

Троичные ЭВМ “Сетунь” и “Сетунь 70”

Н.П.Брусенцов, Х.Рамиль Альварес (МГУ)

В начале 1956 г. по инициативе академика С.Л.Соболева, заведующего кафедрой вычислительной математики на механико-математическом факультете Московского университета, в вычислительном центре МГУ был учрежден отдел электроники и стал работать семинар с целью создать практичный образец цифровой вычислительной машины, предназначенной для использования в вузах, а также в лабораториях и конструкторских бюро промышленных предприятий. Требовалось разработать малую ЭВМ, простую в освоении и применениях, надежную, недорогую и вместе с тем эффективную в широком спектре задач.

Обстоятельное изучение в течение года имевшихся в то время вычислительных машин и технических возможностей их реализации привело к нестандартному решению употребить в создаваемой машине не двоичный, а троичный симметричный код, реализовав ту самую “уравновешенную” систему счисления, которую Д.Кнут двадцать лет спустя назовет “быть может, самой изящной” [1], и как затем стало известно, достоинства которой были выявлены К.Шенноном в 1950 г. [2].

В отличие от общепринятого в современных компьютерах двоичного кода с цифрами 0, 1, арифметически неполноценного вследствие невозможности непосредственного представления в нем отрицательных чисел, троичный код с цифрами $-1, 0, 1$ обеспечивает оптимальное построение арифметики чисел со знаком. При этом не только нет нужды в искусственных и несовершенных дополнительном, прямом либо обратном кодах чисел, но арифметика обретает ряд значительных преимуществ: единообразие кода чисел, варьируемая длина операндов, единственность операции сдвига, трехзначность функции “знак числа”, оптимальное округление чисел простым отсечением младших разрядов, взаимокомпенсируемость погрешностей округления в процессе вычисления [3].

Троичная ЭВМ “Сетунь” [4,5], опытный образец которой разработали, смонтировали и к концу 1958 года ввели в эксплуатацию сотрудники отдела электроники, как показал опыт ее освоения, программного оснащения и многообразных практических применений, с исчерпывающей полнотой удовлетворяла всем предусмотренным заданием на разработку ее требованиям. Этот успех, с учетом того, что разработка троичной ЭВМ предпринималась впервые, проводилась

немногочисленным коллективом начинающих сотрудников (8 выпускников МЭИ и МГУ, 12 техников и лаборантов) и была выполнена в короткий срок, явно свидетельствует о благодатности троичной цифровой техники. Ценой усложнения по сравнению с двоичными элементами памяти и элементарных операций достигается существенное упрощение и, главное, естественность архитектуры троичных устройств.

При минимальном наборе команд (всего 24 одноадресных команды) “Сетунь” обеспечивала возможность вычислений с фиксированной и с плавающей запятой, обладала индекс-регистром, значение которого можно как прибавлять, так и вычитать при модификации адреса, предоставляла операцию сложения с произведением, оптимизирующую вычисление полиномов, операцию поразрядного умножения и три команды условного перехода по знаку результата. Простая и эффективная архитектура позволила усилиями небольшой группы программистов уже к концу 1959 г. оснастить машину системой программирования и набором прикладных программ [6], достаточными для проведения в апреле 1960 г. междуведомственных испытаний опытного образца.

По результатам этих испытаний “Сетунь” была признана “первым действующим образцом универсальной вычислительной машины на безламповых элементах”, которому свойственны “высокая производительность, достаточная надежность, малые габариты и простота технического обслуживания”. По рекомендации Междуведомственной комиссии Совет министров СССР принял постановление о серийном производстве “Сетуни” на Казанском заводе математических машин. Но почему-то троичный компьютер пришелся не по нраву чиновникам радиоэлектронного ведомства: они не обеспечили разработку серийного образца машины, а после того как он все-таки был осуществлен с использованием конструктивов выпускавшейся заводом машины М-20, не содействовали наращиванию выпуска в соответствии с растущим числом заказов, в частности, из-за рубежа, а наоборот, жестко ограничивали выпуск, отклоняя заказы, и в 1965 г. полностью прекратили, причем воспрепятствовали освоению машины в ЧССР, планировавшей ее крупносерийное производство. Поводом для этой странной “политики” могла быть рекордно низкая цена “Сетуни” - 27,5 тыс. рублей, обусловленная бездефектным производством ее магнитных цифровых элементов на Астраханском заводе ЭА и ЭП, по 3 руб. 50 коп. за элемент (в машине было около 2 тыс. элементов). Существенно то, что электромагнитные элементы “Сетуни” позволили осуществить пороговую реализацию трехзначной логики

