

## 5.2. СИСТЕМА ILLIAC IV

Матричная система ILLIAC IV создана Иллинойским университетом и корпорацией Бэрроуз (Burroughs Corporation). Работы по созданию ILLIAC IV выполнялись под руководством Д. Л. Слотника и были начаты в 1966 г. в Иллинойском университете. Монтаж системы был закончен в мае 1972 г. в лаборатории фирмы Burroughs (Паоли, штат Панама), а установка для эксплуатации осуществлена в октябре 1972 г. в Научно-исследовательском центре НАСА им. Эймса (NASA's Ames Research Center, штат Калифорния). Количество процессоров в системе – 64; быстродействие –  $2 \cdot 10^8$  опер./с; емкость оперативной памяти – 1 М байт; полезное время составляет 80-85% общего времени работы ILLIAC IV, стоимость  $(3-4) \cdot 10^7$  долл., вес 75 т, занимаемая площадь  $930 \text{ м}^2$ .

Система ILLIAC IV была включена в вычислительную сеть ARPA (Advanced Research Projects Agency – управление перспективных исследований и разработок Министерства обороны США) и успешно эксплуатировалось до 1981 г.

Уместно заметить, что публикация о проекте SOLOMON появилась примерно через шесть месяцев после первой печатной работы [2] по однородным вычислительным системам, изданной в Сибирском отделении АН СССР; вариант ILLIAC IV реализован через шесть лет после создания советской системы “Минск-222” [3].

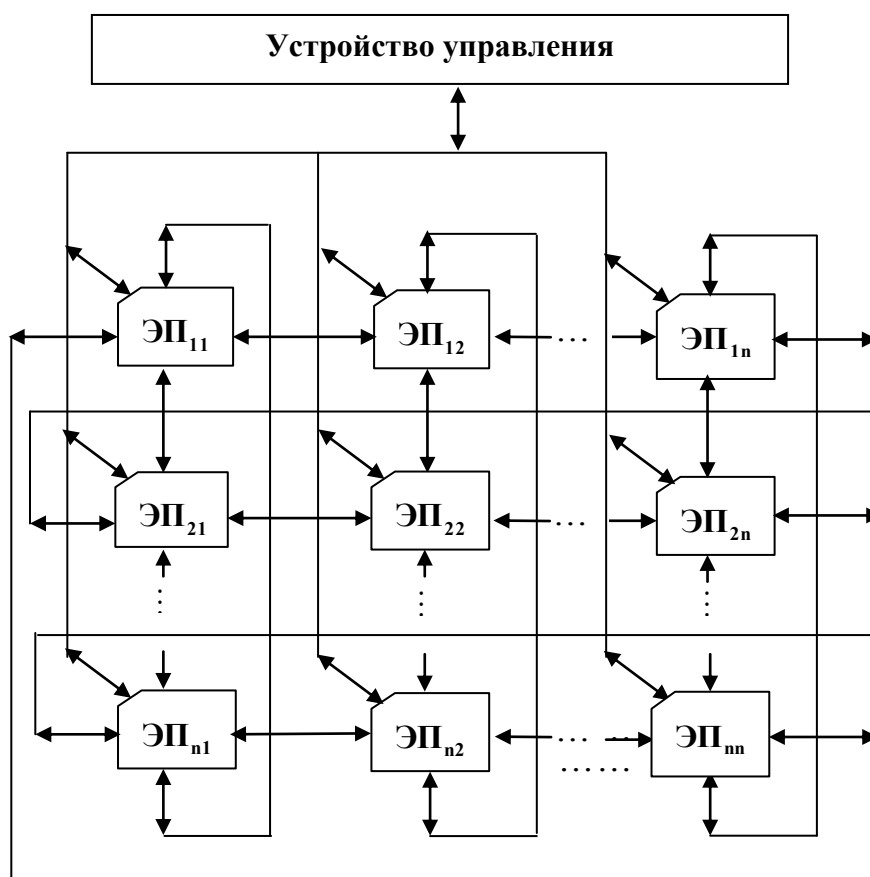


Рис. 5.1. Матричный процессор

### 5.2.1. Функциональная структура системы ILLIAC IV

Матричная вычислительная система ILLIAC IV (рис. 5.2) должна была состоять из 4 квадрантов ( $K_1 - K_4$ ), подсистемы ввода-вывода информации, ведущей ВС В 6700 (или



