

ЭВМ и многопроцессорные комплексы М. А. Карцева

Ю. В. Ревич

От автора

Михаил Александрович Карцев (1923–1983) — выдающийся советский конструктор вычислительной техники. Начав с участия в конструировании М-1 — одной из самых первых советских ЭВМ, создававшейся под руководством И. С. Брука в начале 1950-х годов, он затем возглавил создание машины М-2. В дальнейшем, начиная с ЭВМ М-4, М. А. Карцев занимался в основном разработками военного направления. Бурно развивавшиеся, начиная с 1950-х годов, и непрерывно совершенствовавшиеся в течение последующих десятилетий, системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН) и противоракетной обороны (ПРО) требовали вычислительных устройств экстремальной производительности, существенно опережая возможности конструкторов и элементной базы. В стране сложилось не так много центров разработки суперкомпьютеров, и каждый из них разрабатывал собственное направление: Институт точной механики и вычислительной техники (ИТМ и ВТ) С. А. Лебедева¹ ориентировался на скалярные и суперскалярные машины, Зеленоградский СВЦ (Д. И. Юдицкий)² сумел доказать перспективность для данных задач уникальных модулярных компьютеров, а коллектив М. А. Карцева ориентировался на многопроцессорные векторные вычисления. Все они нашли свои применения в СПРН и ПРО. Нельзя не отметить, что выдающиеся разработки всех перечисленных коллективов были исключениями из программы копирования систем фирмы IBM, принятой в 1969 году в качестве генерального направления развития отечественной вычислительной техники.

Создание многопроцессорных и многомашинных векторных комплексов стало логичным итогом деятельности М. А. Карцева по созданию быстродействующих ЭВМ для систем ПРО и СПРН. Автор благодарит бывшего директора НИИВК и председателя совета директоров ОАО «НИИ вычислительных комплексов им. М. А. Карцева» Юрия Васильевича Рогачева за предоставленные материалы и разрешение на их использование в написании данного очерка. Некоторые подробности биографии М. А. Карцева см. также в [3.2].

¹ О работах С. А. Лебедева и В. С. Бурцева для систем СПРН и ПРО см. очерк «Информационные технологии и противоракетная оборона».

² О работах Д. И. Юдицкого см. очерк «Модулярная арифметика и модулярные компьютеры».



Михаил Александрович Карцев (1923–1983)

Лаборатория энергосистем Энергетического института (ЭНИИ) АН СССР, возглавлявшаяся Исааком Семеновичем Бруком, сыграла исключительную роль в развитии отечественной вычислительной техники. Кроме первенцев советского компьютеростроения М-1 и М-2, коллективом И. С. Брука в 1953–56 годах под руководством Н. Я. Матюхина³ была создана еще одна ЭВМ — М-3. Этой инициативной (а, следовательно, «незаконной» с точки зрения руководителей советской «плановой» экономики) разработке было суждено стать родоначальником целой ветви в развитии вычислительной техники

³ Николай Яковлевич Матюхин (1927–1984) — наряду с М. А. Карцевым, один из наиболее ярких представителей инженерной школы И. С. Брука, также участник работ по одной из первых ЭВМ М-1. Помимо М-3, Н. Я. Матюхин известен работами по оригинальной ЭВМ «Тетива» для управляющих систем ПВО и разработками САПР для проектирования ЭВМ оборонного назначения.

Советского Союза и союзных стран: на основе М-3 были созданы ЭВМ армянского ЕрНИИМ «Арагац» и «Раздан», белорусская машина «Минск-1» (родоначальник целой серии ЭВМ того же названия), проведены пионерские венгерские, китайские и эстонские разработки вычислительной техники⁴. Отметим, что дальнейшая деятельность Н. Я. Матюхина, связанная с разработками управляющих машин для средств ПВО, еще ждет полномасштабного исторического исследования — о нем и его работах опубликовано много, но, к сожалению, в отрыве от общей истории развития ПВО, в которой они, очевидно, занимали не последнее место. Его работы могут быть еще одной иллюстрацией к положению о том, что именно разработки средств ПРО и ПВО были одним из главных стимулов развития компьютеров в стране.

В 1957 году лаборатория И. С. Брука была переименована в Лабораторию управляющих машин и систем (ЛУМС АН СССР), а в 1958 преобразована в Институт электронных управляющих машин (ИНЭУМ)⁵. Одновременно с этими преобразованиями в коллективе начались работы по применению полупроводниковой техники в цифровых устройствах. Инженерами ЛУМС одними из первых в стране были проведены исследования электронных схем для вычислительных машин на основе появившихся к тому времени первых отечественных транзисторов.

Осенью 1957 года на отдыхе в санатории Кисловодска директор ЛУМС АН СССР Исаак Семенович Брук рассказал директору Радиотехнического института АН СССР (РТИ) академику Александру Львовичу Минцу о том, что у него закончено внедрение в ЭВМ М-2 ферритовой памяти, и освободившаяся группа инженеров приступает к разработке очередной машины. Выяснив, что конкретного заказчика на эту новую машину нет, А. Л. Минц предложил направить разработку на создание электронной вычислительной машины для управления радиолокационной станцией (РЛС) экспериментального комплекса контроля космического пространства. Имелась в виду РЛС метрового диапазона ЦСО-П, ставшая одной из первых радиолокационных станций дальнего обнаружения баллистических ракет и спутников.

Первый представитель принципиально нового поколения РЛС — Центральная станция обнаружения баллистических объектов (ЦСО-П) метрового диапазона волн (главный конструктор Ю. В. Поляк) начала создаваться в 1957 году. Построенная в сентябре 1961 года на полигоне Сары-Шаган (озеро Балхаш), она в автоматическом режиме обеспечивала обнаружение и сопровождение баллистических ракет, запускаемых с полигона Капустин Яр. При

⁴ См. Ковач Г., Шилов В. В. [М-3: к истории компьютера первого поколения](#) // Информационные технологии. — 2011. — № 12.

⁵ Ныне ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука».

конструктивной дальности действия 1500 км РЛС могла обнаруживать и сопровождать одновременно несколько объектов с эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) около 1 м^2 . В 1961 и 1962 годах ЦСО-П использовалась при проведении ядерных испытаний серии «К» для изучения влияния высотных ядерных взрывов на оборудование ПРО (подробнее об этих испытаниях см. очерк «Информационные технологии и противоракетная оборона»). ЦСО-П действовала до конца 1960-х годов, сопровождая запуски космических аппаратов. На ней был проведен большой комплекс экспериментальных работ по совершенствованию аппаратуры. В дальнейшем на основе ЦСО-П были созданы РЛС «Днестр», «Днестр-М» и «Днепр», вошедшие в систему предупреждения о ракетном нападении СССР.



Исак Семенович Брук (1902–1974) — конструктор и теоретик цифровых вычислительных машин, руководитель лаборатории в Энергетическом институте АН СССР (впоследствии преобразованной в ИНЭУМ), где создавалась одна из первых отечественных машин М-1. И. С. Бруку совместно с Б. И. Рамеевым принадлежит первое в СССР авторское свидетельство на АЦВМ (1948 г.)



Александр Львович Минц (1894–1974) — разработчик систем связи и радиолокации, академик АН СССР, директор Радиотехнического института АН СССР. Кроме работ по радиолокации, известен, как теоретик в области ускорителей элементарных частиц и как один из создателей синхрофазотрона в Дубне (конец 1950-х)

Возвратившись в Москву, А. Л. Минц и И. С. Брук создали совместную группу по выработке технических требований для этой машины. В разработке технического задания от Радиотехнического института принимали участие Ю. В. Поляк (главный конструктор РЛС), В. С. Кельзон, М. М. Вейсбейн, от Лаборатории управляющих машин — М. А. Карцев, А. Л. Брудно, В. В. Бельнский. К этому времени уже было ясно, что

быстродействующую и надежную машину на электронных лампах пытаться строить бесперспективно. Результаты исследований инженеров ЛУМС подтверждали возможность построить вычислительную машину с быстродействием свыше 10 тыс. операций в секунду на освоенных промышленностью транзисторах и германиевых диодах.

М-4 и М4-2М

В январе 1958 года главным конструктором М. А. Карцевым началась проработка архитектуры машины, получившей впоследствии название М-4. Состав машины включал арифметическое устройство, устройство управления, оперативную и постоянную память, устройство ввода-вывода, систему питания и пульт. Кроме того, в состав М-4 включались два специализированных устройства — устройство сопряжения с аппаратурой радиолокационной станции и устройство отображения информации. Предусматривалась аппаратная реализация некоторых сложных операций (извлечение квадратного корня, двойное сравнение и др.), внутренняя постоянная память для хранения программ и констант, параллельные вычисления, обеспечиваемые специализированными процессорами ввода-вывода.

В апреле 1958 года разработка М-4 была оформлена документально: вышло постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 08.04.1958, которым Лаборатории управляющих машин и систем АН СССР поручалась разработка, а Загорскому электромеханическому заводу изготовление электронной управляющей машины для экспериментального комплекса РТИ. Для выполнения работ была образована спецлаборатория № 2 под руководством М. А. Карцева. С Загорским электромеханическим заводом он сотрудничал и в дальнейшем — там увидели свет все последующие разработки М. А. Карцева.

