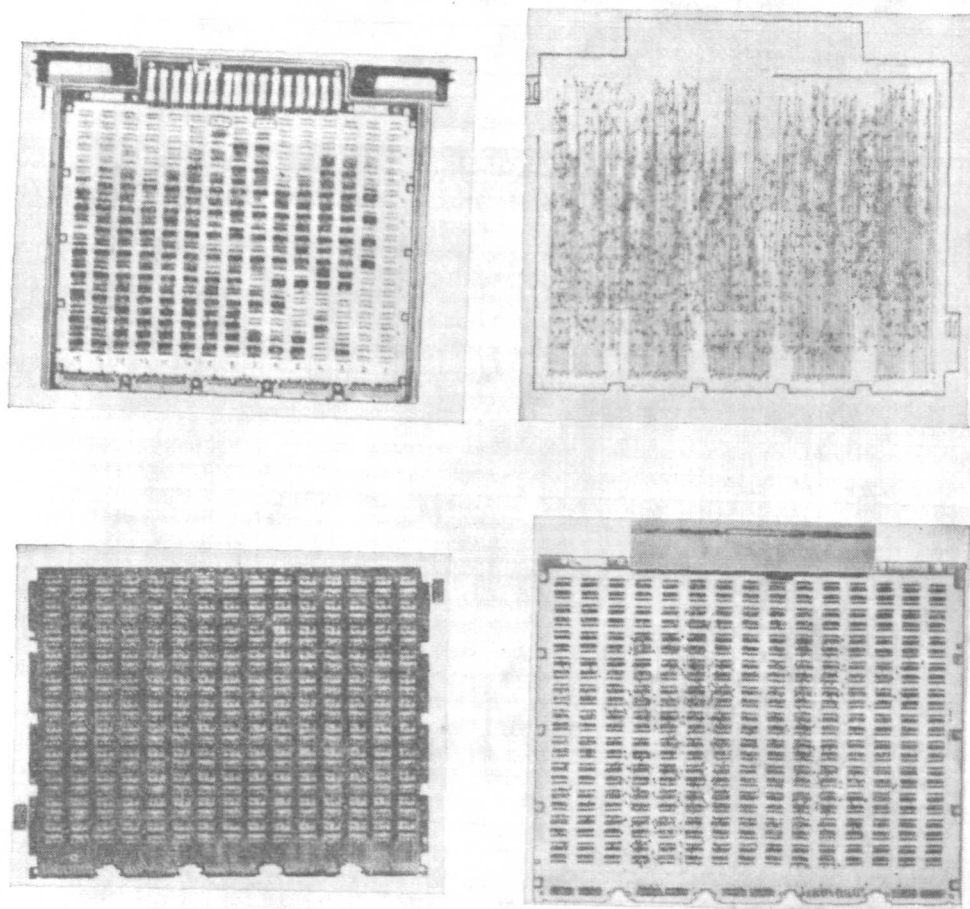


Рис. 5. Ячейка управления (вверху слева) состоит из 12 отдельных слоев, образованных сложной сетью монтажных проводов, соединяющих несколько тысяч электронных компонентов.

На других фотографиях показаны три фотопленки, с помощью которых затем протравливают соответствующий рисунок монтажных соединений на металлизированной (покрытой медью) поверхности слоя. ИЛЛИАН-4 требуются 64 ячейки управления, каждая из которых может быть вынута для проверки или замены.

По ходу вычислений часто необходимо переносить данные из одной ЭМ в другую. Для этой цели предусматриваются каналы данных (рис. 9). При решении некоторых задач эти каналы данных могут быть использованы для непосредственного моделирования геометрической структуры задачи.

Централизованное управление 64 ЭМ могло бы позволить решать только простейшие задачи, не имея ЭМ определенной степени автономии (индивидуального управления). Подобное управление обеспечивается посредством специального «указателя состояния», который может быть установлен каждой ЭМ и зависит от различных значений данных, своих для каждой ЭМ. Программа устанавливает указатель состояния для тех ЭМ, состояние которых (определенное их указателем) позволяет им