или 48, или 24, или 8 разрядов с фиксированной запятой. При использовании 64-, 32- и 8-разрядных форматов матрица из 64 ЭП была способна обрабатывать векторы операндов, состоявшие из 64, 128 и 512 компонентов. Система ILLIAC IV при суммировании 512 8-разрядных чисел имела быстроедействие почти  $10^{10}$  опер./с, а при сложении 64-разрядных чисел с плавающей запятой –  $1,5 \cdot 10^8$  опер./с.

Каждый ЭП имел накапливающий сумматор, регистр второго операнда, регистр передаваемой информации (из данного ЭП в соседний ЭП), регистр, использовавшийся как временная память, регистр модификации адресного поля команды, регистр состояния данного ЭП. Элементарный процессор мог находиться в одном из двух состояний – активном или пассивном. В первом состоянии ему разрешалось, а во втором запрещалось выполнять команды, поступавшие из устройства управления. Состояние ЭП задавалось при помощи специальных команд. Среди них, например, была команда, устанавливавшая в пассивное состояние все ЭП, у которых передаваемая информация была больше содержимого накапливающего сумматора. Накапливающий сумматор и все регистры ЭП были программно адресуемы. Они имели 64 разряда, кроме регистров модификации адреса и состояния, которые состояли из 16 и 8 разрядов соответственно.

Память каждого ЭП имела емкость 2048 64-разрядных слов, была реализована на биполярных интегральных схемах; время цикла 300 нс. К каждой памяти непосредственный доступ имел собственный ЭП. Обмен информацией между памятьми различных ЭП осуществляется по сети связи при помощи специальных команд пересылок.