Характерно, что уже в конце апреля 1958 года комплект конструкторской документации на машину был поставлен заводу. Такой образ действий, как мы увидим, был присущ Михаилу Александровичу на протяжении всей его деятельности. К моменту формального утверждения задания у него всегда оказывался задел, позволявший выполнить основные работы в сроки, невероятные для тех времен, когда ЭВМ проектировались и осваивались в производстве годами.

Через два года, летом 1960-го, завод изготовил два комплекта устройств машины М-4 и поставил их в Радиотехнический институт для настройки и сопряжения с радиолокационной станцией. В декабре 1960 года М-4 была отлажена и направлена на полигон Сары-Шаган. Летом 1962 года были

завершены совместные испытания РЛС ЦСО-П и М-4. Готовилось постановление о серийном производстве машины на Загорском электромеханическом заводе.



ФГУП Электромеханический завод «Звезда» в наши дни.
Фото Ольги Ромашовой (okposad.ru), 2014

Загорский электромеханический завод «Звезда» (с 1941-го — завод № 569, с начала 1960-х — ЗЭМЗ ПО «Звезда», в наст. время — ФГУП Электромеханический завод «Звезда») — предприятие в Сергиевом Посаде (Загорске) по выпуску вычислительных устройств, одно из ведущих предприятий СССР по производству ЭВМ специального назначения. Во время войны завод относился к Наркомату боеприпасов, выпускал знаменитые пистолеты-пулеметы ППШ, гранаты, а также являлся единственной в стране производственной базой для снабжения армии пиротехническими средствами. После войны перешел в подчинение Наркомата вооружений и занялся выпуском систем управления зенитным артиллерийским огнём (ПУАЗО). Производство счетно-решающих систем для наведения артиллерийских систем, истребителей, прицельного бомбометания, стало для ЗЭМЗ основным направлением вплоть до середины 1950-х годов. В 1957 году ИТМ и ВТ С. А. Лебедева привлек ЗЭМЗ к изготовлению ЭВМ М-40 для «Системы А» (см. очерк *«Информационные технологии и противоракетная оборона»*). С этого года на заводе осваиваются новые технологии по производству печатных плат, накопителей на магнитных барабанах, магнитных лентах, магнитных дисках, печатающих устройств, графопостроителей, устройств ферритовой памяти. На ЗЭМЗ изготавливались многие отечественные машины для СПРН, ПРО,

управления космическими аппаратами и других надобностей: ЭВМ 5Э926 (ИТМ и ВТ, 1961), мобильные ЭВМ 5Э89 («Курс-1», НПО «Агат», 1962), М4-2М, М4-3М и М-10 М. А. Карцева, серия управляющих машин 5Э26 для системы С-300 (В. С. Бурцев, ИТМ и ВТ, 1970-е) и модернизированной версии ЦВК 40У6 (1988), МВК «Эльбрус-1» (ИТМ и ВТ, 1979) и «Эльбрус-2» (1981), М-13 (НИИВК) и т. п.

Электронная управляющая машина М-4 работала в двоичной системе с фиксированной запятой, имела оперативную память 1024 23-разрядных числа и объем постоянной памяти в 1024 23-разрядных числа. Быстродействие в 50 тыс. сложений или вычитаний в секунду, 15 тыс. умножений в секунду, или 5,2 тыс. операций деления или извлечения квадратного корня в секунду было почти рекордным для своего времени.

Второй комплект М-4 был использован для макета экспериментальной РЛС ЦСО-С⁶ (дециметрового диапазона, в отличие от ЦСО-П) [6.2]. Для этой цели пришлось сконструировать специальное устройство сопряжения (узел первичной обработки — УПО): быстродействия элементов М-4 для обработки данных в реальном времени не хватало. Проектирование в январе 1961 года было поручено Ю. В. Рогачеву, в то время — начальнику лаборатории. Модернизированная машина была названа М4-М.

Как показал опыт этой разработки, за период с 1958 по 1962 год полупроводниковая техника сделала гигантский скачок, позволяющий создать ЭВМ со значительно более высокими характеристиками. Импульсно-потенциальная система элементов, применяемая в машине М-4, в значительной мере являлась данью традициям ламповой техники, и для достижения максимальных характеристик требовался строгий контроль параметров транзисторов, вплоть до их индивидуального отбора, что существенно удорожало и замедляло производство. Перспективность ориентации на полупроводники, однако показывало то, что даже «компромиссная» М-4 была вдвое быстрее ламповой М-2 при существенно меньшем потреблении энергии (около 5 кВА у М-4 против 29 кВА у М-2⁷).

На рубеже 1960-х само время диктовало необходимость перехода к новой элементной базе. Транзисторы работали при напряжениях на порядок ниже, чем лампы, не требовали высокой температуры при работе, потребляли намного меньше энергии: так, М-20 на 1600 электронных ламп, работающих при тактовой частоте 666 кГц, потребляла около 50 кВт, в то время, как

⁶ ЦСО-С была предназначена для проекта ПРО «Таран» В. Н. Челомея, закрытого распоряжением Н. С. Хрущева в 1964 году. Из этой разработки РТИ А. Л. Минца вырос проект РЛС «Дон-2Н» сантиметрового диапазона, работающей до сегодняшнего времени в Софрино (см. также очерк *«Информационные технологии и противоракетная оборона»*).

⁷ См. описания [М-4](#) и [М-2](#) на сайте «Виртуальный компьютерный музей».

БЭСМ-6 потребляла 30 кВт на 60 тыс. транзисторов при тактовой частоте 10 МГц. Транзисторы принципиально надежнее: даже при нормальной эксплуатации лампы требуют плановой замены после нескольких тысяч часов работы (то есть каждые два-три месяца), тогда как транзисторы, при условии невыхода эксплуатационных параметров за предельно допустимые значения, теоретически могут работать вечно (практически наработка на отказ транзистора составляет порядка 10^5 – 10^6 часов, что намного превышает срок службы самого изделия, куда он установлен). Излишне говорить, что все эти особенности приобретали особо важное значение в случае не только бортовой аппаратуры самолетов, ракет или спутников, но и наземных мобильных средств связи или передвижных ракетных комплексов.

В статье «Транзисторы в ЭВМ М. А. Карцева» [7.2] Ю. В. Рогачев подробно разбирает причины изменения схемотехнических принципов при переходе от ламповой техники к полупроводниковой. В ламповых логических элементах лимитирующим фактором быстродействия было время перезарядки входных (паразитных) емкостей усилительных каскадов, величина которых у электронных ламп довольно значительна. В сравнении с ним собственное быстродействие лампы весьма велико. Для ускорения процесса перезарядки этих емкостей при связи каскадов между собой применялись импульсные трансформаторы. Кроме того, в ламповых ЭВМ для осуществления логических функций применялись купроксные диоды — намного более надежные, но и гораздо более медленные, чем лампы. Невысокая скорость переключения этих диодов, однако, не мешала: пока шла перезарядка паразитных емкостей лампы, логическая диодная схема успевала установиться в стабильное состояние.

Положение в полупроводниковой схемотехнике было кардинально иным, что было осознано не сразу. Транзисторы и появившиеся германиевые диоды примерно равны по надежности и намного превышают лампы в этом отношении. Экономить транзисторы, как это было с лампами, с точки зрения критериев надежности, стоимости, габаритов и энергопотребления, уже не имело большого смысла. Лимитирующим фактором для увеличения скорости работы усилительного каскада стали уже не паразитные емкости (биполярный транзистор — токовый прибор с низким входным сопротивлением и время перезарядки входных емкостей у него ничтожно мало), а частотные свойства самих транзисторов, быстродействие которых сравнимо с быстродействием новых типов диодов. Отпадала и необходимость в дорогостоящих согласующих импульсных трансформаторах. На первый план вышла статическая (потенциальная) логика с непосредственными связями между усилительными каскадами.

Отметим, что в 1970-е годы, когда появились интегральные схемы на малопотребляющих МОП-транзисторах, напоминающих по своим свойствам электронные лампы, проблемы паразитных емкостей вновь стали занимать внимание схемотехников. Эти проблемы долго препятствовали выходу ныне общеупотребительной КМОП-логики в лидеры. Из-за этого элементная база вычислительных машин середины 1970–80-х годов временно свернула в сторону быстродействующей, но потребляющей много энергии эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ). Бывший главный инженер Казанского завода ЭВМ

Валерий Федорович Гусев полагает⁸ слепое следование советских конструкторов в этом направлении одной из крупнейших ошибок отечественной школы, надолго затормозившей ее развитие.

Разработанная Ю. В. Рогачевым новая система потенциальных логических элементов на высокочастотных транзисторах, освоенных промышленностью к этому времени — П416, 2Т301, П609 и др. была свободна от недостатков периода освоения, позволяя максимально использовать все преимущества полупроводников [7.2]. Буферная память устройства первичной обработки также строилась на передовых к тому времени принципах с использованием ферритовых сердечников.

