

А. В. СЕНКЕВИЧ

АРХИТЕКТУРА ЭВМ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Учебник

Рекомендовано

*Федеральным государственным автономным учреждением
«Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО»)*

*в качестве учебника для использования в учебном процессе
образовательных учреждений, реализующих программы*

среднего профессионального образования по специальностям

230111 «Компьютерные сети», ОП.07;

230115 «Программирование в компьютерных системах», ОП.08;

230701 «Прикладная информатика (по отраслям)», ОП.08

Регистрационный номер рецензии 312

от 25 июня 2012 г. ФГАУ «ФИРО»



Москва
Издательский центр «Академия»
2014

УДК 004.2(075.32)
ББК 32.973-02я723
С312

Рецензенты:

зав. лабораторией Центра компьютерного обучения Московского
автомобилестроительного колледжа при Академии народного хозяйства РФ
А. А. Соломашкин; заместитель главного конструктора Санкт-Петербургской
судостроительной компании П. А. Шелелев

Сенкевич А. В.

С312 Архитектура ЭВМ и вычислительные системы: учебник для
студ. учреждений сред. проф. образования / А. В. Сенкевич. —
М.: Издательский центр «Академия», 2014. — 240 с.
ISBN 978-5-7695-6462-8

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образо-
вательным стандартом по специальностям 230701 «Прикладная информати-
ка (по областям)», ОП.08 «Архитектура ЭВМ и вычислительные системы» и
230111 «Компьютерные сети», ОП.02 «Архитектура компьютерных систем».

Рассмотрены цифровые вычислительные системы и их архитектурные
особенности, работа основных логических блоков системы, вычисления в
многопроцессорных и многоядерных системах, кэш-памяти. Дана классифи-
кация вычислительных платформ. Описаны методы повышения производи-
тельности многопроцессорных и многоядерных систем.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 004.2(075.32)
ББК 32.973-02я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Сенкевич А. В., 2014
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2014
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2014
ISBN 978-5-7695-6462-8

Уважаемый читатель

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по укрупнённой группе специальностей 230000 «Информатика и вычислительная техника».

Учебник предназначен для изучения общепрофессиональной дисциплины «Архитектура ЭВМ и вычислительные системы».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают в себя традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит в себе учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включен терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

I

РАЗДЕЛ

АРХИТЕКТУРА И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭВМ

- Глава 1. Краткая история развития ЭВМ
- Глава 2. Представление информации в ЭВМ
- Глава 3. Базовые элементы ЭВМ
- Глава 4. Структура вычислительной машины
- Глава 5. Память
- Глава 6. Центральный процессор
- Глава 7. Устройство управления и шины
- Глава 8. Ввод-вывод
- Глава 9. Системные платы

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭВМ

1.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

История создания средств цифровой вычислительной техники уходит в глубину веков.

В 30-х гг. XVII столетия в национальной библиотеке Мадрида ученые нашли эскиз 13-разрядного суммирующего устройства с десятизубчатыми колесами, способной складывать 13-разрядные десятичные числа, выполненный Леонардо да Винчи (1452—1519). Уже в наше время оно было воспроизведено фирмой IBM и оказалось вполне работоспособным.

Другой европеец — немецкий ученый Вильгельм Шиккард (1592—1636), предложил свое решение для построения счетной машины для суммирования и умножения шестизначных десятичных чисел. В письме к польскому астроному И. Кеплеру, отправленном в 1623 г., он приводит рисунок машины и рассказывает, как она устроена. В начале 1960-х гг. сотрудники Тюбингенского университета создали действующую модель машины Шиккарда.

В 1641—1642 гг. девятнадцатилетний Блез Паскаль (1623—1662), тогда еще мало кому известный французский ученый, создает действующую суммирующую машину для расчетов, выполняемых при сборе налогов. В последующие годы им были созданы около 50 более совершенных образцов машин. Они были шести- и восьмиразрядными и строились на основе зубчатых колес. Эти сумматоры могли производить суммирование и вычитание десятичных чисел. В 1673 г. другой великий европеец, немецкий ученый Вильгельм Готфрид Лейбниц (1646—1716), создает счетную машину, которая превзошла машину Паскаля, ибо могла извлекать корни, возводить в степень, умножать и делить. О машине Лейбница было известно в большинстве стран Европы.

В ЭВМ, появившихся более двух веков спустя, устройство, выполняющее арифметические операции, получило название «арифметическое устройство». Позднее по мере добавления ряда логических действий его стали называть арифметико-логическим

(АЛУ). Оно стало основным устройством современных компьютеров.