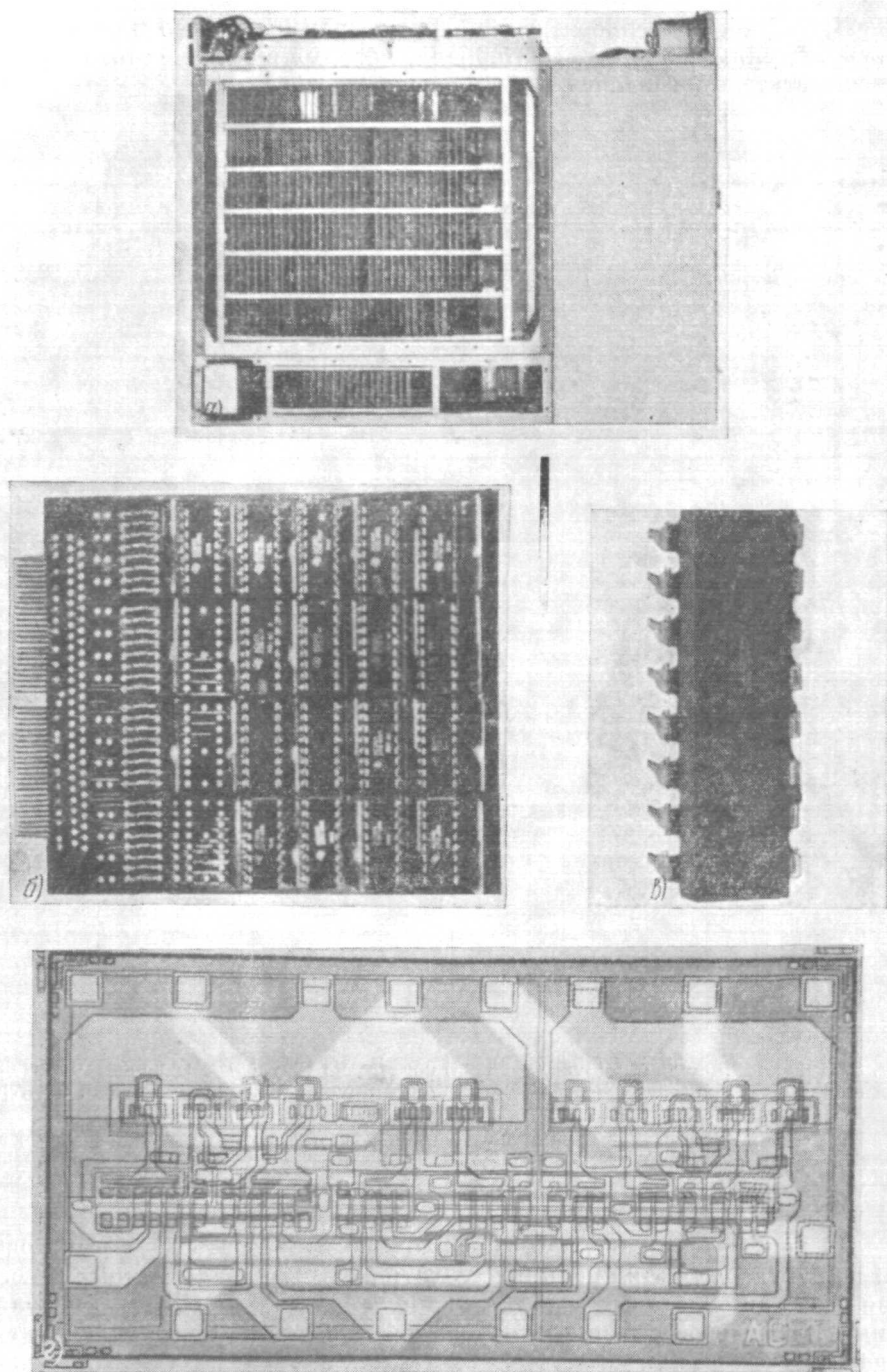


Рис. 6. На рисунке а) показан общий вид одного из 64 процессоров.

Устройство содержит до 210 печатных плат, размещенных в 6 рядов по 35 штук (б). Каждая печатная плата содержит 20 двоянных ячеек (четыре ряда по пять в каждом), а также некоторые другие электронные компоненты, такие как сопротивления. Каждая из двоянных ячеек (а) содержит по 16 разъемов, связанных с интегральными схемами, заключенными в отдельные силиконовые пластины размером $0,095 \times 0,05$ дюйма². На рисунке в) показана такая пластина в 55-кратном увеличении. Она содержит 34 транзистора, составляющих 7 логических схем совпадения. (Интегральные схемы производятся фирмой «Тексэс инструмент». Для 64 процессоров ЭВМ ИЛЛАК-4 потребуется более четверти миллиона таких схем.)

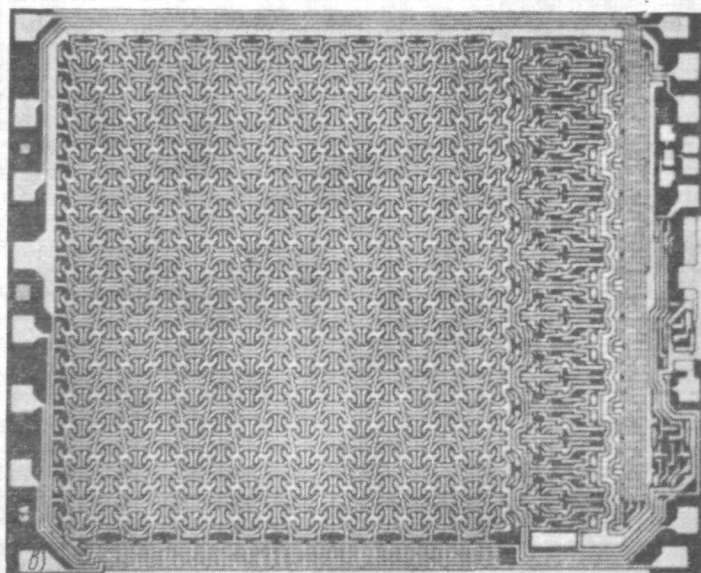
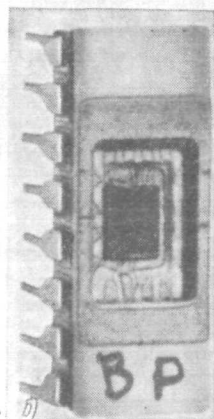
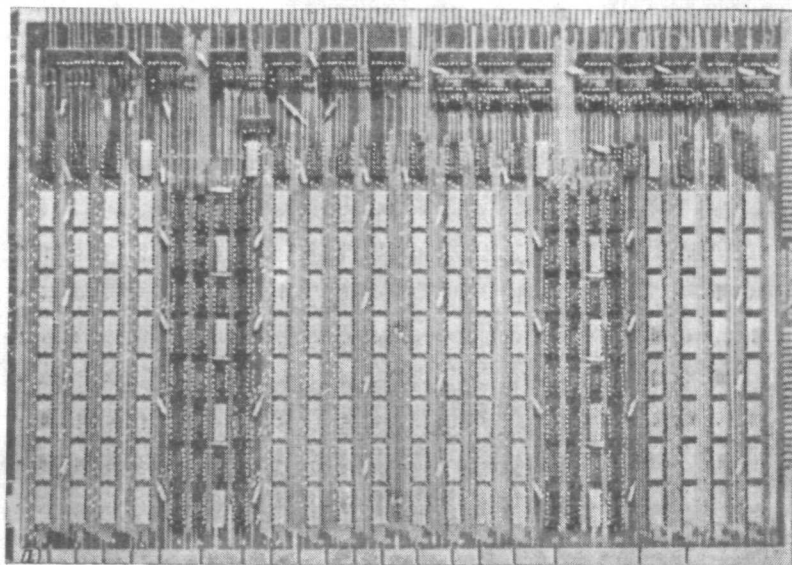


Рис. 7. Панель запоминающего устройства (а), являющаяся одной из четырех панелей, образующих вместе высокоскоростной 131 072-разрядный блок памяти каждой из элементарных машин ИЛЛИАК-4.

Каждая панель вмещает до 128 двоянных ячеек. Каждая двоянная ячейка (б) состоит из одного модуля, а каждый модуль содержит интегральную полупроводниковую схему памяти (в) емкостью 256 разрядов. (Подобные модули, состоящие из 2485 транзисторов, сопротивлений и диодов, производит отдел полупроводников фирмы «Фэйрчайлд камера энд инструмент».)