Система заинтересовала М. А. Карцева. И хотя по результатам испытаний машины М-4 было принято решение о ее серийном производстве (постановление правительства о запуске машины М-4 в серию вышло в ноябре 1962 года), Карцев обратился к заказчику и руководству института с предложением запустить в серию машину на новой элементной базе. Карцева поддержали главный конструктор РЛС «Днепр» Ю. В. Поляк, директор РТИ академик А. Л. Минц, представители Министерства обороны. Руководство ИНЭУМ также удалось уговорить, когда М. А. Карцев убедительно доказал, что разработка новой машины займет не больше времени, чем подготовка к серийному производству ЭВМ М-4, для чего все равно потребуется разработка новой документации и согласование ее с представителями заказчика. В марте 1963 года распоряжением Комиссии по военно-промышленным вопросам (ВПК) ИНЭУМ поручалась разработка новой машины, которую назвали М4-2М.

Ю. В. Рогачев пишет⁹: *«в серийное производство запускалась машина „с листа“, без макетирования и без изготовления экспериментальных образцов. Это давало огромную экономию времени, что было в данном случае очень важным, но требовало от разработчиков высокой квалификации и определенной смелости главного конструктора»*. Работы по созданию новой машины, как это было принято у Карцева, начались еще до выхода распоряжения — в конце 1962 года, и в 1964 году удалось выпустить, как и планировалось, первую серию из семи машин М4-2М. На пяти радиолокационных узлах и командном пункте системы предупреждения о ракетном нападении в Солнечногорске с 1964 по 1969 год было введено в эксплуатацию свыше 50 экземпляров М4-2М.

⁸ См. очерк «Казанское производственное объединение вычислительных систем».

⁹ Рогачев Ю. В. ЭВМ [М4-2М](#), [М4-3М](#) (публикация на сайте «Виртуальный компьютерный музей»).



Ю. В. Рогачев на конференции в МГУ, апрель 2012 года

Юрий Васильевич Рогачев родился 18 августа 1925 года в Калининской области. В январе 1943 года был призван в Советскую армию и направлен на Дальний Восток, в 1945 году принимал участие в войне с Японией. В 1946 году окончил курсы военных радиотехников и до 1950 года занимался обслуживанием и ремонтом радиоаппаратуры в войсках. После демобилизации в июне 1950 года поступил на работу к И. С. Бруку в лабораторию электросистем Энергетического института АН СССР¹⁰, где принимал участие в работах по созданию одной из первых отечественных ЭВМ — машины М-1. В 1952 году поступил на радиотехнический факультет Московского энергетического института (МЭИ). После окончания МЭИ в марте 1958 года вернулся (по распределению) в коллектив И. С. Брука, ставший к этому времени самостоятельной организацией — Институтом электронных управляющих машин (ИНЭУМ). Работал инженером, старшим инженером, старшим конструктором, руководителем лаборатории. Принимал участие под руководством М. А. Карцева в создании машины М-4 и ее переработанной версии М4-2М. Разработка системы логических элементов для

¹⁰ Ныне ОАО «Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского» (ЭНИИ им. Г. М. Кржижановского).

модернизированной ЭВМ М-4М явилась основой кандидатской диссертации, которую Ю. В. Рогачев успешно защитил в 1967 году. С 1967 года — главный инженер созданного на базе отдела спецразработок ИНЭУМа предприятия, в 1975 году преобразованного в Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов (НИИВК). Принимал участие в создании вычислительных машин М-10, М-10М, М-13 и построении вычислительных комплексов на их основе в качестве заместителя главного конструктора, а с 1983 года — в качестве главного конструктора. В 1977 году за разработку машины М-10 Ю. В. Рогачеву в составе коллектива присуждена Государственная премия СССР. С 1983 по 1989 год — директор Научно-исследовательского института вычислительных комплексов, с 1997 года — председатель Совета директоров ОАО «НИИВК им. М. А. Карцева».

М4-2М существовала в трех модификациях 5Э71, 5Э72 и 5Э73, отличающихся объемами постоянной (ПЗУ) и оперативной (ОЗУ) памяти: от 30 кбайт ОЗУ и 60 кбайт ПЗУ до 120 кбайт той и другой. Модификация 5Э72 снабжалась дополнительно системой внешних устройств СВУ-79-1, куда входила внешняя память на магнитных барабанах и абонентская система с устройствами приема информации с перфокарт, вывода информации на перфокарты и печати на АЦПУ. Машина использовалась на РЛС «Днепр», «Днепр-М», «Днепр» и других объектах СПРН. На некоторых из них экземпляры М4-2М функционировали до самого последнего времени, проработав, таким образом, более 30 лет с момента ввода первой очереди СПРН в эксплуатацию в 1969 году.

Среднее время безотказной работы (то, что ныне принято называть английским термином MTBF, mean time between failure) М4-2М за эти годы составило около 900 часов (более месяца!), что на порядок выше не только требований технического задания, но и обычной величины надежности для компьютеров 1960-х, в том числе и зарубежных. Не так уже редко на рынке появлялись модели со временем безотказной работы в единицы часов — так было, например, с первыми экземплярами флагмана тех лет, CDC 6600 Сеймура Крэя (1963), у которых MTBF составлял около 8–9 часов.

В отличие от М-4, М4-2М была машиной с плавающей запятой: один разряд был знаковым, 8 разрядов отводилось на порядок, и 20 разрядов составляла мантисса числа, всего 29 двоичных разрядов. По сравнению с другими современными ей ЭВМ сравнимой разрядности, М4-2М имела расширенный диапазон чисел по величине (от 2^{-128} до 2^{+127} , то есть примерно от $2,9 \cdot 10^{-39}$ до $1,7 \cdot 10^{38}$) и уменьшенное количество значащих цифр. Система команд предусматривала операции с получением результата повышенной точности с 40-разрядной мантиссой. Одно из достоинств М4-2М — за один машинный такт выполнялась любая операция: логическая, арифметическая или управляющая, а время реакции на прерывание — 2–3 машинных такта. Отсюда быстрое действие в 220 тыс. операций в секунду, которое не уступало

самым скоростным суперЭВМ начала 1960-х. Рекордсмен 1960 года CDC 1604 на германиевых транзисторах выполнял примерно 100 тыс. операций в секунду, и лишь CDC 6600 в 1963 году превысил порог в 1 млн операций в секунду. Правда, нужно учесть, что разрядность компьютеров Сеймура Крэя, как и советской БЭСМ-6, была почти вдвое больше — все-таки М4-2М не претендовала на принадлежность к суперкомпьютерам.



KH-7 Image of Space Tracking Radar Facility at Sary Shagan in the Former Soviet Union, 28 May 1967 (25X Magnification)

РЛС «Днестр» состояла из двух «крыльев», каждое из которых соответствовало одной РЛС ЦСО-П. Снимок комплекса на полигоне Сары-Шаган с американского спутника, май 1967

В дополнение к М4-2М на той же технической базе был разработан периферийный вычислитель М4-3М с арифметическим устройством для операндов с фиксированной запятой и развитой системой ввода-вывода для связи с объектом управления. Комплекс из М4-2М и внешнего вычислителя М4-3М обеспечивал быстроедействие 400 тыс. операций в секунду [7.1].

Борис Александрович Андреев, бывший зам. главного инженера подразделения «объект № 6»¹¹ Ленинградского производственно-технического предприятия (ЛПТП) (занимавшегося, в частности, разработкой программного обеспечения для управляющих ЭВМ многих моделей радиолокационных станций), в письме к автору этих строк так отзывался о машине М4-2М: «...несколько слов насчёт ЭВМ М4-2М, год начала выпуска которой — 1964 и год прекращения выпуска — 1984. С 1971 года я лично принимал участие во вводе в эксплуатацию 9-ти этих ЭВМ сначала как инженер, а затем как руководитель пуско-наладочной бригады. Эти ЭВМ были заменены на компьютеры IBM PC к середине 2000 годов. Причём замена была произведена не переписыванием боевых программ, а созданием на IBM PC эмулятора команд ЭВМ М4-2М и загрузкой в IBM PC программ в кодах М4-2М. Дело в том, что архитектура ЭВМ М4-2М превосходила архитектуру IBM PC, и это в 1963 году!

Отдельно хочется сказать о последовательном синхронном шлейфе с пропускной способностью 100 Кбит/с ЭВМ М4-2М. Эта синхронная сеть разбивалась на 64, 128 или 256 каналов по 16 разрядов, и все устройства РЛС были синхронно привязаны к своим каналам и принимали или передавали в ЭВМ М4-2М соответствующую информацию в двоичном коде. Таким образом, это была одной из первых, если вообще не первая промышленная сеть обмена информацией между ЭВМ. Кстати, РЛС СПРН „Днепр“ на базе ЭВМ М4-2М были полностью автоматическими, т.е. обслуживающий персонал только наблюдал за работой РЛС, и все данные о её работе автоматически пересылались на командный пункт в подмосковный Солнечногорск.