Однако заслуги В. Лейбница не ограничиваются созданием арифметического устройства. Начиная со студенческих лет и до конца жизни он занимался исследованием свойств двоичной системы счисления, ставшей в дальнейшем основной при создании компьютеров. Результатом этих исследований был написанный в 1703 г. трактат «Explication de l'Arithmetique Binary» об использовании двоичной системы.

В 1723 г. Член Лондонского королевского общества немецкий математик, физик, астроном Христиан Людвиг Герстен сделал следующий шаг в изобретении арифметической машины и ее изготовлении. Машина Герстена замечательна тем, что в ней впервые применено устройство для подсчета частного и числа последовательных операций сложения, необходимых при умножении чисел, а также предусмотрена возможность контроля ввода (установки) второго слагаемого, что снижает вероятность субъективной ошибки, связанной с утомлением вычислителя.

Существует много вариантов счетных машин, использующих десятичные числа, сконструированных на бумаге или на практике разными изобретателями. Сравним некоторые характеристики рассмотренных машин (табл. 1.1).

Машины	Разрядность	Действия
Цифровой сумматор Леонардо да Винчи	13	Сложение десятичных чисел
Счетная машина В. Шиккарда	6	Сложение и умножение десятичных чисел
Суммирующая машина Б. Паскаля	6 и 8	Сложение и вычитание десятичных чисел
Счетная машина В. Г. Лейбница	Варианты от 2 до 12	Сложение, вычитание, извлечение корней, возведение в степень, умножение и деление десятичных чисел
Арифметическая машина Х. Л. Герстена	Варианты	Высчитывала частное и число последовательных операций сложения при умножении чисел. Кроме того, в ней была предусмотрена возможность контроля правильности ввода данных

В 1799 г. во Франции Жозеф Мари Жакард (1752—1834) изобрел ткацкий станок, в котором для задания узора на ткани использовались перфокарты.

Завершающий шаг в эволюции цифровых вычислительных устройств механического типа сделал английский ученый Чарльз Беббидж (1791—1871). В 1836—1848 гг. он разработал проект аналитической машины, которая была механическим прототипом появившихся спустя столетие ЭВМ. В ней предполагалось иметь следующие основные компоненты: арифметическое устройство, устройство памяти, устройство управления, устройства ввода-вывода.

Для арифметического устройства и устройства памяти использовались зубчатые колеса. Программа выполнения вычислений записывалась на перфокартах (пробивками), на них же записывались исходные данные и результаты вычислений. В число операций, помимо четырех арифметических, была включена операция условного перехода и операции с кодами команд. Автоматическое выполнение программы вычислений обеспечивалось устройством управления. Время сложения двух 50-разрядных десятичных чисел составляло по расчетам ученого 1 с, умножения — 1 мин.

Для машины Беббиджа дочь Байрона Ада Августа Лавлейс (1815—1852) написала программы, поразительно схожие с программами для первых ЭВМ. Не случайно Аду Августу Лавлейс назвали первым программистом мира.

Несмотря на все старания Ч. Беббиджа и А. Лавлейс, машину построить не удалось.

Свое время опередил и Джордж Буль (1815—1864). Разработанная им алгебра логики (алгебра Буля) нашла применение лишь в следующем веке, когда понадобился математический аппарат для проектирования схем ЭВМ, использующих двоичную систему счисления.

Немецкий студент Конрад Цузе (1910—1985), ничего не зная ни о машине Беббиджа, ни о работах Лейбница, ни об алгебре Буля, приступил к работе по созданию машины, схожей по принципу действия с машиной Беббиджа, в 1934 г. за год до получения инженерного диплома. Тем не менее он оказался достойным наследником В. Лейбница и Дж. Буля, поскольку вернул к жизни уже забытую двоичную систему исчисления, а при расчете схем использовал нечто подобное булевой алгебре. В 1937 г. машина Z1 (что означало «Цузе 1») была готова и заработала! Она была, подобно машине Беббиджа, чисто механической. Использование двоичной системы сотворило чудо — машина занимала всего два квадратных метра

на столе в квартире изобретателя! Числа и программа вводились вручную.

Машина Z1 оказалась ненадежной, поэтому К.Цузе решает отказаться от механических элементов, заменив их электромеханическими реле с сохранением механического запоминающего устройства, разработке которого он уделял большое внимание.