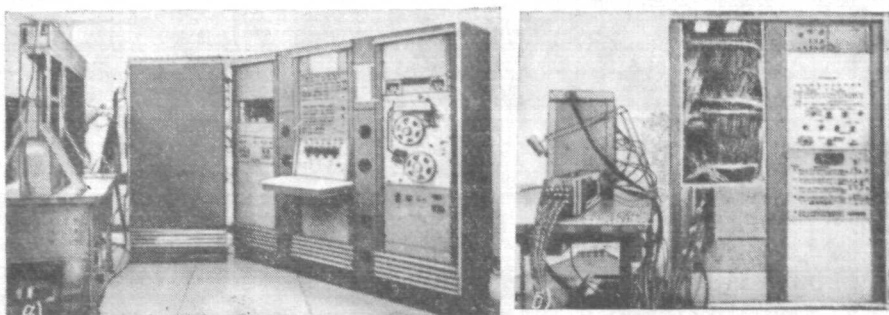


Рис. 8. Диагностическая ЭВМ размещена в стойках, показанных справа на обеих фотографиях.

Когда одна из ЭМ ИЛЛИАК-4 выходит из строя, она немедленно отключается и заменяется резервной. Точная причина ошибки определяется затем с помощью диагностической ЭВМ. Испорченный процессор, отключенный и придвинутый к диагностической ЭВМ, можно увидеть на фотографии а). Дефектное устройство памяти, проверяемое другой диагностической ЭВМ, показано на фотографии б).

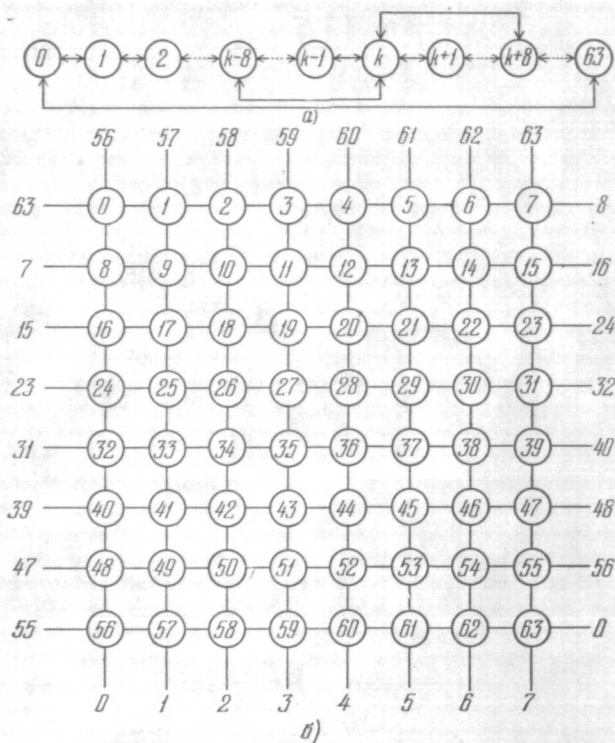


Рис. 9. Множество из 64 процессоров машины ИЛЛИАК-4 может быть связано в сеть любым из двух топологически эквивалентных путей.

ЭМ можно соединить линейно (а), при этом каждая ЭМ соединяется как со своей непосредственной соседкой, так и через 8 элементов. Эквивалентно можно расположить все ЭМ в виде квадратной сети (б), в которой каждый элемент соединен со своими четырьмя ближайшими соседями. Легко представить эту сеть скатанной в цилиндр, так что ЭМ верхнего ряда соединяются непосредственно с ЭМ нижнего ряда. Для образования линейной последовательности осталось соединить последнюю ЭМ каждого ряда с первой в следующем ряду.

реагировать на данную инструкцию или последовательность инструкций. ЭМ, не находящиеся в таком состоянии, «выключены». В качестве простого примера предположим, что в начале задачи все указатели состояния установлены в положение 1, или «включить». Теперь программа требует от устройства управления передать всем 64 ЭМ: проверьте вашу память на наличие X (некоторого определенного числа). Каждая ЭМ осуществляет поиск, и любая из ЭМ, обнаружившая число X , устанавливает свой указатель состояния в положение 0, т. е. «выключить». Устройство управления может теперь выдать последовательность команд для выполнения их

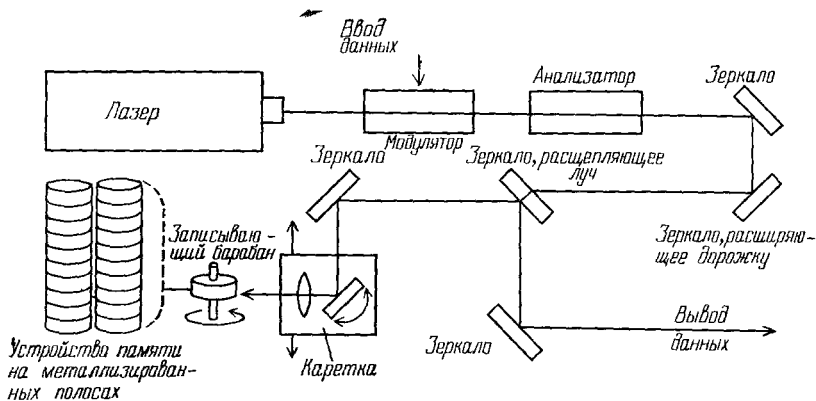


Рис. 10. Архивная память — новый вид внешнего запоминающего устройства высокой емкости, разработанный компанией «Присайжн инструмент».

Луч аргонного лазера записывает данные путем выжигания микроскопических отверстий в тонкой металлической пленке, нанесенной в виде полос на полиэфирный лист, который закреплен на вращающемся барабане. Каждая полоса может запоминать около 2,9 млрд. двоичных разрядов, что эквивалентно 625 стандартным лентам, но составляет менее 1% их объема. Набор 400 таких полос представляет собой запоминающее устройство более чем в триллион двоичных разрядов. Время поиска данных, записанных на какой-то из 400 полос, — около 5 сек. Если полоса известна, то данные с нее могут быть выбраны за 200 мсек. Скорость чтения и записи составляет 4 млн. двоичных разрядов в секунду.

только теми ЭМ, указатели состояния которых равны 1, что позволяет им продолжать выполнять вычисления. Аналогично, содержимое двух регистров внутри ЭМ можно сравнить и указатель состояния может быть установлен в зависимости от результата сравнения. Указатель состояния также можно использовать для определения того, когда последовательные вычисления должны быть окончены или когда некоторые величины превзошли указанный численный предел. Короче говоря, указатель состояния является главным средством для осуществления логической структуры программы в зависимости от данных.