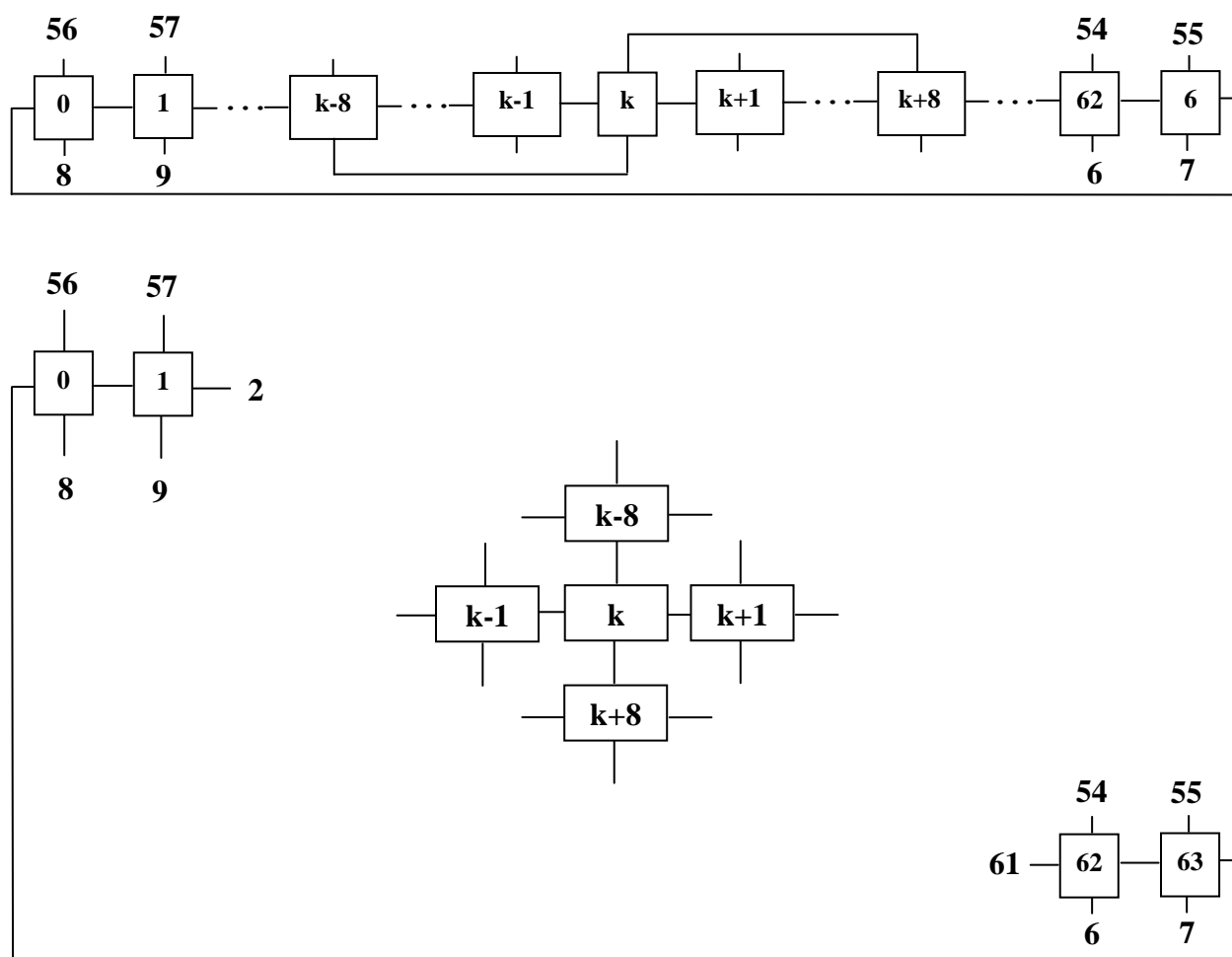


Рис. 5.3. Структура квадранта ILLIAC IV

*Подсистема ввода-вывода* состояла из устройства управления, буферного запоминающего устройства и коммутатора. Комплекс этих устройств обеспечивал обмен информацией между квадрантами ILLIAC IV и средствами ввода-вывода: ЭВМ В 6700, дисковой и архивной памятью, периферийными устройствами, сетью ARPA.

*Ведущая ВС В 6700* – это мультипроцессорная система корпорации Burroughs, которая могла иметь в своем составе от 1 до 3 центральных процессоров и от 1 до 3 процессоров ввода-вывода информации и обладала быстродействием 1–3 млн. операций в секунду. Она использовалась для реализации функций операционной системы (включая ввод-вывод информации, операции по компиляции и компоновке программ, распределение аппаратных ресурсов, исполнение служебных программ, например, таких как программы перезаписи “перфокарты – диски”, “перфокарты – ленты” и т.п.). По сути, ВС В 6700 являлась быстродействующим периферийным устройством ILLIAC IV.

*Дисковая память (ДП)* состояла из двух дисков и обрамляющих электронных схем. Эта память имела емкость порядка  $10^9$  бит и была снабжена двумя каналами, по каждому из которых можно было параллельно передавать и принимать информацию со скоростью  $0,5 \cdot 10^9$  бит/с. Среднее время обращения к диску 20 мс.

*Архивная память (АП)* – постоянная лазерная память с однократной записью, разработанная фирмой Precision Instrument Company. Емкость АП –  $10^{12}$  бит. Запись двоичных данных осуществлялась аргоновым лазером путем прожигания микроскопических отверстий на металлической пленке, нанесенной на полосы полиэфирной подложки. На каждой полоске можно было записать около 2,9 млрд. бит. Имелось 400 информационных полосок, которые размещались на вращающемся барабане. Время поиска данных на любой из 400 полосок – 5 с; время поиска в пределах полоски – 200 нс. Существовало два канала обращения к архивной памяти, скорость считывания и записи данных по каждому из которых была равна  $4 \cdot 10^6$  бит/с.

В системе ILLIAC IV насчитывалось более  $6 \cdot 10^6$  электронных компонентов. Отказы компонентов или соединений могли происходить через несколько часов. По этой причине в систему была включена обширная библиотека контрольных и диагностических тестов. Была предусмотрена возможность оперативной (но не автоматической) замены отказавших ЭП исправными ЭП резерва. Отключенный неисправный ЭП восстанавливался при помощи диагностической ЭВМ.