1.2. ПОЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Через год в машине появилось устройство ввода данных и программы, использовавшее киноленту, на которую перфорировалась информация. В арифметическом устройстве вместо механики появились телефонные реле. В 1941 г. Цузе с участием Г.Шрайера создает релейную вычислительную машину с программным управлением (Z3), содержащую 2 000 реле. Она стала первой в мире полностью релейной цифровой вычислительной машиной с программным управлением и успешно эксплуатировалась. Краткие характеристики Z3:

- 9 арифметических одноадресных команд; сложение, вычитание, деление, извлечение квадратного корня, умножение на $1/2$, 2, 10, $1/10$ и 1;
- программа размещалась на 8-канальной перфоленте (кинолента);
- работа с двоичными числами с плавающей точкой;
- время выполнения операций сложения — 0,3 с;
- время выполнения операций умножения — 0,3 и 4—5 с;
- клавишный ввод данных;
- вывод результатов на световое табло;
- машина была чисто релейной, включая ЗУ емкостью на 64 числа (по 22 бит) и содержала 2 600 реле;
- отсутствовали команды условного перехода, что не позволяло решать сложные задачи с ветвящимися алгоритмами.

В 1944 г. ученый Гарвардского университета Говард Айкен (1900—1973) создает первую в США (тогда считалось первой в мире!) релейно-механическую цифровую вычислительную машину MARK-1. По своим характеристикам (производительность и объем

памяти) она была близка к Z3, но существенно отличалась размерами (длина 17 м, высота 2,5 м, масса 5 т и количество механических деталей 500 тыс.).

В вычислительной машине использовалась десятичная система счисления. Замечательным качеством такой машины была ее надежность. Установленная в Гарвардском университете, она проработала 16 лет!

Вслед за MARK-1 ученый создает еще три машины (MARK-2, MARK-3 и MARK-4) — тоже с использованием реле, а не электронных ламп, объясняя это ненадежностью последних. На этом завершился период электромеханических цифровых вычислительных машин.

В апреле 1943 г. был заключен контракт между Абердинским артиллерийским полигоном в США и Пенсильванским университетом на создание вычислительной машины, названной электронным цифровым интегратором и компьютером (ЭНИАК). Руководителями работы стали физик Джон Мочли (1907 — 1986) и инженер-электронщик Преспер Эккерт (1919 — 1995).

В конце 1945 г. ЭНИАК был предъявлен на испытания и успешно их выдержал. В этой машине было 18 000 электрических ламп и 1 500 электромеханических реле, что обеспечивало производительность — 5 000 операций в секунду. В начале 1946 г. машина начала считать реальные задачи. По размерам она была более впечатляющей, чем MARK-1: 26 м в длину, 6 м в высоту, масса 35 т. Но поражали не размеры, а производительность — она в 1 000 раз превышала производительность MARK-1! Таков был результат использования электронных ламп.

В остальном ЭНИАК почти не отличался от MARK-1. В нем использовалась десятичная система исчисления. 1946 г. можно считать началом эры ЭВМ.

1.3. ПРИНЦИПЫ ФОН НЕЙМАНА

В 1946 г. Нейман, Голдстайн и Беркс (все трое работали в Принстонском институте перспективных исследований) сделали отчет («Предварительное обсуждение логического конструирования устройства», июнь 1946 г.), в котором было дано развернутое и детальное описание принципов построения цифровых электронных вычислительных машин.

Изложенные в отчете принципы сводились к следующим.

1. Машины на электронных элементах должны работать не в десятичной, а в двоичной системе исчисления.

2. Программа должна размещаться в одном из блоков машины — в запоминающем устройстве, обладающем достаточной емкостью и соответствующими скоростями выборки и записи команд программы.

3. Программа, так же как и числа, которыми оперирует машина, записывается в двоичном коде. Таким образом, по форме представления команды и числа однотипны. Это обстоятельство приводит к таким важным последствиям:

- промежуточные результаты вычислений, константы и другие числа могут размещаться в том же запоминающем устройстве, что и программа;
- числовая форма записи программы позволяет машине производить операции над величинами, которыми закодированы команды программы.

4. Трудности физической реализации запоминающего устройства, быстродействие которого соответствует скорости работы логических схем, требует иерархической организации памяти.

5. Арифметическое устройство машины конструируется на основе схем, выполняющих операцию сложения, создание специальных устройств для выполнения других операций нецелесообразно.

6. В машине используется параллельный принцип организации вычислительного процесса (операции над словами производятся одновременно по всем разрядам).