В дополнение к быстрым оперативным запоминающим устройствам каждая ЭМ ИЛЛИАК-4 имеет два устройства памяти, которые являются более медленными, но имеют существенно большую емкость. Общий объем памяти всех 64 ЭМ есть 64×2048 , или 131 072 числа, каждое в 64 разряда длиной. Таким образом, общая высокоскоростная память занимает около 8,4 млн. двоичных разрядов. Большинство же задач, предназначенных для ИЛЛИАК-4, будет требовать запоминания данных в объеме, далеко превосходящем эту оперативную память.

Дополнительные данные могут содержаться либо в памяти на вращающихся магнитных дисках, либо в новой «архивной» памяти, в качестве записывающего механизма которой используется лазерный луч.

Память на дисках имеет емкость в миллиард двоичных разрядов, что примерно в 12 раз превосходит емкость оперативной памяти. Диск имеет 128 дорожек, каждая снабжена собственной головкой для записи и считывания. Время выборки определяется временем, необходимым диску для

поворота в позицию, когда требуемые данные окажутся под одной из фиксированных головок.

Поскольку время оборота диска равно 40 мсек, среднее время выборки несколько меньше 20 мсек, т. е. примерно в 100 тыс. раз медленнее времени выборки оперативной памяти. Однако как только диск повернется в требуемую позицию, данные могут быть переданы любому из 64 оперативных запоминающих устройств со скоростью полмиллиарда двоичных разрядов

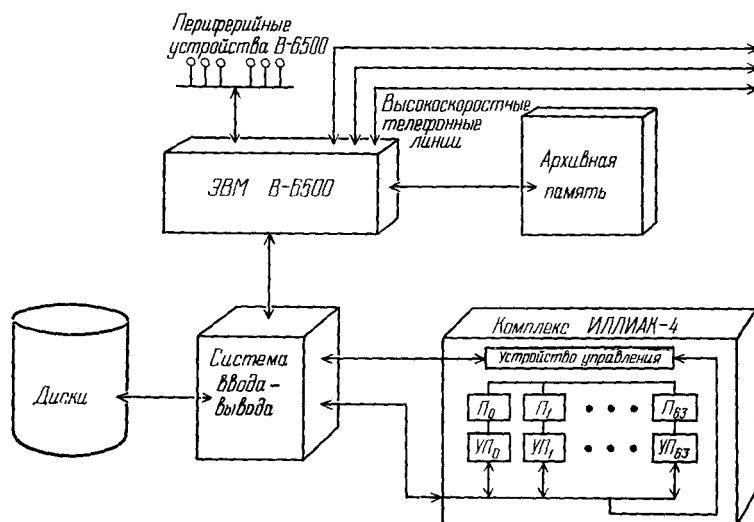


Рис. 11. Блочная диаграмма системы ИЛЛИАК-4 показывает, как устройство управления ИЛЛИАК-4 вместе с его 64 процессорами (П) и их устройствами памяти (УП) будут связаны с остальными частями оборудования.

Вторичная память представляет собой набор дисков емкостью в миллиард двоичных разрядов. «Третичной» памятью является новая архивная память емкостью в триллион бит, доступ к которой осуществляется через ЭВМ средней мощности В-6500.

в секунду, или, грубо говоря, в 100 раз быстрее, чем по стандартному телевизионному каналу. Архивная память, имеющая емкость в триллион двоичных разрядов, обладает более медленным временем выборки и более низкой скоростью передачи данных (рис. 10).

Указанные внешние запоминающие подсистемы вместе с дополнительным набором периферического оборудования (выходной перфоратор, магнитофоны и диски, быстropечатающие устройства, дисплеи и т. д.) находятся под управлением универсальной ЭВМ средней мощности В-6500 фирмы «Бароуз» (рис. 11). Эта ЭВМ также несет главную ответственность за трансляцию программ с различных программных языков, представляемых пользователям на базе аппаратно реализованного языка самой ЭВМ.

Посмотрим теперь, как можно использовать ИЛЛИАК-4 для решения одной упрощенной задачи математической физики. Задача принадлежит к очень широкому классу задач, расчеты которых могут быть выполнены методом «всё сразу», используя либо обычные дифференциальные уравнения, либо уравнения в частных производных. Задача, которую мы рассмотрим, требует решения лапласовых дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих распространение тепла по поверхности толстой пластины. Читатель, даже незнакомый с подобными уравнениями, сможет следовать этому изложению, поскольку метод нахождения решения

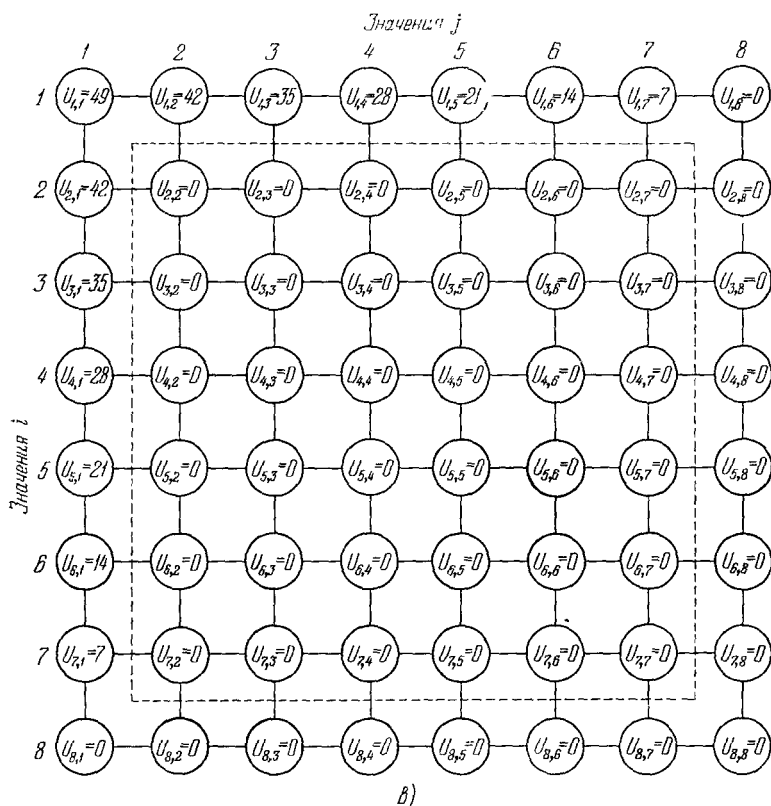
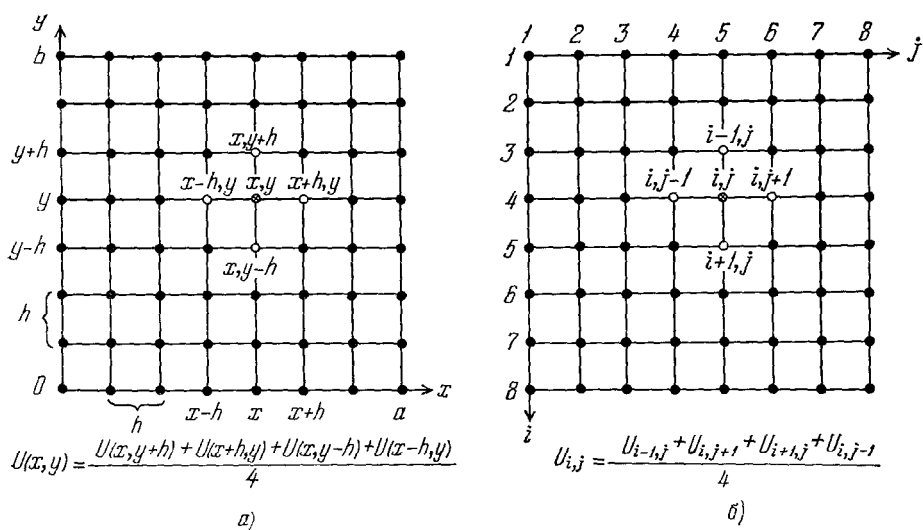