### ***5.2.2. Программное обеспечение системы ILLIAC IV***

Главная цель разработки ILLIAC IV – создание мощной вычислительной системы для решения задач с большим числом операций. Программы таких задач были структурно единообразны, они содержали три части.

1. “Предпроцессорная” часть обеспечивала инициирование задачи и десятично-двоичные преобразования. Эта часть обычно имела последовательную форму представления.

2. “Ядро” осуществляло собственно решение задачи и представлялось в параллельной форме. Его размер составлял 5-10% полного объема программы, но ядро требовало 80-95% рабочего времени при исполнении на последовательной машине.

3. “Постпроцессорная” часть производила запись результатов в архивные файлы, двоично-десятичные преобразования, вычерчивание графиков, вывод результатов на печать и т.п. Эта часть, как правило, имела последовательную форму представления. Из “постпроцессорной” части управления могло быть передано в “ядро” для выполнения последующих итераций.

Главная цель создания ILLIAC IV и предопределила возможности программного обеспечения: операционной системы и средств программирования.

*Операционная система ILLIAC IV* состояла из набора асинхронных программ, выполнявшихся под управлением главной управляющей программы В 6700. Операционная система работала в двух режимах. В первом режиме она производила контроль и диагностику неисправностей в квадранте и в подсистеме ввода-вывода информации. Во втором режиме осуществлялось управление работой ILLIAC IV при поступлении на В 6700 заданий от пользователей. Задание для ILLIAC IV обычно состояло из перечисленных ниже составных частей.

1. Программы В 6700, написанные, как правило, на версиях языков ALGOL или FORTRAN и осуществлявшие подготовку (и преобразование) входных двоичных файлов. Эти программы представляли собой “предпроцессорную” часть программы решаемой задачи.

2. Программы ILLIAC IV, обычно написанные на языках Glynpir или FORTRAN, которые использовались ILLIAC IV (составляли “ядро”) для обработки файлов, подготовленных программами В 6700, а также для формирования двоичных выходных файлов.

3. Программы В 6700 (на версиях языков ALGOL или FORTRAN), которые преобразовывали двоичные файлы ILLIAC IV в требуемый выходной формат. Они составляли “постпроцессорную” часть программы решаемой задачи.

4. Программа на управляющем языке Iliac, определявшая задание. Эта программа ориентировала операционную систему на работу, предусмотренную заданием. (Допускалось использование операционной системы для одновременного выполнения нескольких программ на управляющем языке).

*Средства программирования ILLIAC IV* включали язык ассемблера (Assembler Language) и три языка высокого уровня: Tranquil, Glynpir, FORTRAN.

Язык ассемблера ILLIAC IV – это традиционный язык программирования, адаптированный под архитектуру ВС, в частности, он имел сложные макроопределения, которые можно было применять для включения стандартных операций ввода-вывода и других операций связи между программами В 6700 и ILLIAC IV. Кроме того, в языке ассемблера были предусмотрены псевдооперации, использовавшиеся для распределения памяти и элементарных процессоров.

Языки высокого уровня в силу архитектурных особенностей ILLIAC IV отличались от соответствующих языков ЭВМ.

1. Распределение двумерной памяти. Была разрешена адресация отдельных слов в памяти ЭП и строк (из 64 слов) в пределах запоминающих устройств матрицы ЭП. Адресация по “столбцу” группы слов в памяти одного ЭП была недопустима.

2. Параллелизм и управление режимом обработки. Вектор данных можно считать естественным выражением параллелизма, и, следовательно, языки ILLIAC IV должны были допускать операции над векторами или строками матриц. Размерность вектора и количество подлежащих обработке элементов вектора определялись словами режима. Языки ILLIAC IV обеспечивали эффективную реализацию широкого круга вычислений и обработку слов режима.

3. Вид команд пересылок и индексации. Каждый из языков ILLIAC IV должен был содержать команды пересылок и индексации с различными приращениями в каждом элементарном процессоре.