Отсюда можно сделать вывод, что ЭВМ М4-2М за свою долгую жизнь достойна книги рекордов Гиннеса»¹².

¹¹ Ныне ЗАО «ОКБ «Карат» в составе ОАО «НПП «Пирамида» (бывшего ЛПТП).

¹² См. приложения «ЭВМ М-4» и «ЭВМ М-4М» к очерку [«Михаил Александрович Карцев»](#) в [3.2].

Проект вычислительного комплекса М-9

Во второй половине 60-х годов в периодических изданиях по вычислительной технике начали появляться теоретические статьи, посвященные многопроцессорным структурам вычислительных систем. Понятно, что в принципе много процессоров могут выполнить задачу быстрее одного, но главное заключается в вопросе о том, как именно разделять задачу на отдельные операции, которые могли бы выполняться параллельно. Есть задачи, состоящие в основном из однотипных операций над массивами данных (к ним относятся в том числе и задачи анализа сигналов радиолокаторов, как и задачи анализа изображений вообще) — математически это есть операции над векторами. Такие задачи распараллеливаются без особых проблем, и именно потому для них хорошо подошли модулярные компьютеры, описанные в очерке Б. М. Малашевича «Модулярная арифметика и модулярные компьютеры».

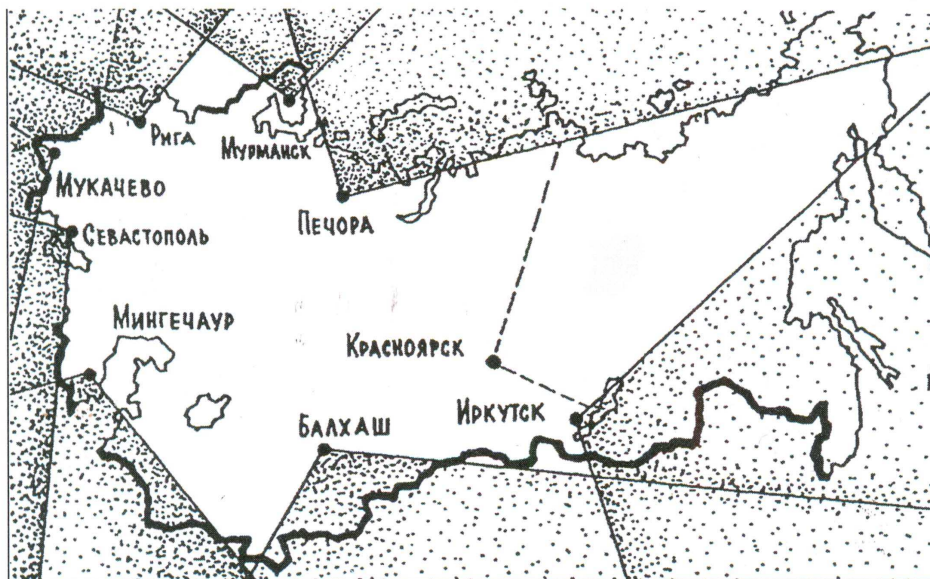


Схема размещения объектов системы СПРН второй очереди. 1980-е годы

Исследования проводились и в отделе спецразработок ИНЭУМ, как к тому времени стала называться лаборатория М. А. Карцева. М. А. Карцев подошел к проблеме построения многопроцессорных систем глобально: анализируя порядок решения на ЭВМ целого ряда разных задач, он показал четыре вида возможностей распараллеливания вычислений и определил для каждого вида

возможную аппаратную реализацию. В своем проекте, названном М-9, Карцев представил вычислительную систему, как матрицу из множества групп процессоров. Он изобрел вычислительный комплекс комбинированного типа, гибко меняющий свою структуру в зависимости от специфики конкретной задачи. М-9 содержал матрицу 32×32 арифметических процессоров, объединенных в четыре группы (все это носило название «функциональной связки»), внешний вычислитель, «числовую связку» для реализации алгоритмов с меньшим параллелизмом, а также «ассоциативную связку» — линию процессоров, ориентированную на выполнение сравнений и логических операций. Каждая такая «связка» управлялась собственным потоком команд.

Комплекс М-9 был одной из первых вычислительных систем, архитектура которых впоследствии получила название VLIW (very long instruction word — очень длинная машинная команда). ЭВМ М-10 и М-13, о которых речь пойдет далее, также часто приводятся, как пример отечественных VLIW-архитектур. В каждой команде такой системы содержится несколько операций, которые должны выполняться параллельно на разных процессорах. В отличие от суперскалярных¹³ архитектур (как, например, «Эльбрус-1» и «Эльбрус-2» ИТМ и ВТ), в которых задача распределения работы между вычислительными модулями решается аппаратно, в инструкциях VLIW явно указано, какое вычислительное устройство должно выполнять какую команду. VLIW можно считать логическим продолжением идеологии RISC¹⁴, расширяющей ее на архитектуры с несколькими вычислительными модулями: как и RISC, VLIW сильно упрощает архитектуру вычислительной системы и увеличивает ее быстродействие, но усложняет задачу программиста. Программирование «вручную» на уровне машинных кодов для VLIW-архитектур оказывается практически невозможным, программисту приходится полагаться на компилятор. Быстродействие VLIW-компьютера также в большей степени зависит от компилятора, нежели от аппаратуры: эффект от оптимизации последовательности операций больше, чем от повышения скорости их выполнения.

VLIW-машина лучше всего выполняет векторные операции, в которых одна и та же операция выполняется над множеством данных (компонентов вектора) —

¹³ *Скалярный процессор* — простейший класс процессоров, работающих по принципу последовательного выполнения операций (SISD, Single Instruction Single Data). *Суперскалярный* — скалярный процессор с возможностью одновременного выполнения нескольких инструкций (к ним относится большинство современных микропроцессоров). В *векторных процессорах*, в отличие от скалярных, одна инструкция работает с несколькими элементами данных (SIMD, Single Instruction Multiple Data). Векторный компьютер, вообще говоря, должен иметь многопроцессорную конфигурацию, однако сегодня под *многопроцессорной* обычно понимается система, в которой на основе нескольких скалярных или суперскалярных процессоров реализуется архитектура MIMD (Multiple Instruction stream, Multiple Data stream — множественный поток команд, множественный поток данных).

¹⁴ RISC-архитектура (restricted (reduced) instruction set computer — компьютер с сокращенным набором команд) — архитектура процессора, в котором быстродействие увеличивается за счет упрощения инструкций и минимизации их количества.

такой процесс оптимизируется наиболее просто. Поэтому описываемую далее М-10 часто называют векторной (векторно-параллельной) машиной, хотя противопоставлять ее многопроцессорным вычислительным комплексам на основе суперскалярных архитектур вроде «Эльбруса», строго говоря, неправильно¹⁵. Типичными VLIW-системами нашего времени были, например, видеопроцессоры AMD/ATI Radeon R600 (2007 год), что показывает родство задач, выполняемых такими системами наилучшим образом: задачи обработки радиолокационных данных во многом напоминают те, что выполняют современные видеокарты.

Проект был представлен Карцевым в марте 1967 года на симпозиуме по вычислительным системам и средам в Сибирском отделении Академии наук СССР. Выступление ведущего математика-программиста Е. В. Гливенко о построении математического обеспечения такой многопроцессорной системы убеждало в его реализуемости. Потенциальное быстродействие системы М-9 могло достигать миллиарда операций в секунду — это предлагалось в те годы, когда только-только появилась БЭСМ-6, достигшая миллионного порога!

Вычислительный комплекс М-9 предполагалось использовать в проекте ПРО «Аврора» генерального конструктора Г. В. Кисунько. Как и проект в целом, комплекс М-9 не был реализован¹⁶, однако это событие повлекло некоторые изменения в судьбе отдела Карцева. Ю. В. Рогачев пишет [6.2]: *«Поскольку руководство Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР, в состав которого входил в это время ИНЭУМ, сопротивлялось включению в план института этой работы, постановлением правительства отдел спецразработок ИНЭУМ'а, возглавляемый Карцевым, был передан в Министерство радиопромышленности как Филиал № 1 ОКБ „Вымпел“. Коллектив Филиала № 1 принял участие в разработке эскизного проекта системы „Аврора“, в который отдельными книгами вошли и разделы вычислительного комплекса М-9. Но комплексный проект системы „Аврора“ был отклонен, и дальнейшие работы по М-9 приостанавливались. Коллектив Филиала № 1 к дальнейшим работам ОКБ „Вымпел“ не подключался и, получив полную самостоятельность в Министерстве радиопромышленности, продолжал тесное сотрудничество с Радиотехническим институтом, где в это время разрабатывался проект сплошного непрерывного поля надгоризонтного обнаружения космических объектов. При образовании ЦНПО „Вымпел“ приказом Министра радиопромышленности Филиал № 1 ОКБ „Вымпел“ был переименован в Филиал РТИ».*

¹⁵ Баканов В. М. [Параллельные вычисления: учеб. пособие](#). — М.: МГУПИ, 2006.