Рис. 12. Задача о распространении тепла в толстой пластине должна быть соответствующим образом подготовлена для решения ее на ЭВМ путем разбиения поверхности пластины на множество точек с некоторым расстоянием (h) между ячейками образовавшейся сети.

Различные этапы процесса релаксации в сравнении для последовательного и параллельного метода
(точные значения температуры в установившемся режиме даны на рис 13)

Последовательный метод										Параллельный метод										
		Значения t										Значения t								
		1	2	3	4	5	6	7	8			1	2	3	4	5	6	7	8	
Одна релаксация	Значения t	1	49	42	35	28	21	14	7	0	Значения t	1	49	42	35	28	21	14	7	0
		2	42	21,00	14,00	10,50	7,88	5,47	3,12	0		2	42	21,00	8,75	7,00	5,25	3,50	1,75	0
		3	35	14,00	7,00	4,38	3,06	2,13	1,31	0		3	35	8,75	0	0	0	0	0	0
		4	28	10,50	4,38	2,19	1,31	0,86	0,54	0		4	28	7,00	0	0	0	0	0	0
		5	21	7,88	3,06	1,31	0,66	0,38	0,23	0		5	21	5,25	0	0	0	0	0	0
		6	14	5,47	2,13	0,86	0,38	0,19	0,11	0		6	14	3,50	0	0	0	0	0	0
		7	7	3,12	1,31	0,54	0,23	0,11	0,05	0		7	7	1,75	0	0	0	0	0	0
		8	0	0	0	0	0	0	0	0		8	0	0	0	0	0	0	0	0
10 релаксаций	Значения t	1	49	42	35	28	21	14	7	0	Значения t	1	49	42	35	28	21	14	7	0
		2	42	35,37	29,01	22,90	17,03	11,31	5,66	0		2	42	34,27	27,05	20,53	14,81	9,60	4,74	0
		3	35	29,01	23,41	18,24	13,44	8,88	4,44	0		3	35	27,05	19,87	14,08	9,48	5,90	2,83	0
		4	28	22,90	18,24	14,05	10,26	6,75	3,38	0		4	28	20,53	14,08	9,06	5,62	3,22	1,49	0
		5	21	17,03	13,44	10,26	7,44	4,88	2,44	0		5	21	14,81	9,48	5,62	3,09	1,61	0,69	0
		6	14	11,31	8,88	6,75	4,88	3,19	1,60	0		6	14	9,60	5,90	3,22	1,61	0,73	0,28	0
		7	7	5,66	4,44	3,38	2,44	1,60	0,80	0		7	7	4,74	2,83	1,49	0,69	0,28	0,10	0
		8	0	0	0	0	0	0	0	0		8	0	0	0	0	0	0	0	0
50 релаксаций	Значения t	1	49	42	35	28	21	14	7	0	Значения t	1	49	42	35	28	21	14	7	0
		2	42	36,00	30,00	24,00	18,00	12,00	6,00	0		2	42	35,98	29,96	23,96	17,96	11,96	5,98	0
		3	35	30,00	25,00	20,00	15,00	10,00	5,00	0		3	35	29,96	24,94	19,92	14,92	9,94	4,96	0
		4	28	24,00	20,00	16,00	12,00	8,00	4,00	0		4	28	23,96	19,92	15,90	11,90	7,92	3,96	0
		5	21	18,00	15,00	12,00	9,00	6,00	3,00	0		5	21	17,96	14,92	11,90	8,90	5,92	2,96	0
		6	14	12,00	10,00	8,00	6,00	4,00	2,00	0		6	14	11,96	9,94	7,92	5,92	3,94	1,95	0
		7	7	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00	0		7	7	5,98	4,96	3,96	2,96	1,96	0,98	0
		8	0	0	0	0	0	0	0	0		8	0	0	0	0	0	0	0	0

полностью основан на обыденном замечании, что температура в любой точке пластины стремится принять значение, среднее по отношению к значениям температуры в точках, ее окружающих.

Уравнение Лапласа для решения задачи имеет вид

$$(\partial^2/\partial x^2) U + (\partial^2/\partial y^2) U = 0,$$

где U соответствует температуре в данной точке на поверхности пластины с координатами x и y . В нашем примере мы предлагаем вообразить, что имеем дело с прямоугольной пластиной из некоторого вещества, на четырех краях которой поддерживаются различные температуры. В конце

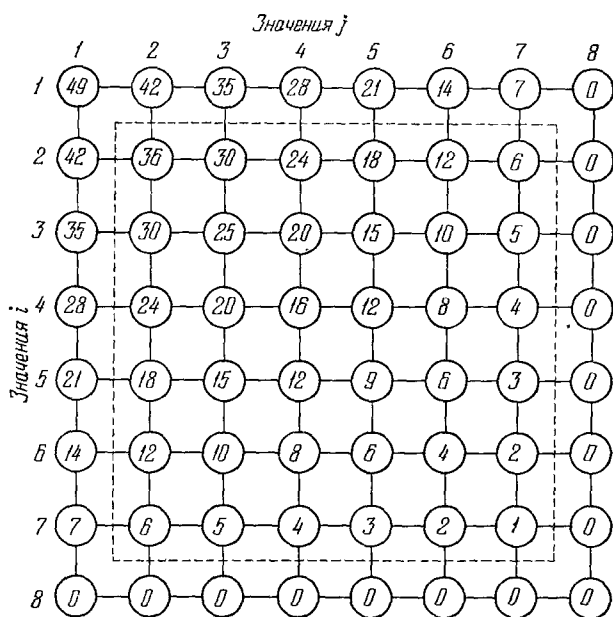


Рис. 13. Точные значения температуры в установившемся режиме.