Перечисленные принципы построения ЭВМ высказывались и до этого отчета. Но заслуга Неймана, Голдстайна и Беркса в том, что они, обобщив накопленный опыт построения цифровых вычислительных машин, сумели перейти от схемных (технических) описаний машин к их обобщенной логически ясной структуре, сделали важный шаг от теоретически важных основ (машина Тьюринга) к практике построения реальных ЭВМ. Имя Дж. фон Неймана привлекло внимание к отчетам, а высказанные в них принципы и структура ЭВМ получили название фон-неймановских.

Под руководством Дж. фон Неймана в 1952 г. была создана еще одна машина на электронных лампах МАНИАК (для расчетов по созданию водородной бомбы), а в 1954 г. еще одна, уже без участия Дж. фон Неймана. Последняя была названа в честь ученого «Джонниак». К сожалению, всего три года спустя Дж. фон Нейман тяжело заболел и умер.

1.4. МАШИНА ТЬЮРИНГА

Идею хранения программ в оперативной памяти и теоретического обоснования основных свойств современных компьютеров в 1936 г. высказал Алан Тьюринг (1912—1953) — гениальный математик, опубликовавший тогда свою замечательную работу «О вычислимых числах».

Полагая, что наиболее важная черта алгоритма (задания на обработку информации) — это возможность механического характера его выполнения, А. Тьюринг предложил для исследования алгоритмов абстрактную машину, получившую название «машина Тьюринга». В ней он предвосхитил основные свойства современного компьютера, состоящего из следующих компонентов:

- запоминающего устройства (склад информации, разбитый на ячейки памяти, которым в некотором определенном порядке приписывают номера);
- исполнительного устройства (часть машины, выполняющая разнообразные индивидуальные операции, из которых состоит вычисление);
- контролирующего устройства (контроль за тем, чтобы эти операции выполнялись согласно заданному алгоритму — «таблице команд» — безошибочно и в правильном порядке).

Несомненно выдающимся открытием ученого явилось установление тройного соответствия между формальными логическими вычислениями, работой человеческого ума и действиями машины, которую можно реализовать физически. Концепция машины Тьюринга стала фундаментом современной теории вычислений и вычислимости.

Идею располагать программы в оперативной памяти реализовал в 1938—1941 гг. работавший в сельскохозяйственном училище штата Айова профессор математики Джон Атанасов (1903—1996), болгарин по происхождению. Джон Атанасов со своим помощником Клиффордом Бери разработал макет специализированной цифровой вычислительной машины (с использованием двоичной системы исчисления !) для решения систем алгебраических уравнений. Макет содержал 300 электронных ламп, имел память на конденсаторах. Таким образом, пионером ламповой техники в области компьютеров оказался Атанасов!

В начале 1950-х гг. в США по инициативе правительства была развернута общественная дискуссия на тему «Несут ли компьюте-

ры угрозу американскому образу жизни?». К экспертизе социальных последствий были подключены активно работавшие в области кибернетики ученые с мировыми именами: Дж. фон Нейман, Н. Винер, К. Шеннон и др. Вердикт всесторонней и независимой экспертизы поражает своей дальновидностью: при грамотном использовании компьютер усилит позиции общества, основанного на свободной конкуренции.

1.5. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН В СССР

В конце 1940-х гг. к созданию ЭВМ оказались готовы только три страны: США, Англия, СССР.

Для разработки, развития и применения средств вычислительной техники (ВТ) необходимы следующие условия:

- постановка масштабных актуальных задач, не поддающихся решению без применения средств ВТ;
- наличие технической инфраструктуры и передовых технологий для разработки и применения ВТ;
- наличие вузов с профессорско-преподавательским составом, способным вести подготовку кадров в данной области.

В СССР были эти условия. Еще до появления первых цифровых ЭВМ уже были сделаны солидные заделы в области теории и практики автоматизации вычислений. Известные математики и механики — М. А. Лаврентьев, А. А. Дородницын, М. В. Келдыш, А. Н. Тихонов, А. А. Самарский, Г. И. Марчук и др. — не только развивали теорию численных методов, но и доводили новые результаты до важнейших практических областей применения.

В разработке и внедрении аналоговых вычислительных машин СССР являлся лидером мирового масштаба. Так, В. С. Лукьяновым был создан гидроинтегратор, при помощи которого решались разнообразные задачи, например:

- нестационарная фильтрация воды под гидросооружениями;
- динамика эксплуатируемых нефтяных месторождений;
- работа теплотрасс в вечной мерзлоте;
- управление масштабом времени. Например, процесс образования ледников на севере страны, происходящий в природе в течение десятков и сотен тысяч лет, можно моделировать за десятки

минут, а процесс электродуговой сварки, протекающий за десятые доли секунды, «растягивать» во времени до десятков минут.