¹⁶ О неудавшемся проекте «Аврора» см. очерк «Информационные технологии и противоракетная оборона».

Как рассказывается в очерке «Модулярная арифметика и модулярные компьютеры», комплекс М-9 (Минприбор) конкурировал также с проектом «Алмаз» зеленоградского СВЦ (Минэлектронпром) в проекте многоканального стрельбового комплекса (МКСК) «Аргунь» для второй очереди системы ПРО А-35 (Минрадиопром). Выиграл зеленоградский проект «Алмаз» с условием его кардинальной доработки, для чего Д. И. Юдицким была разработана модулярная ЭВМ 5Э53 с рекордными характеристиками. Как и проект М-9, 5Э53 не была доведена до конца из-за ведомственных разногласий и прекращения работ по системам ПРО в направлениях, намеченных главным конструктором Г. В. Кисунько. Обратите внимание на три разных (и во многом конкурирующих) ведомства, фигурирующих в этом конкурсе: это, конечно, существенно усложняло организацию работы. Переход коллектива М. А. Карцева в Минрадиопром в значительной степени устранил проблему межведомственных барьеров для внедрения его проектов, которая как раз в 1960–70-е годы стала острой, как никогда ранее.

М-10

В 1968 году в Радиотехническом институте АН СССР начинает разрабатываться проект второй очереди СПРН — сплошного непрерывного поля надгоризонтного обнаружения космических объектов. Расширенные возможности командного пункта такой системы и новая РЛС «Дарьял» требовали вычислительного комплекса производительностью не менее 5 млн операций в секунду. 29 сентября 1969 года вышло постановление правительства, которым Филиалу РТИ поручалось создать для командного пункта СПРН вычислительную машину и на ее основе построить вычислительный комплекс, обеспечивающий непрерывную круглосуточную работу.

В основу разработки новой ЭВМ, названной М-10, были положены принципы уже разработанного многопроцессорного комплекса М-9. Поэтому, несмотря на трудные условия (в начале 1970-х коллектив Карцева не имел собственного здания и был разбросан по всей Москве), уже к середине 1970 года на Загорский завод была направлена конструкторская документация на первые шкафы машины, а в начале 1971 года завод получил полный комплект документации. В 1972 году завод поставил экспериментальный образец машины для отладки и испытаний, к сентябрю 1973 года был изготовлен первый экземпляр М-10, в феврале 1974 года началась опытная эксплуатация непосредственно на объекте. В 1976 году в составе объекта ЭВМ М-10 успешно выдержала Государственные испытания.

Кроме вычислительного комплекса для РЛС «Дарьял» (вычислительные комплексы 6ЗИ6 и 68И6) и командного пункта СПРН (комплекс 17Л6 из шести машин), на базе ЭВМ М-10, получившей в Министерстве обороны шифр 5Э66, был создан вычислительный комплекс для космической системы по обнаружению запусков космических ракет в рамках системы контроля космического пространства — СККП генерального конструктора А. И. Савина. Всего к моменту прекращения производства в 1986 году было выпущено примерно 50 комплектов М-10.



Одна из радиолокационных станций «Дарьял» (Печора). Слева — излучающая часть, справа — приемная. Работает в системе СПРН по настоящее время. В марте 2014 года было объявлено, что станция к 2016 году пройдет глубокую модернизацию без снятия с боевого дежурства

В течение 1974–79 годов, вплоть до появления системы «Эльбрус-1», М-10 была самой мощной отечественной ЭВМ: быстродействие ее составляло около 5 млн операций в секунду (или вдвое больше при работе с укороченными 16-разрядными операндами). Если не считать появления в 1974 году безусловного лидера Cray-1 (с пиковой производительностью порядка полутора сотен миллионов векторных операций с плавающей точкой в секунду¹⁷), М-10 была в свое время одной из самых быстродействующих в мире: рекордсмен 1969–1974 годов, CDC 7600, согласно данным

¹⁷ Сведения о быстродействии Cray-1 в сравнимых цифрах довольно разноречивы: от 80 до 138 и даже 250 млн операций с плавающей точкой в секунду (Мфлопс) (Richard M. Russell, [The CRAY-1 Computer System](#). // ACM. — Vol. 21. — No. 1. — 1978. — January. — PP. 63–72.). Наиболее часто в разных источниках называются цифры в 133 и 160 Мфлопс. Подобный разброс характерен для векторных компьютеров и обусловлен различием задач, на которых измерялась производительность, потому сравнивать их между собой и со скалярными машинами можно с известными оговорками. Для примера см. далее оценку числа машинных циклов на одну операцию для этой машины.

отечественной «Энциклопедии кибернетики»¹⁸, имел производительность 12–24 млн операций в секунду.

Производительность М-10 можно оценить и иначе. Б. Н. Малиновский писал [3.2]: *«Уступая по производительности из-за несовершенства элементной и конструктивно-технологической базы появившейся в те же годы американской супер-ЭВМ „Cray-1“, ЭВМ М-10 превосходила ее по возможностям, заложенным в архитектуру. Они определяются числом машинных циклов (в среднем) на одну выполняемую операцию. Чем оно меньше, тем более совершенна архитектура ЭВМ. Для М-10 оно составляет от 0,9 до 5,3 (для всего спектра операций), а для „Cray-1“ — от 0,7 до 27,6. Здесь минимальные значения близки одно к другому, а максимальное значение для ЭВМ М-10 намного меньше максимального значения для „Cray-1“ (по оценке д. т. н. проф. Б. А. Головкина¹⁹)».*

М. А. Карцев писал по поводу производительности М-10 [7.3]: *«Возможности, предоставляемые структурой М-10 не всегда можно выразить в „операциях в секунду“. Поэтому не следует удивляться, что, хотя производительность М-10 была в свое время оценена в 5,1 млн. опер./с, реальный выигрыш по скорости по сравнению с другими машинами, когда такое сопоставление проводилось, оказывался значительно больше, чем можно было бы ожидать. Например, при расчетах кинетической модели плазмы для сетки в 512 узлов и количестве макрочастиц до 10 в степени 4 (вариант, который на пределе помещается во внутреннюю память БЭСМ-6) разница в скоростях между М-10 и БЭСМ-6 получается примерно в 20 раз, при большем количестве узлов сетки и макрочастиц значительно больше, чем в 20 раз; при этом на БЭСМ-6 счет шел с 48, а на М-10 — с 64 разрядами. При счете одной из задач механики сплошной среды разница в скоростях между М-10 и ЕС1040 получилась более чем в 45 раз (8,5 мин на вариант на М-10 вместо 6,5 ч на ЕС1040)».*

Как всегда бывает с новыми конструкциями, тем более производившимися «с колес», без отработки на макете, поначалу с М-10 хлопот хватало. Особенно не заладилось с первоначальным вариантом операционной системы. Сразу два свидетеля первых шагов М-10 в составе СПРН, генерал-майор В. П. Панченко и главный конструктор СПРН В. Г. Репин²⁰ вспоминают об

¹⁸ Глушков В. М., Амосов Н. М., Артеменко И. А. [Энциклопедия кибернетики : в 2 т.](#) — Киев, 1974. — Т. 2. — 624 с.

¹⁹ Головкин Б. А. Эволюция параллельных архитектур и машины серии М // Вопросы радиоэлектроники. — Серия ЭВТ. Вып. 2. 1993. — С. 18–28. — Прим. Б. Н. Малиновского.

²⁰ Владислав Георгиевич Репин (1934–2011) — главный конструктор (1970–1987) системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН) и системы контроля космического

этом факте [6.2]. В П. Панченко пишет, что «...устойчивой работы нового вычислительного комплекса по новой программе долгое время добиться не удавалось. Сбои происходили каждые несколько часов, а отказы через 10–15 часов. Обстановка накалялась. Сроки завершения испытаний проходили, а удовлетворительного результата добиться не удавалось...»

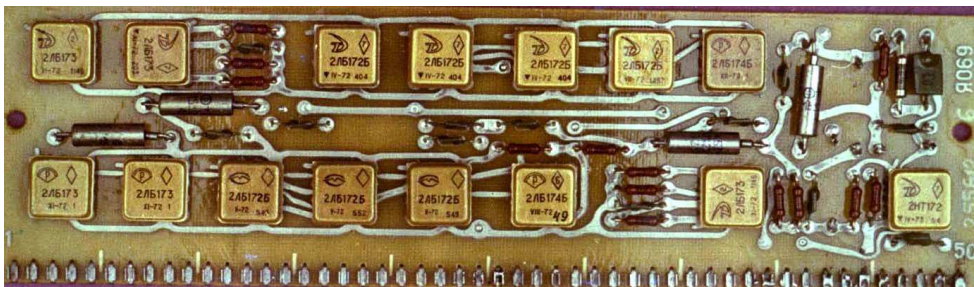
В. Г. Репин указывает, что на раннем этапе «...эта по тем временам суперЭВМ (имеется в виду М-10. — Ю. Р.) параллельного действия во всем была хороша, но еще не удовлетворяла требованиям надежности, и в значительной степени из-за недостаточной отработанности операционной системы». Для исправления ситуации В. Г. Репину понадобилось привлечь программистов из другого коллектива: «Пришлось по ходу дела перераспределить эту работу и переложить разработку боевой операционной системы ЭВМ, а также операционной системы многомашинного комплекса на программистов СКБ-1²¹».