концов все точки поверхности пластины достигнут некоторого стабильного распределения температуры, отражающего путь, по которому тепло идет от более горячих краев к более холодным. Постоянно поддерживаемые значения температуры на краях плиты называются граничными условиями. Если мы используем координатную систему x, y для определения положения каждой точки на поверхности пластины, то можем сказать, что температура в каждой точке есть функция x и y . Другими словами, каждой точке (x, y) на пластине ставится в соответствие температура $U(x, y)$.

При решении этой задачи на цифровой ЭВМ нельзя, конечно, получить температуру в бесконечном множестве точек. Стандартной процедурой является дискретизация переменных x и y , так что пластина покрывается сеткой с ячейками, являющимися квадратами со стороной в h единиц. Для простоты будем полагать, что наша пластина также квадратна и разбита на сеть из 64 точек (x, y) или узлов сетки (рис. 12). Целью рис. 12, а также таблицы и рис. 13 является сравнение того, как подобная задача может быть решена последовательным методом на обычной ЭВМ и параллельным методом, используемым машиной ИЛЛИАК-4.

Решая подобную задачу, можно представить, что вдоль краев пластины поддерживается некоторое фиксированное распределение температуры.

От ЭВМ требуется вычисление температуры в сети внутренних точек после того, как наступит равновесное состояние. На рис. 9 были показаны два метода связывания точек в сети. На рис. 12, а представлен наиболее употребительный метод, использующий выражение каждой точки через x и y . Температура в любой точке (x, y) является средним значением температур четырех ближайших к ней точек сети. Уравнение определяет температуру в этих точках как функцию x, y и расстояний h между узлами сетки. При программировании на ЭВМ для определения точки более удобно использовать целые индексы i и j . В этом случае тепловое уравнение может быть переписано в виде, указанном на рис. 12, б. Значения температуры в 28 точках на периметре пластины известны и должны быть заранее введены в память ЭВМ (см. рис. 12, в). Температура в 36 внутренних точках неизвестна. В приводимом примере температура всех точек нижнего и правого краев пластины поддерживается равной 0° . Значения температуры верхнего и левого краев меняются от точки к точке, но все граничные значения не меняются во время процесса вычисления. Начальные значения температуры в 36 внутренних точках принимаются равными нулю.

Метод решения теперь можно сформулировать очень просто: температура в каждом внутреннем узле равна среднему значению температур в четырех ближайших узлах. Таким образом, значение $U(x, y)$ равно сумме четырех соседних значений $U(x, y)$, деленных на 4. Когда это уравнение будет выполнено для всех точек, мы будем иметь только одно правильное значение для каждой точки. Этот метод называется «релаксацией». При применении метода релаксаций на ЭВМ последовательного действия обычно начинают сверху, слева пластины и прилагают основное уравнение в каждой внутренней точке, двигаясь слева направо вдоль каждой строки (горизонтального ряда) сеток, ряд за рядом вниз. Поскольку 28 граничных точек в нашем примере уже определены, уравнение должно быть применено 36 раз (64 минус 28) для выполнения одной релаксации в методе релаксаций. При выполнении последовательных релаксаций на множестве узлов значения температуры будут сходиться к точному решению. Когда значения двух последовательных релаксаций станут очень близки друг к другу (внутри указанного допуска ошибок), процесс останавливают и говорят, что было достигнуто решение для установившегося состояния.

При последовательном решении задачи ЭВМ начинает с верхней левой внутренней точки $U_{2,2}$ и вычисляет ее значение, используя заданные числа: $U_{2,2} = (U_{1,2} + U_{2,3} + U_{3,2} + U_{2,1})/4 = (42 + 0 + 0 + 42)/4 = 21$. Далее ЭВМ вычисляет значение $U_{2,3}$, используя *новое*, только что полученное значение $U_{2,2}$, равное 21 (вместо начального 0): $U_{2,3} = (U_{1,3} + U_{2,4} + U_{3,3} + U_{2,2})/4 = (35 + 0 + 0 + 21)/4 = 14$. Аналогично проводятся вычисления для остальных 34 внутренних точек при использовании на каждом шаге счета всех новых значений, вычисленных уже перед этим. Такая последовательность 36 вычислений называется одной «релаксацией» в методе релаксаций. В случае же, когда задача решается на ИЛЛИАК-4, вычисления для 36 внутренних точек могут быть проделаны одновременно, каждое на отдельной ЭМ. В этом методе первая релаксация будет состоять из 36 одновременных вычислений, использующих *только* начальные значения температуры. Таким образом, первое вычисление для $U_{2,3}$ даст $(35 + 0 + 0 + 0)/4 = 8,75$ вместо значения 14, полученного в методе последовательных вычислений. Последующие одновременные релаксации, однако, могут использовать значения, полученные перед этим.

Программу можно написать теперь так, чтобы вычислять значения $U(x, y)$ не от верхнего левого к нижнему правому углу, но все сразу. В то время как множество значений после первой релаксации для

всех 36 внутренних точек получено при одновременных вычислениях, эти значения уже готовы для второй релаксации. При последовательном или параллельном вычислении отличаются не только два алгоритма или математические подпрограммы, но также различны и скорости сходимости температуры (см. таблицу и рис. 13). В последовательном методе температура внизу справа сходится к точному решению скорее, чем вверх слева. Это происходит потому, что при проходе из левого верхнего угла в нижний правый последние вычисления в каждой релаксации содержат больше новых данных, чем вычисления, сделанные в начале последовательности релаксаций.

В таблице можно видеть, что последовательная ЭВМ после одной релаксации получит значения 21 и 14 для точек $U_{2.2}$ и $U_{2.3}$ соответственно, после 10 релаксаций эти значения будут соответственно равны 35,37 и 29,01, а после 50 релаксаций достигнут своих точных значений 36 и 30. Используя параллельные релаксации, ИЛЛИАК-4 будет осуществлять сходимость к точному решению существенно различным образом. После 10 релаксаций для тех же $U_{2.2}$ и $U_{2.3}$ будут соответственно получены значения 34,27 и 27,0. Однако результат 50 релаксаций будет практически таким же, как и для последовательных релаксаций. Для данной конкретной задачи параллельный метод требует времени на несколько релаксаций больше, чем последовательный, для получения сравнимых результатов. Однако ЭВМ ИЛЛИАК-4 будет иметь возможность выполнить 36 полных релаксаций быстрее, чем последовательной ЭВМ нужно для выполнения одной последовательной релаксации.