Однако аналоговые машины не могли решить многих проблем. Кардинальным скачком стал переход на цифровые электронные вычислительные машины (ЭВМ). Фундаментальные принципы универсального машинного счета ученые СССР открыли независимо от зарубежных коллег.

Во второй половине 1940-х гг. С. А. Лебедевым, будущим академиком, основателем отечественных разработок ЭВМ, были разработаны универсальные принципы построения структуры ЭВМ. В 1947 г. он начал разработку проекта универсальной ЭВМ с хранимой программой. Это была МЭСМ — малая (макетная) электронная счетная машина — первая универсальная ламповая ЭВМ в СССР. В 1950 г. был официальный ввод в эксплуатацию.

В 1952—1953 гг. МЭСМ была самой быстродействующей и практически единственной регулярно эксплуатируемой ЭВМ в Европе. Конструктивно она была изготовлена в виде макета. Работа по созданию машины носила научно-исследовательский характер и имела цель экспериментально проверить общие принципы построения универсальных ЦВМ.

Основные параметры машины таковы:

- база — 7 500 электронных ламп;
- быстродействие — 50 операций в 1 с;
- емкость оперативного ЗУ — 31 число и 63 команды;
- представление чисел — 16 двоичных разрядов с фиксированной перед старшим разрядом запятой;
- команды трехадресные, длиной 20 двоичных разрядов (из них 4 разряда — код операции);
- рабочая частота — 5 кГц;
- постоянное (штекерное) ЗУ на 31 число и 63 команды;
- возможность подключения дополнительного ЗУ на магнитном барабане, емкостью в 5 000 слов;
- потребляемая мощность составляла 25 кВт;
- машина размещалась на площади 64 м².

Другое направление в развитии отечественных ЭВМ связано с именем академика И. С. Брука. Если школа академика С. А. Лебедева складывалась в направлении создания ЭВМ максимальной производительности для каждого поколения технической базы, то школа И. С. Брука изначально была направлена на класс малых и средних

ЭВМ, для которых весьма существенным является показатель цена/производительность и сбалансированный комплекс характеристик. В 1948 г. И. С. Брук и Б. И. Рамеев получили первое в СССР авторское свидетельство на изобретение в области ЭВМ.

Достаточно долго и успешно вычислительная техника развивалась у нас в русле проблемы достижения и удержания стратегических оборонных паритетов. В Москве было создано СКБ-245 с заводом счетно-аналитических машин (САМ) и институтом НИИ-счетмаш. Все три организации возглавил М. А. Лесечко. В СКБ приступили к разработке большой ЭВМ «Стрела», а затем и ее серийному производству. «Стрела» — цифровая вычислительная машина общего назначения, была разработана в 1953 г. под руководством Ю. Я. Базилевского и Б. И. Рамеева. В 1953 г. «Стрела» была принята государственной комиссией в эксплуатацию, а в 1954 г. начался серийный выпуск ЭВМ. 1954 г. — это год становления отечественной индустрии ЭВМ. Одна из машин проработала 15 лет в Энергетическом институте АН СССР.

«Стрела», построенная на 6 000 электронных ламп, имела среднюю производительность вычислений 2 тыс. трехадресных операций с плавающей запятой в 1 с; полезное машинное время — до 18 ч в сутки. «Стрела» отличалась гибкой системой программирования. Различные виды групповых арифметических и логических операций, условные переходы и сменяемые стандартные программы, а также системы контрольных тестов и организующих программ позволяли создавать библиотеки эффективных программ различного тематического направления, осуществлять автоматизацию программирования и решение широкого круга математических задач (объемом до 108 и более операций).

В том же 1953 г. была закончена БЭСМ — быстродействующая электронная счетная машина (быстродействие 8 000 операций в секунду), родоначальница серии цифровых вычислительных машин, разработанных в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР. БЭСМ — одна из первых современных универсальных ЦВМ, выполнена на электронных лампах и предназначена для решения научно-инженерных задач. Была изготовлена в одном экземпляре и работала с 1953 г. В дальнейшем эта машина усовершенствовалась, что воплотилось в следующую серию: 1953 г. — БЭСМ, 1954 г. — БЭСМ-1, 1958 г. — БЭСМ-2, 1964 г. — БЭСМ-3М, 1966 г. — БЭСМ-4, 1967 г. — БЭСМ-6.