Принципы устройства и функционирования М-10

Перед создателями машины М-10 была поставлена довольно сложная задача: имея микросхемы серии 217 («Посол») со скоростью срабатывания порядка 15–25 нс на вентиль (то есть с максимальной таковой частотой порядка десятков мегагерц), как говорит Ю. В. Рогачев, «нужно было построить ЭВМ с быстродействием не менее 5 млн операций в секунду, с внутренней памятью не менее 5 Мбайт, скоростью внешнего обмена не менее 500 млн бит, скоростями реакции на внешние сигналы при работе в реальном масштабе времени порядка 10–20 мкс и высокой надежностью».

пространства (СККП). С 1955 по 1969 год работал в КБ-1 (см. очерк «Информационные технологии и противоракетная оборона»).

²¹ Имеется в виду СКБ-1 НТЦ ЦНПО «Вымпел», головная организация по СПРН и СККП. В. Г. Репин был ее руководителем с 1970 года. СКБ-1 — одно из трех СКБ в составе ЦНПО «Вымпел», образованного на базе бывшего КБ-1 в 1969 году. СКБ-2 (А. Г. Басистов) — занималось разработкой новой системы ПРО А-135, а СКБ-3 под руководством Г. В. Кисунько — доводкой А-35 (см. очерк «Информационные технологии и противоракетная оборона»). Коллективом программистов в СКБ-1, который упоминает В. Г. Репин, руководил В. Г. Макеев.



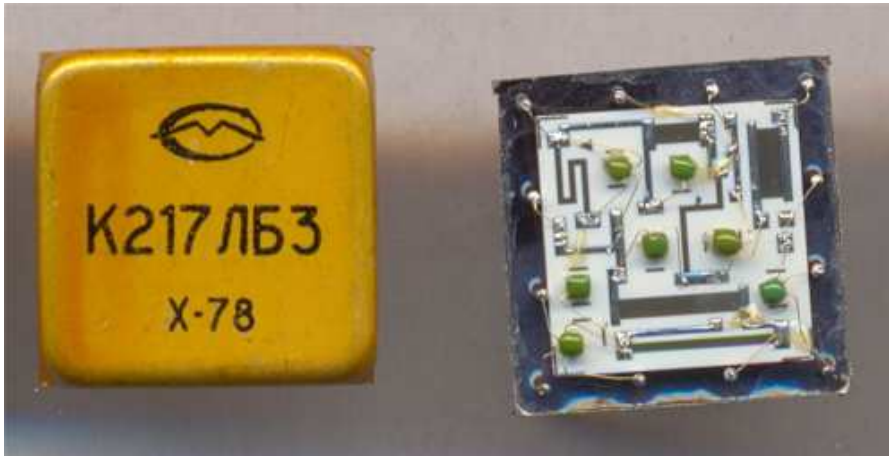
Ячейка ЭВМ М-10

Микросхемы 217 («Посол», см. фото далее) — советская серия логических микросхем, созданная в 1965 году в зеленоградском НИИТТ. По сравнению с предшествующими сериями 201 и 202 («Тропа»), микросхемы серии 217 были выполнены по тонкопленочной технологии, имели повышенную нагрузочную способность, увеличенные быстродействие и помехоустойчивость. Представляют собой гибридные интегральные схемы диодно-транзисторной логики (ДТЛ, базовый элемент ИЛИ-НЕ)²². Наборы К217НТ1-НТ3 из четырех транзисторов типа 2Т318 или 2Т333 в корпусах «Посол», благодаря высоким характеристикам и нахождению в приблизительно равных температурных условиях, использовались в разработках цифровых и аналоговых устройств еще долгое время (в том числе в начале 1980-х и автором этих строк).

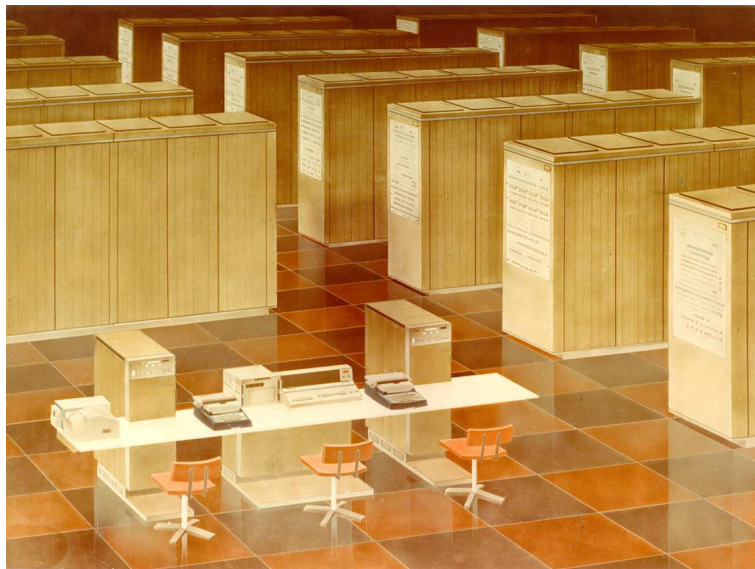
На момент начала проектирования М-10 (1969) гибридные микросхемы серии 217 были последним словом отечественной микроэлектроники в области логических микросхем. Разработка первой массовой серии твердотельных полупроводниковых цифровых микросхем (ТТЛ-серия 133, аналог «военной» серии SN54) была закончена в зеленоградском НИИМЭ в сентябре 1969 года, а массовый выпуск начался в 1970 году, когда документация на М-10 уже поступила на Загорский завод. На основе серии 133 был, в частности, спроектирован вычислительный комплекс «Эльбрус-1» ИТМ и ВТ. Следует еще учесть, что первые твердотельные ТТЛ-микросхемы ничем особенным не выделялись в сравнении с отработанной гибридной серией 217 — они занимали примерно равную площадь на плате, имели сравнимые потребление, быстродействие, надежность и на первых порах, вероятно, даже стоимость, которая, впрочем, разработчиков военной аппаратуры волновала в последнюю очередь²³.

²²О микросхемах «Тропа» см. также очерк «Зарождение и становление отечественной микроэлектроники». Подробнее о микросхемах «Тропа» и «Посол» см. сайт «Музей электронных раритетов», раздел «Гибридные микросхемы» (<http://www.1551a3.ru/gibrid.htm>).

²³ О развитии советских серий микросхем см.: [Динамика радиоэлектроники](#) / под общ. ред. Ю. И. Борисова. — М.: Техносфера, 2007.



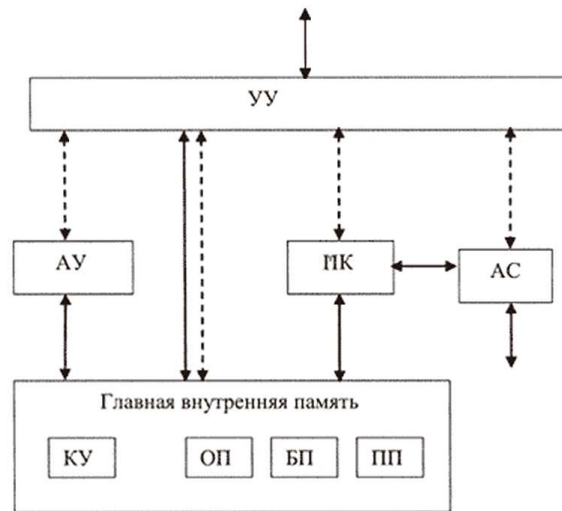
Гибридные интегральные схемы 217 «Посол», на основе которых была построена ЭВМ М-10.
Фото с сайта «Отечественная радиотехника 20 века»



Общий вид ЭВМ М-10 (из коллекции Ю. В. Рогачева)

На рис. показан общий вид ЭВМ М-10. Обобщенная структурная схема ЭВМ М-10 представляла собой классическую архитектуру универсальной вычислительной машины (см. рисунок ниже). Детализированное представление каждого из устройств, однако, весьма отличалось от стандартного и представляет собой весьма сложную структуру из специально разработанных узлов с единой целью достижения максимальной отдачи от всего комплекса.

Так, арифметическое устройство содержало перестраиваемое поле процессоров для выполнения широкого списка операций с числами различного формата и различной формой представления. В АУ использованы методы ускорения арифметических операций, реализована возможность увеличения потока данных благодаря одновременной обработке до 8 пар операндов. Аппаратура мультиплексного канала (игравшего роль внутренней шины данных), позволяла обмениваться данными форматом 64 байта. Устройство оперативной памяти имело емкость 1024 544-разрядных числа (0,5 Мбайт) с временем цикла 1,3 мкс и временем выборки 0,8 мкс устройство памяти второго уровня («большой» памяти) имело емкость 4 Мбайта со временем выборки около 2,5 мкс.