Tranquil подобен языку ALGOL и полностью не зависел от архитектуры ILLIAC IV. Он был разработан для обеспечения параллельной обработки массивов информации. Компилятор языка Tranquil потребовал больших системных затрат, связанных с маскированием архитектуры ILLIAC IV. Поэтому работы по созданию компилятора были приостановлены и предприняты шаги по модификации языка Tranquil.

Glynpir являлся языком также алгольного типа с блочной структурой. Он позволял опытному программисту использовать значительные возможности архитектуры ILLIAC IV.

Язык FORTRAN был разработан для рядовых пользователей ILLIAC IV. Он в отличие от Glynpir освобождал пользователя от детального распределения памяти и предоставлял ему возможность мыслить в терминах строк любой длины. Он позволял путем применения модифицированных операторов ввода-вывода воспользоваться параллельной программой как последовательной и выполнить ее на одном ЭП. Иными словами, FORTRAN давал возможность отлаживать параллельные программы на одном элементарном процессоре. В языке FORTRAN нашли отражение многие операционные свойства языков Tranquil и Glynpir. В результате длительной эксплуатации системы ILLIAC IV установлена высокая эффективность транслятора с языка FORTRAN на Glynpir.

### 5.2.3. Применение системы ILLIAC IV

Система ILLIAC IV входила в состав вычислительной сети ARPA. Она являлась средством решения сложных задач, поэтому не любая задача могла быть эффективно решена на данной системе. В самом деле, большую часть численных алгоритмов, разработанных для ЭВМ, нельзя было с помощью незначительных изменений превратить в эффективные схемы параллельных вычислений. При построении параллельных алгоритмов необходимо было учитывать, что система ILLIAC IV управлялась одним потоком команд, т.е. структура системы позволяла одновременно выполнять одинаковые операции над 64 множествами данных, записанных в памяти различных ЭП. Следовательно, эффективные параллельные алгоритмы могли быть построены только для тех трудоемких задач, решение которых было связано с многократными вычислениями одной и той же функции для различных значений аргументов. В качестве примера рассмотрим умножение матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{X}$  большого размера. По определению элементы  $z_{ik}$ ,  $i, k = \overline{1, n}$ , матрицы  $\mathbf{Z} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}$  определяются выражением

$$z_{ik} = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{jk},$$

где  $a_{ij}$ ,  $x_{jk}$  — элементы строки  $i$  матрицы  $\mathbf{A}$  и столбца  $k$  матрицы  $\mathbf{X}$ , соответственно. Ясно, что это требует вычисления функций

$$f_k(y, x) = \sum_{j=1}^n y_j x_{jk}, \quad k = \overline{1, n},$$

в которых аргумент  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$  последовательно заменяется на  $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$  при  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Практически установлено, что ILLIAC IV была эффективна при решении широкого спектра сложных задач. Назовем классы задач, которые допускают построения параллельных алгоритмов с высокой степенью использования элементарных процессоров. Это — матричная арифметика, системы линейных алгебраических уравнений, линейное программирование, исчисление конечных разностей в одномерных, двумерных и трехмерных случаях, квадратуры (включая быстрое преобразование Фурье), обработка сигналов. Отметим классы задач, обеспечивающих неполное использование элементарных процессоров: движение частиц (нелинейный метод Монте-Карло и т.д.), несимметричные задачи на собственные значения, нелинейные уравнения, отыскание корней полиномов (в некоторых случаях эти задачи попадают в первую группу). Эффективность системы ILLIAC IV, например, характеризует время решения типичной задачи линейного

программирования, имеющей 4000 ограничений и 10 000 переменных. Это время для ILLIAC IV составляло менее 2 мин, а для большой ЭВМ третьего поколения было равно 6-8 ч. Названные задачи говорят о большом объеме сферы применения матричных ВС (наука, экономика, проектирование, атомная энергетика, предсказание погоды, радиолокация, оборона, космические исследования и т.д.).

Технические и программные средства ILLIAC IV многократно подвергались модификациям. Это приводило к улучшению технико-экономических показателей, увеличивало вычислительную мощность системы, расширяло сферу применения системы ILLIAC IV.