Доклад академика С. А. Лебедева на конференции в городе Дармштадте в 1956 г. произвел настоящий фурор. БЭСМ была признана лучшей ЭВМ в Европе.

БЭСМ-6, главным конструктором которой был академик С.А.Лебедев и зам. главного конструктора В.А.Мельников, была в то время среди универсальных ЭВМ одной из самых высокопроизводительных в мире.

Основные технические характеристики машины БЭСМ-6 таковы:

- быстродействие — около 1 млн операций в секунда (оп./с);
- объем ОЗУ — от 32 до 128 тыс. машинных слов;
- время выполнения сложения с плавающей запятой — 1,1 мкс;
- время умножения — 1,9 мкс;
- время деления — 4,9 мкс;
- время выполнения логических поразрядных операций — 0,5 мкс;
- работа арифметического устройства совмещена с выборкой операндов из памяти;
- разрядность машинного слова — 48 двоичных разрядов;
- объем промежуточной памяти на магнитных барабанах — 512 тыс. слов.

К центральному процессору могут быть подключены 32 лентопротяжных механизма, каждый емкостью до 1 млн слов.

В состав устройств ввода-вывода входят:

- два алфавитно-цифровых печатающих устройства (400 строк в минуту);
- два устройства вывода на перфокарты (ПИ-80);
- четыре устройства вывода на перфоленту;
- четыре устройства ввода с перфоленты;
- два устройства ввода с перфокарт (ВУ-700 или УВвК-601);
- 24 телетайпа.

Кроме того, к БЭСМ-6 возможно подключение дисков и графопостроителей, однако в комплектацию машин, поступивших с завода-изготовителя до 1970 г., это важное оборудование не входило. В комплектацию серийных машин БЭСМ-6 диски были включены лишь в 1972 г.

В дальнейшем была создана совместимая с БЭСМ-6 новая машина — «Эльбрус Б», на порядок более быстрая, чем БЭСМ-6. Последние БЭСМ демонтированы в середине 1990-х гг. Параллельно в 1951 — 1954 гг. в Москве продолжались работы по другим ЭВМ.

В начале 1952 г. была введена в эксплуатацию М-1, созданная А. Н. Мямлиным в лаборатории электросистем Энергетического института АН СССР (ЭНИН) под руководством И. С. Брука. М-1 открывала новое направление в развитии отечественной вычислительной техники — малых ЭВМ преимущественно для научных применений.

Итак, для решения важнейших государственных задач (атомная промышленность, расчеты ядерного взрыва, ракетно-космическая тематика) было обеспечено создание первых в стране промышленно выпускаемых ЭВМ, не уступавших по своим характеристикам американским.

В 1956 г. было принято решение разработать новую более производительную ЭВМ для серийного производства, используя предыдущий опыт. Эта машина получила шифр М-20. ЭВМ М-20 — это электронная вычислительная машина общего назначения.

Основные технические характеристики машины М-20 следующие:

- система представления чисел — двоичная с плавающей запятой, количество разрядов для кодов чисел — 45;
- память на ферритовых сердечниках объемом 4 096 слов, внешняя память на магнитных барабанах и лентах;
- машина собрана в семи шкафах и занимала площадь 170—200 м²;
- средняя производительность — 20 тыс. оп./с;
- потребляемая мощность от сети 220 В/50 Гц — 50 кВт (без системы охлаждения).

ЭВМ М-20 явилась одной из самых быстродействующих и надежных машин первого поколения в мире.

Машинами М-20 оснастили все крупные вычислительные центры институтов Академии наук и оборонных ведомств.

Важным новым достижением стала разработка магнитных барабанов с головками, «плавающими» в пограничном слое воздуха с минимальным зазором от поверхности барабана, но без опасности касания, что привело к увеличению емкости и скорости работы запоминающего устройства (ЗУ) на магнитном барабане.

Эти и другие свои изобретения А. Н. Мямлин применил в ЭВМ «Восток». Фактическое быстродействие «Востока» было свыше 100 тыс. оп./с.

В 1964 г. была создана вычислительно-информационная система «Весна» на полупроводниковой элементной базе. Вычислительный

блок этой ЭВМ имел быстродействие около 250 тыс. оп./с с 48-рядными числами с плавающей запятой. Машина имела широкий набор операций над числами разнообразной структуры (с плавающей запятой, с фиксированной запятой, с двойной точностью). Основными разработчиками ЭВМ «Весна» были В. С. Полин, М. Р. Шура-Бура и др. «Весна» применялась в таких сферах, где требуется обработка и хранение больших объемов данных, в частности в Гидрометеоцентре.