Упрощенная блок-схема М-10. УУ — устройство управления; АУ — арифметическое устройство; МК — внутренний мультиплексный канал; АС — абонентская система; КУ — коммутационно-кодирующее устройство; ОП — оперативная память; БП — оперативное запоминающее устройство второго уровня («большая» память); ПП — постоянная память

Особо разветвленной была система обмена данными с внешними устройствами (абонентская система, АС), предназначенная в том числе и для построения вычислительных комплексов из нескольких ЭВМ М-10. Она предусматривала 24 дуплексных подканала, обеспечивающих одновременное подключение 8 математических пультов, обеспечивающих равный доступ к ресурсам ЭВМ М-10, двух алфавитно-цифровых печатающих устройств, двух

устройств ввода с перфокарт и двух устройств вывода на перфокарты, а также электрифицированную печатную машинку. Кроме того, АС позволяла производить прием и выдачу информации с шести последовательных линий передачи данных со скоростью 9600 бит в секунду каждая. При построении вычислительных комплексов на базе ЭВМ М-10 АС обеспечивала обмен между вычислительными машинами со скоростью до 400 кбайт/с.

Интересна довольно необычная конструкция постоянной памяти (ПЗУ, на схеме — ПП) для хранения стандартных программ. Было выбрано ПЗУ конденсаторного типа, где информация хранилась на сменных металлических перфокартах, имевшее преимущества простоты в эксплуатации, несложной и недорогой процедуры смены информации, высокой надежности в сравнении с другими распространенными в те времена разновидностями ПЗУ.

Схема накопителя ПЗУ представляла собой ортогональную сетку из 256 адресных и 68 информационных шин, каждое перекрестие которых является ячейкой для запоминания одного бита информации. Запись в ячейке «1» или «0» определяется наличием или отсутствием емкостной связи между адресной и выходной шинами, которая зависит от конфигурации металлической перфокарты, находящейся между платами адресных и выходных шин. Если в месте перекрестия в заземленной перфокарте пробито отверстие, то емкостная связь между шинами есть; если отверстия нет, то связь разрушена. Перфокарта представляла собой тонкую пластину 0,5 мм толщиной с полиэтиленовыми изолирующими прокладками с обеих сторон. В блоке ПЗУ могло размещаться 128 таких перфокарт емкостью восемь 34-разрядных чисел каждая. Общая емкость ПП машины составляла 512 кбайт, время считывания 0,5 мкс, время цикла обращения 1,3 мкс.

Операционная система М-10 с разделением времени допускала подключение до восьми независимых терминалов с возможностью отладки и выполнения программ в диалоговом режиме. В дальнейшем было создано еще три варианта операционной системы — ориентированные на выполнение преимущественно одной приоритетной задачи в реальном времени или нескольких таких задач. Самая «продвинутый» вариант ОС позволял подключение до 48 рабочих мест программистов одновременно, причем с выводом информации в том числе и на интерактивный дисплей ЕС7064 с клавиатурой и световым пером, содержал трансляторы и средства отладки программ на Ассемблере М-10, Алголе-60 и Фортране, имел развитую файловую систему. Для защиты от сбоев, бывших в те время настоящим бедствием даже на относительно надежных машинах (особенно для крупных задач, выполнение которых длилось по многу часов), в этой ОС был предусмотрен автоматический рестарт от последней контрольной точки в случае появления сбоя.

В М-10 содержались аппаратные средства отладки программ, впоследствии известные под обобщающим названием *debugger* (отладчик), ставший стандартным и общедоступным инструментом сред программирования лишь полтора-два десятилетия спустя после начала разработки машины Карцева. Как указывает М. А. Карцев, в книге «Структурное проектирование и конструирование программ» Э. Йодана, изданной в США в 1975 году, когда машины М-10 уже стояли на боевом дежурстве, о подобных возможностях для отладки программ еще говорилось, как «деле почти неслыханном»²⁴.

М. А. Карцев так описывает эту особенность М-10 [7.3]: *«Директивы, интерпретируемые указанной аппаратурой, включают в свой состав пуск, останов, продолжение отлаживаемой программы, прохождение отдельных участков программы „шагами“, вывод на терминал содержимого различных регистров, отдельных ячеек или массивов памяти, ввод с терминала информации в регистры или в память, управление регистром и схемой совпадений. Регистр и схема совпадений представляют собой весьма важное средство отладки программ. Они дают возможность по директивам, передаваемым программистом с терминала, но без внесения каких-либо изменений в отлаживаемую программу задавать весьма сложные условия для выработки сигнала прерывания, по которому происходит останов программы либо передача управления к любой отладочной программе, записанной программистом на свободном месте памяти. Например, условие может выглядеть так: „Выработать сигнал прерывания, если будет выполняться передача — управления в такую-то группу ячеек памяти...“ или „...Если будет производиться запись в такую-то ячейку памяти...“, или „...Если будет производиться преобразование такого-то регистра...“, или „...Если для формирования адреса обращения к памяти в качестве базы (или индекса) будет использоваться такой-то регистр адресного модификатора“ и т. д. и т. п. Действия отладочной программы, вызываемой сигналом прерывания, могут состоять в передаче на печать содержимого определенных регистров или ячеек памяти либо в изменении содержимого каких-либо регистров или ячеек памяти, либо в выработке определенных сигналов оператору, либо в единицы в некоторый счетчик, либо в записи показаний электронных часов в момент прерывания и т. д. и т. п.; все эти действия могут предваряться проверкой некоторых дополнительных условий, а дальше управление может быть возвращено отлаживаемой программе для продолжения ее работы».*

²⁴ Йодан Э. Структурное проектирование и конструирование программ : пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — С. 359.



Рене Павлович Шидловский (р. 1926), заместитель главного конструктора М-10, руководитель разработки ПЗУ на металлических перфокартах. Как и Ю. В. Рогачев, Р. П. Шидловский — сотрудник первоначального коллектива Лаборатории электросистем ЭНИИ (с сентября 1950 года), участвовал в работе по М-1

Интересно видение М. А. Карцевым проблемы программирования на языках высокого уровня, в известной степени снижающего скорость выполнения программ в сравнении с низкоуровневым программированием. В начале 1950-х Джон фон Нейман назвал только что появившийся язык Фортран «отходом научной работы для канцеляристов». В настоящее время, когда на языках уровня С/С++ программируют даже контроллеры для бытовых приборов, высказывание фон Неймана относят скорее к причудам великого математика (легко составлявшего программы в машинных кодах в уме), и этот вопрос, казалось бы, окончательно решен. Однако Карцев, признавая удобство высокоуровневых языков, полагал, что для использования всех возможностей М-10 они подходят не слишком хорошо [7.3]:

«Поскольку при проектировании машины основными целями считались производительность и эффективность, с самого начала предполагалось, что программирование будет вестись в основном на машинно-ориентированных

языках Автокод-1 М-10 (фактически просто символьный язык один в один, правда с неплохой мнемоникой) и Ассемблер — язык несколько более высокого уровня. Трансляторы с Алгола-60 и Фортрана на язык М-10 появились позже, однако и до сих пор, несмотря на многочисленные усовершенствования, их использование приводит к значительным потерям в быстродействии по сравнению с программированием на машинно-ориентированных языках, потому что структура М-10 и, в частности, ее машинный язык очень сильно отличаются от той структуры, на которую вольно или невольно ориентированы современные алгоритмические языки (хотя они и называются проблемно-ориентированными или даже универсальными). <...> Возможно, что исходная предпосылка относительно того, что и системные программисты, и пользователи должны работать в основном с машинно-ориентированными языками, была неправильной. Во всяком случае, сейчас видно, что идея создания векторных машин типа М-10 не обязательно должна противоречить возможности программирования на языках высокого уровня. С другой стороны, как ясно теперь, при разработке М-10 был правильно оценен тот факт, что в создании особо сложных программ, имеющих объем порядка нескольких десятков тысяч или сотен тысяч слов и во многих случаях связанных с реальным временем (а именно на такие программы главным образом ориентирована М-10), основная трудность и основные затраты времени относятся не к этапу написания программ, а к их комплексной проверке и отладке. Языки высокого уровня упростили бы именно написание программ, но затруднили бы создание для пользователей столь мощных средств отладки программ, какие имеются в М-10 при работе с машинно-ориентированными языками».

К 1977 году М-10 была модернизирована. Аппаратура внутренней памяти ЭВМ М-10 занимала около 70 процентов объема оборудования машины — 21 типовой шкаф из 31, потому основной целью модернизации было сокращение объема, занимаемого памятью. В качестве носителей информации в оперативной памяти первого уровня (ОП на схеме выше) теперь использовались интегральные схемы, в оперативной памяти второго уровня (БП) использовались термостабильные ферритовые микросердечники размером 0,7×0,4×0,2 мм, в постоянной памяти (ПП) использовались магнитные сердечники с диаметральными отверстиями, обеспечивающие неразрушающее считывание информации. Все новое оборудование устройств внутренней памяти разместилось в 4-х сдвоенных шкафах. Именно М-10М стала первой ЭВМ, которую НИИВК получил в собственное распоряжение, создав на ее основе многопользовательский моделирующий стенд. На этом стенде, в частности, проектировались многослойные печатные платы для новой машины М-13, разработка которой началась в 1977 году.