При использовании параллельного алгоритма значения, более близкие к краям, сходятся быстрее, чем в центре сетки. Причина в том, что внешние значения ближе к граничным и при каждой итерации на них действует больше новых данных, чем на внутренние значения. Процесс сходимости может быть уподоблен замерзанию. Последовательный алгоритм начинает «замерзание» снизу справа и продолжает налево вверх. Параллельный алгоритм начинает «замораживать» с краев и продолжает к центру.

Экономия времени при параллельном алгоритме по сравнению с последовательным зависит от числа итераций, необходимых для достижения сходимости. Если оба алгоритма требуют того же числа итераций и в обоих случаях вычисляется одно и то же число внутренних значений P (в предыдущем примере это было 36), то параллельный процесс идет быстрее в P раз. Однако поскольку параллельный процесс использует меньше информации для каждой итерации, необходимо больше параллельных итераций для получения той же самой степени точности, что и при последовательных вычислениях. Если принять во внимание, что ИЛЛИАК-4 имеет 64 канала параллельной обработки, он будет не менее чем в 64 раза быстрее последовательной ЭВМ со сравнимой скоростью работы. Это преимущество в общей скорости значительно перевешивает те несколько дополнительных итераций, которые необходимы для получения решения с точностью, что и при последовательной обработке.

Читатель может, конечно, спросить в этом месте: «А для каких целей может быть применена ЭВМ столь большого размера и так ли уж это необходимо?» Или он может задать вопрос более резко: «Разве в самом деле необходимо тратить сумму в 30 млн. долларов из общественных фондов в наше время, когда их и так не хватает?» Каждый из нас должен определить ответ для самого себя после проверки потенциального значения машины. Позвольте нам тем не менее рассмотреть некоторые из приложений.

Среди задач, предназначенных для ИЛЛИАК-4, имеется линейное программирование — математическая техника для распределения ограниченных ресурсов так, чтобы при этом получить максимум или минимум определенной целевой функции. Ограничения (связи) на ресурсы накладываются в виде линейных неравенств, в которых переменными являются величины ресурсов. Оптимизируемый показатель определяется как линейная функция от этих переменных. Типичные задачи линейного программирования, решаемые на ЭВМ, охватывают сотни и тысячи переменных. Примерами могут являться планирование перевозок для минимизации общего пути или максимизация объема перевозок на 1 км пути; определение оптимальных способов раскроя, которые давали бы минимум затрат или максимум выхода; отбор методов производства, минимизирующих стоимость или максимизирующих объем продукции; написание графика производства во времени, дающего минимум задержек или максимальный поток продукции. ИЛЛИАК-4 сможет решить в разумное время задачи, значительно более сложные, чем это удавалось раньше. Эта ее способность вытекает из использования параллельных вычислений и высокой скорости передачи данных запоминающих дисков.

Указанную задачу линейного программирования с 4 тыс. уравнений связи и 10 тыс. переменных ИЛЛИАК-4 могла бы решить менее чем за две минуты (та же задача потребовала бы от шести до восьми часов на ЭВМ нынешнего поколения).

Задачи такого порядка трудности активно изучаются сейчас в Иллинойском университете под руководством Я. В. Марсо. Сюда относятся задачи оптимизации производства сельскохозяйственного сектора экономики как для отдельных больших областей страны, так и в общенациональном масштабе. Целевые функции будут отражать национальную политику и будут охватывать диапазон от производства продуктов питания, достаточного, чтобы прокормить данную популяцию, до выращивания урожая на экспорт так, чтобы развивающиеся страны могли получать кредиты в порядке внешних обменов. Ресурсы, подлежащие планированию, включают землю, труд, технику, удобрения, ядохимикаты, гербициды, зернохранилища и деньги. Как это было продемонстрировано Марсо, модели линейного программирования для области или страны могут также учитывать связи, включающие социальные издержки, например вред, причиняемый неумеренным употреблением азотных удобрений, использованием некоторых ядохимикатов (таких, как ДДТ) или такой обработки земли, вредный эффект которой для плодородия проявляется через длительное время.

Следует указать, что для применения линейного программирования к целому сектору экономики необходимы значительные затраты по собиранию данных для их использования в модели. Однако и здесь ЭВМ может помочь, делая экспериментальные прикидки и оценивая точность, с которой должны быть известны различные используемые данные, чтобы обеспечить ответ с заданным уровнем точности. Также возможны моделирование на ЭВМ альтернативных методов и оценка их эффекта для производительности сельского хозяйства. Непосредственная проверка таких методов в жизни может оказаться очень дорогостоящей. Собственно, не существует причин, по которым ЭВМ нельзя было бы использовать в качестве подопытной белой мыши или морской свинки для проверки предлагаемого средства решения социальной проблемы.

Еще одно приложение, предназначенное для ИЛЛИАК-4, — это учреждение реестра природных ресурсов для их использования районными и областными планировщиками. В настоящее время в Иллинойском университете в кооперации с Северовосточным центром службы природных

богатств Иллинойса создается информационная система природных ресурсов.

Фондом Форда выделены средства для начальных исследований и программы разработок. Система будет содержать широкий диапазон сведений о природных ресурсах выбранной области: геологических, гидрологических, лесных и растительных, климатических, топографических, характеристиках почвы и текущего использования земель. Для пионерского исследования был выбран церковный приход Маренго земли Мак-Генри в Иллинойсе. Система спроектирована так, чтобы ее легко было эксплуатировать любым пользователем, желающим принять решение (включая индивидуальных налогоплательщиков), независимо от его технического или административного умения. Например, некое лицо может пожелать узнать, стоит ли ему проводить какое-то хозяйственное переустройство (построить теннисный корт или пруд для разведения рыбы) на его земле. С другой стороны, может быть, что местные власти ищут лучшее место для нового госпиталя. Поиск места для госпиталя может быть переформулирован в серию команд для ввода в ЭВМ, например — найти все площади, которые лежат между городом *A* и городом *B* и входят в полосу в пределах двух миль от дороги *C*. Место должно быть не меньше пяти акров и не больше 25 акров со следующими характеристиками:

- 1) один акр почвы, способной выдержать пятиэтажный госпиталь с градиентом меньше 8% и незатопляемый;
- 2) по крайней мере четыре акра (для автостоянки), которые могли бы быть покрыты асфальтом без нарушения стабильности подземных вод;
- 3) деревья не моложе 20 лет.