В 1971 — 1973 гг. был создан многомашинный вычислительный комплекс АС-6 с разделяемой памятью и функциональной ориентацией вычислительных модулей, сопрягаемых высокоскоростным каналом. В центральных процессорах АС-6 имелись средства аппаратной поддержки и взаимодействия программных процессов, обеспечивающие защиту и динамическую загрузку программ. В комплекс входили машины БЭСМ-6 и специализированные периферийные машины ввода-вывода данных. На базе комплекса АС-6 была реализована идея создания конвейера нескольких ЭВМ, одновременно выполняющих последовательные стадии обработки поступающих порций информации. Руководителями разработки АС-6 и его программного обеспечения были В. А. Мельников, А. А. Соколов, В. П. Иванников, Л. Н. Королев.

С 1973 г. в течение более 15 лет АС-6 использовался в центрах управления полетами космических аппаратов для обработки информации о полетах в реальном времени. В 1975 г. комплекс АС-6 был применен для обработки информации при совместном полете космических кораблей «Союз» — «Аполлон».

30 декабря 1967 г. вышло постановление Совмина СССР о разработке ЕС ЭВМ. Было решено построить несколько новых заводов по производству ЭВМ. Москва стала ядром и мозгом широкомащтабной акции. На этом этапе было решено организовать кооперацию в рамках стран социалистического лагеря. Каждая страна получала часть работ из длинного списка разнородной номенклатуры изделий.

Прогрессивными чертами ЕС ЭВМ стали аппаратная совместимость различных моделей ЭВМ, единая элементная и конструктивная базы, большой набор периферийных устройств, программная совместимость ЭВМ снизу-вверх, наличие развитого базового программного обеспечения.

Начальная из старших моделей — ЕС-1050 (В. С. Антонов) — была пущена в серию в 1973 г. Она представляла собой стационарную ЭВМ общего назначения, предназначенную для использования в крупных вычислительных центрах.

ЭВМ ЕС-1060, ЕС-1061 (В. С. Антонов, Ю. Ф. Ломов) включали в себя дополнительные средства, повышающие эффективность системного применения ЭВМ: виртуальную память, расширенный набор команд, расширенную систему прерываний, расширенную диагностику.

ЭВМ ЕС-1066 (Ю. Ф. Ломов) была разработана в 1987 г. и являлась самой высокопроизводительной из существующих ЭВМ «Ряд-3». Сочетание высокой производительности, большой емкости оперативной памяти и высокой пропускной способности системы ввода-вывода с возможностью подключения большого набора периферийных устройств из номенклатуры ЕС ЭВМ, а также наличие эффективной операционной системы позволяли строить на базе ЭВМ ЕС-1066 мощные вычислительные системы самого различного назначения.

Особого внимания заслуживает экспериментальная ЕС-2704 (В. А. Торгашев, В. У. Плюснин). Это оригинальный мультипроцессор с динамической архитектурой и массовым параллелизмом. Система ЕС-2704 имела следующий состав: 24 вычислительных модулей, 12 коммутационных процессоров; 6 процессоров ввода-вывода.

В рамках программы ЕС ЭВМ было выпущено около 10 моделей совместимых ЭВМ различной производительности и стоимости, более 10 версий ОС, сотни пакетов прикладных программ.

1.6. ОТХОД ОТ ПРИНЦИПОВ ФОН НЕЙМАНА

Принципы универсальных машинных вычислений (по фон Нейману) легли в основу компьютеров первых поколений. На их базе работает большая часть нынешних компьютеров. Но эти аксиомы существенно ограничивают способы реализации машинного счета. Они диктуют последовательную (команда за командой) реализацию. Такое ограничение сильно сужает разнообразие архитектурных решений и лишает их перспектив неограниченного наращивания производительности за счет увеличения числа, одновременно работающих над одной задачей, процессоров.

При построении новой многопроцессорной параллельной архитектуры ЭВМ требуется нестандартное, многомерное мышление. В этой области архитектурных тайн остается значительно больше, чем найдено решений.

Только для полномасштабной обработки данных сейсморазведки в геофизике суммарная вычислительная мощность парка ЭВМ

должна составлять 10—100 млрд оп./с, т.е. в сотни и тысячи раз больше по сравнению с имевшейся. Приращение производительности на порядки не может достигаться за счет простого наращивания количества машин.