На основе разработок М4-2М, М-10 и ее модернизированной версии М-10М сотрудники НИИВК защитили две докторские и 31 кандидатские диссертации, было опубликовано около 500 статей и издано десять монографий [7.1]. Однако сама М-10 долгие годы оставалась глубоко засекреченным объектом и достижения НИИВК для широкой научной общественности оставались тайной за семью печатями. М. А. Карцеву удалось частично приподнять завесу секретности в 1979 году, когда его доклад, представленный академиком В. С. Семенихиным, появился в «Докладах Академии наук»²⁵. В 1980 году появилось подробное описание машины в серии статей, помещенной в сборнике «Вопросы радиоэлектроники» со вступительной статьей Карцева [7.3].

Благодаря усилиям М. А. Карцева на экземпляре машине М-10М, имевшейся в самом НИИВК, были проведены *«особо сложные научные расчеты: по механике сплошной среды (в 40–45 раз быстрее, чем на БЭСМ-6 для вариантов программы, размещающейся в ОЗУ БЭСМ-6, и в сотни раз быстрее для реальных вариантов). Впервые в мире на модели получены данные по явлению коллапса в плазме, чего не удалось сделать на СДС-7600 в США. Часть этих результатов опубликована в докладах АН СССР (т. 245, 1979, № 2, с. 309–312), в трудах XV международной конференции по явлениям в ионизированных газах (Минск, июль 1981 года), доложена на европейской конференции в Москве осенью 1981 года»* [7.1].

Упомянувшийся выше Б. А. Андреев из ленинградского ОКБ (см. сноску 11) весьма высоко отзывался о машинах Карцева в сравнении с пришедшими позже системами «Эльбрус»: *«Вся убогость и халтурность МВК „Эльбрус-1“ особенно контрастировала по сравнению с ЭВМ М-10 М. А. Карцева, которая стояла в 50-ти метрах у нас на предприятии. Это, кстати, было единственное место в СССР, где обе советские суперЭВМ стояли бок о бок и могли нами сравниваться»*.

Чтобы несколько реабилитировать разработки В. С. Бурцева и ИТМ и ВТ в глазах сегодняшнего читателя, стоит отметить, что в письме Б. А. Андреева идет речь о начале 1980-х годов, то есть о самых первых экземплярах «Эльбруса-1», в то время, как М-10 к тому времени была проверена и «вылизана» с выявлением и устранением всех узких мест, как об этом свидетельствуют цитированные выше воспоминания ее заказчиков и потребителей. Следует еще учесть, что М-10 уже по меркам 1970-х и тем более 1980-х годов проектировалась на устаревшей элементной базе, и при этом все-таки до конца десятилетия держала место самого быстрого отечественного компьютера. Для нового поколения радиолокационных

²⁵ Карцев М. А. [Вычислительная машина М-10](#) / Доклады Академии наук СССР. — 1979. — Т. 245. — № 2.

станций, таких, как сантиметровая РЛС «Дон-2Н», требовались вычислительные средства уже другого уровня, и таковым стал «Эльбрус-1», быстро сменившийся на еще более быстрый «Эльбрус-2» (на основе ЭСЛ-логики серии 100). О масштабах задачи, решаемой радиолокационным комплексом «Дон-2Н», свидетельствует то, что в конечном варианте комплектации его обслуживал комплекс из четырех десятипроцессорных ЭВМ «Эльбрус-2» с производительностью в 125 млн операций в секунду каждая. Отсюда понятно, почему для «Дон-2Н» в ИТМ и ВТ был заказан новый компьютер, а М-10 в конечном проекте не рассматривалась, хотя и была использована в экспериментальном полигонном варианте «Дон-2НП», построенном в Сары-Шагане в конце 1970-х.

Однако и в НИИВК тоже не стояли на месте.

М-13

К концу 1977 года стало ясно, что М-10 исчерпала свои возможности. Ю. В. Рогачев пишет, что *«опыт показывал, что структура новой машины должна быть более гибкой в организации вычислительных систем и в части комплексирования, и в части производительности, и в части сопряжения с источниками обрабатываемой информации»*.

Проект ЭВМ М-13 предусматривал серию машин на основе трех базовых моделей возрастающей мощности. При этом малая модель (М-13/10) отличается от средней (М-13/20) и большой (М-13/30) количественно — комплектностью устройств памяти, дополнительными внешними устройствами и пр., от которых зависит и производительность. Центральная процессорная часть имеет три конфигурации и может обеспечивать производительность в зависимости от исполнения 12, 24 или 48 млн операций в секунду. При этом объем внутренней памяти может составлять 8,5, 17 или 34 Мбайт, пропускная способность центрального коммутатора — 800, 1600 или 3200 Мбайт/с, пропускная способность мультиплексного канала — 40, 70 или 100 Мбайт/с. Абонентское сопряжение и специализированная процессорная часть могут комплектоваться еще более гибко.

Кроме обычных узлов системы, в М-13 входила специализированная процессорная часть, предназначенная для обработки больших массивов относительно малоразрядной информации. Базовую операцию для этой структуры (произведение двух комплексных чисел) специальный процессор выполнял за один машинный такт. Эквивалентное быстродействие специализированной процессорной части ЭВМ М-13 в максимальной комплектации при решении подобных задач могло достигать 2,4 млрд

операций в секунду. В качестве внешней памяти в машине М-13 использовались накопители на магнитных дисках с суммарной емкостью 200 Мбайт и на магнитной ленте с суммарной емкостью 42 Мбайт.



Ю. В. Рогачев, директор НИИВК в 1983–1989 годах

Ю. В. Рогачев в [7.1] относит М-13 к 4-му поколению вычислительных средств, что не совсем верно: для 4-го поколения характерно применение микросхем высокой степени интеграции (СБИС), а М-13 строилась на основе ТТЛ и ТТЛШ-логики серий 133, 130, 530 малой степени интеграции²⁶. Это не противоречит общемировой тенденции тех лет — как свидетельствует академик В. К. Левин²⁷, в 1970–1985 годах все суперкомпьютеры в мире *«строились на высокоскоростных компонентах с невысоким уровнем интеграции»*. Обусловлено это было тем, что рынок суперкомпьютеров узок и не оправдывает разработку специальных СБИС, которых для таких ЭВМ требовались сотни разновидностей. К 4-му поколению в построении суперкомпьютеров (в отличие от малых машин и персоналок) перешли лишь в

²⁶ Заметим, что Карцев, в отличие от разработчиков «Эльбрус-2», не поддавался моде на применение ЭСЛ-логики в быстродействующих компьютерах.

²⁷ Левин В. К. Вычислительная техника и ее база — электроника // [Динамика радиоэлектроники](#) / под общ. ред. Ю. И. Борисова. — М.: Техносфера, 2007.

1990-е годы на основе массовых микропроцессоров, которые к тому времени достигли достаточного быстродействия в сочетании с высокой разрядностью.

Разработка М-13 была закончена в 1982 году, но из-за интриг в руководстве НПО «Вымпел» и министерстве радиопромышленности, к которым принадлежал НИИВК, М-13 была запущена в серию лишь в 1985 году — уже без Карцева, скоропостижно скончавшегося в апреле 1983 года. Всего было изготовлено около 20 машин М-13, использовавшихся в РЛС «Дарьял-У»²⁸. Несмотря на высокие, во многих отношениях рекордные характеристики, М-13 не успела обрести популярности М-10 и не оставила столь глубокого следа в истории советской компьютерной техники. Не в последнюю очередь это объясняется безвременной кончиной Михаила Александровича Карцева, заслуженно имевшего огромный авторитет у современников.

Литература

- 7.1. Рогачев Ю. В. [Вычислительная техника от М-1 до М-13](#) (1950–1990). — М.: НИИВК, 1998.
- 7.2. Рогачев Ю. В. [Транзисторы в ЭВМ М. А. Карцева](#) / Сайт «Виртуальный компьютерный музей».
- 7.3. Карцев М. А. [Основные принципы проектирования ЭВМ М-10](#) // Вопросы радиоэлектроники. — Серия «Электронная вычислительная техника». — 1980. — Вып. 9.

²⁸ «Дарьял-У» — усовершенствованная версия РЛС «Дарьял», разработанная под руководством А. А. Васильева в конце 1970-х, и в дальнейшем еще раз модифицированная В. М. Иванцовым («Дарьял-УМ»). В восьмидесятые годы «Дарьял-У» и «Дарьял-УМ» строились на позициях СПРН — узлах «Скрунда» (Рига), «Николаев» (Севастополь), «Балхаш» (Сары-Шаган), «Мишелевка» (Иркутск), а также на новой позиции под Енисейском.