Если не существует участков, удовлетворяющих всем этим требованиям, можно опустить одно или несколько менее важных условий, пока нужное место не будет найдено.

Выдача информационной системы рассчитана на три уровня использования. Простейший уровень будет состоять из выдачи ЭВМ (листинга) краткой сводки результатов. Следующий уровень будет интерпретацией процесса поиска ЭВМ на языке, который должен быть ясен любому образованному неспециалисту. Третий уровень будет подробным техническим описанием, пригодным для использования специалистом — геологом или экологом.

Целью информационной системы является сокращение процесса планирования и обоснование качества решения. Хотя система будет использовать существующие методы поиска информации, ИЛЛИАК-4 с его скоростью и архивной памятью будет способен анализировать хранящуюся информацию гораздо глубже, чем это было бы возможно для любой из прежних ЭВМ.

Наши ограниченные интеллектуальные возможности не были в состоянии дать удовлетворительное решение проблем крупномасштабного планирования типа только что описанных.

В действительности очевидно, что мы постоянно сталкиваемся с результатами социального вырождения из-за фрагментарного планирования — и непланирования — в обеих этих сферах. Рационалистическое общество XX (или XXI) века не появится по одной только воле божией!

Другим предназначением ИЛЛИАК-4 является предсказание погоды расчетным путем, которое прежние теоретики вычислительных машин, такие как Дж. фон Нейман, рассматривали как один из важнейших мотивов работы ЭВМ. Вычислительные методы, развитые за два прошедших десятилетия, используются ныне ежедневно и дают хорошие результаты в прогнозе на период от 24 до 48 часов. Эти методы включают числовое

моделирование комплекса атмосферных процессов с помощью математической модели, объединяющей обширные сведения о происходящих физических процессах со сложнейшей математикой и передовой вычислительной техникой.

Физической основой всех методов численного моделирования атмосферы является закон сохранения массы, момента и энергии. Эти принципы сохранения воплощены в системах дифференциальных уравнений (уравнение Лапласа является одним из примеров дифференциального уравнения, описывающего распространение тепла в толстой пластине), которые не могут быть решены без ЭВМ. Физические масштабы атмосферных явлений, моделируемых с помощью ЭВМ, простираются от микрофизических процессов в облаках до континентальных перемещений фронтальных систем.

На верхнем конце физической шкалы находится модель общих циркуляций, описывающих атмосферу как тепловую машину, приводимую в движение Солнцем.

Сложность этих моделей можно проиллюстрировать на рабочей модели атмосферы, используемой национальной службой погоды в ее ежедневных прогнозах. Атмосфера северного полушария представляется в виде шести горизонтальных слоев, простирающихся от уровня моря до стратосферы. Каждый слой состоит из 3000 точек, в которые подставлены начальные значения скорости ветра, температуры и давления. ЭВМ применяет затем подходящие уравнения для вычисления скорости, температуры и давления в будущем через 10-минутные интервалы. 24-часовой прогноз требует около одного часа машинного времени на ЭВМ, которая может выполнять 300 тыс. операций в секунду или более миллиарда команд всего. Если расстояние между точками сетки потребуется сократить вдвое, то число узлов сетки возрастет в квадрате, а машинное время, необходимое для 24-часового прогноза, должно было бы возрасти в 8 раз. Другими словами, треть дня было бы израсходовано ради предсказания погоды через 24 часа.

Если модель дает значительно лучший краткосрочный прогноз, чем 3000-точечная модель, используемая сейчас, то имеется хороший шанс увеличить срок прогноза до пяти дней с точностью, сравнимой с той, которая имеется у производимого сейчас 48-часового прогноза.

Современная вычислительная техника предсказания погоды может быть улучшена путем проверки ее на ИЛЛИАК-4. До сих пор исследователи отказывались экспериментировать с новой техникой предсказаний, если она предполагала использование большого числа имитаций на ЭВМ, каждая из которых могла потребовать до 100 часов машинного времени. Когда ИЛЛИАК-4 сможет сократить время расчета со 100 часов до одного, расширение экспериментов станет вполне возможным.

Математические модели существуют сегодня для обширного множества физических систем и постоянно используются как основа для вычислений, имеющих целью предсказания. Тем не менее биологические и биохимические системы не моделировались с подобной интенсивностью усилий или успехов. Для этого имеется несколько причин. Например, можно написать систему обыкновенных дифференциальных уравнений, которые могут с каким-то правдоподобием описывать рост живой клетки. Можно даже измерить исходные концентрации с точностью, возможно, достаточной для разумных вычислений. Число уравнений в системе, однако, соответствует числу генов в хромосоме, которое именно для случаев, представляющих наибольший интерес, обычно оказывается слишком большим, чтобы это дало возможность провести вычисления.

С другой стороны, в масштабах реальных экологических систем модели популяций могут быть разработаны, но измерения оказываются исключительно иллюзорными (сколько рыбы в озере Мичиган?). Вычисления над статистическими переменными, которые следовало бы провести в этом случае, касаются оценок данных об отдельных организмах для каждого биологического вида в масштабе всей популяции. Это потребует вычислительных возможностей более высокого порядка, чем детерминистические вычисления *). Даже методология подобных вычислений ставит значительные теоретические проблемы.

В заключение позвольте выразить уверенность, что ЭВМ типа ИЛЛИАК-4 смогут устранить некоторые из весьма реальных барьеров, сдерживающих возможности многих вычислений, что имеет прямое отношение к нашим способностям создать рациональные и прочные основы жизни. Противовесом является такое использование возможностей ЭВМ, которое приводит к внесению обезлички и беспорядка в обществе. Именно поэтому ученые не должны относиться нейтрально к результатам использования ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

D. L. Slotnik, W. C. Borck, R. C. McReynolds, Joint Computer Conference AFIPS Proceedings (Fall, 1962), v. 22, p. 97.— Lawrence G. Roberts, Barry D. Wessler, *ibid.* (Spring, 1962), v. 36, p. 543.— S. A. Denenberg, ILLIAC IV Document No. 225, July 15, 1970.

*) По-видимому, имеются в виду вычисления по фиксированной программе без самонастройки и самообучения. (*Прим. перев.*)