В 1972—1975 гг. в Москве в Институте проблем управления (ИПУ РАН) под руководством И. В. Прангишвили была разработана структура и архитектура ПС-2000 — мультипроцессора с единым потоком команд и многими потоками данных. Его создателям удалось найти оригинальное структурное решение, которое соединило относительно простоту управления единым потоком команд с высокой гибкостью программирования высокопараллельной обработки информации. Предложенные в ИПУ РАН структурные решения впервые сориентировали конструкторов на проектирование для таких задач высокопараллельных компьютеров с высокой производительностью в расчете на единицу стоимости. Их производительность достигла 200 млн оп./с.

В 1980 г. государственная комиссия приняла опытные образцы и санкционировала серийное производство ВК. Сразу восемь экземпляров ВК ПС-2000, демонстрировавшихся перед комиссией на геофизических задачах (пакет программ НПО «Геофизика», Москва), давали суммарную производительность около 1 млрд оп./с. Столь высокая производительность проблемно-ориентированных ВК ПС-2000 достигалась лишь на хорошо распараллеливаемых задачах, которые в то же время характерны для многих практических областей применений. При решении таких задач на комплексе ПС-2000 достигался рекордный «гражданский» показатель «производительность/стоимость».

ЭГВК ПС-2000 не требовал большой площади, имел малое энергопотребление и низкие эксплуатационные расходы, обеспечивал высокую надежность при работе в условиях геофизических экспедиций. Применение ЭГВК ПС-2000 позволило отказаться от импорта дорогостоящих зарубежных вычислительных комплексов.

На базе нескольких комплексов ПС-2000 были созданы высокопроизводительные (до 1 млрд оп./с) системы обработки гидроакустической и телеметрической информации в реальном масштабе времени. Разработка параллельных программ для ВК ПС-2000 требовала особого искусства. Эффективность использования машинных ресурсов мультипроцессора удивляла самих программистов. Ощущение прорыва в будущее испытали многие, ранее имевшие дело с прототипами программ на обычных машинах. На некоторых задачах время счета ускорялось в сотни раз.

С 1986 г. телеметрический вычислительный комплекс Центра управления космическими полетами (ЦУП) стал применять систему предварительной обработки телеметрической информации на базе ВК ПС-2000, связанную в единый комплекс с центральной системой обработки на базе многопроцессорного вычислительного комплекса «Эльбрус-2». Основными разработчиками «Эльбруса-2» были В. С. Бурцев и Б. А. Бабаян.

Система «Эльбрус-2» выпускалась серийно в Сергиевом Посаде (г. Загорске) Московской области с 1985 г. Она имела производительность до 125 млн оп./с над полноразрядными операндами при 10 процессорах и была в тот период самой быстрой «скалярной» машиной в стране. Оперативная память с глубоким расслоением для увеличения быстродействия была общей. Блоки оперативной памяти соединялись с любым центральным процессором (их могло быть до 10) через быстродействующий коммутатор. К этому же коммутатору подсоединялись периферийные процессоры, обслуживающие внешнюю память, периферию и линии связи.

В 1989 г. под руководством академика В. А. Мельникова была изготовлена и запущена в опытную эксплуатацию векторно-конвейерная суперЭВМ «Электроника ССБИС». Производительность в однопроцессорном варианте — 250 млн операций с плавающей запятой над полноразрядными операндами в секунду. Революционная роль в отечественной электронной промышленности, принадлежащая системе «Электроника ССБИС», связана с освоением для ее разработки и производства в промышленности первых больших интегральных схем на матричных кристаллах.

Новое эффективное решение в системе «Электроника ССБИС» — организация передачи данных между массовой интегральной памятью и оперативной памятью под управлением специализированного процессора, реализующего произвольные методы доступа. Основными руководителями разработки были В. А. Мельников, Ю. И. Митропольский, В. З. Шнитман, В. П. Иванников.

В НИИ «Квант» и ИПМ им. М. В. Келдыша была выполнена разработка семейства высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем (суперкомпьютеров) МВС-100 (руководитель проекта — В. К. Левин). МВС-100 предназначалась для решения задач с большим объемом вычислений и обработки данных, в особенности задач математического моделирования в области авиакосмической и ядерной техники, высокоточной навигации, обработки спутниковой информации, разведки и добычи ископаемых, метеорологии, экологии, биоинженерии, для исследования сложных структур, обработки и распознавания сигналов и изображений.