наредкость экономно, естественно и надежно. Опытный образец машины за 17 лет эксплуатации в ВЦ МГУ, после замены на первом году трех элементов с дефектными деталями, не потребовал никакого ремонта внутренних устройств и был уничтожен в состоянии полной работоспособности. Серийные машины устойчиво функционировали в различных климатических зонах от Одессы и Ашхабада до Якутска и Красноярска при отсутствии какого-либо сервиса и запчастей.

Благодаря простоте и естественности архитектуры, а также рационально построенной системе программирования, включающей интерпретирующие системы: ИП-2 (плавающая запятая, 8 десятичных знаков), ИП-3 (плавающая запятая, 6 десятичных знаков), ИП-4 (комплексные числа, 8 десятичных знаков), ИП-5 (плавающая запятая, 12 десятичных знаков), автокод ПОЛИЗ с операционной системой и библиотекой стандартных подпрограмм (плавающая запятая, 6 десятичных знаков), машины “Сетунь” успешно осваивались пользователями в вузах, на промышленных предприятиях и в НИИ, оказываясь эффективным средством решения практически значимых задач в самых различных областях от научно-исследовательского моделирования и конструкторских расчетов до прогноза погоды и оптимизации управления предприятием [7]. На семинарах пользователей вычислительных машин “Сетунь”, проведенных в МГУ (1965 г.), на Людиновском тепловозостроительном заводе (1968 г.), в Иркутском политехническом институте (1969 г.) были представлены десятки сообщений о результативных народно-хозяйственных применениях этих машин. “Сетунь”, благодаря естественности троичного симметричного кода, оказалась поистине универсальным, несложно программируемым и весьма эффективным вычислительным инструментом, положительно зарекомендовавшим себя, в частности, как техническое средство обучения вычислительной математике более чем в тридцати вузах. А в военно-воздушной инженерной академии им. Жуковского именно на “Сетуни” была впервые реализована автоматизированная система компьютерного обучения [8].

Троичная система счисления основана на том же позиционном принципе кодирования чисел, что и принятая в современных компьютерах двоичная система, однако вес i -ой позиции (разряда) в ней равен не 2^i , а 3^i . При этом сами разряды не двухзначны (не биты), а трехзначны (триты) - помимо 0 и 1 допускают третье значение, которым в симметричной системе служит -1 , благодаря чему единообразно

представимы как положительные, так и отрицательные числа. Значение n -тритного целого числа N определяется аналогично значению n -битного:

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i 3^i = \alpha_{n-1} 3^{n-1} + \alpha_{n-2} 3^{n-2} + \alpha_i 3^i + \dots + \alpha_1 3 + \alpha_0$$

где $\alpha_i \in \{1, 0, -1\}$ - значение цифры i -го разряда.

Цифры в тритной симметричной системе целесообразно обозначать их знаками, т.е. вместо 1, 0, -1 писать +, 0, -. Например, десятичные числа 13, 7, 6, -6 в такой тритной записи будут: 13 = +++, 7 = ++-, 6 = +-0, -6 = --0. Изменение знака числа в симметричном коде равносильно потритной инверсии, т.е. взаимозамене всех “+” на “-” и всех “-” на “+”. Операции сложения и умножения в тритном симметричном коде определены таблицами:

		+	0	-
+		+-	+	0
0		+	0	-
-		0	-	-+

		+	0	-
+		+	0	-
0		0	0	0
-		-	0	+

В отличие от двоичной это арифметика чисел со знаком, причем знаком числа оказывается цифра старшего из его значащих (ненулевых) разрядов. Проблемы чисел со знаком, не имеющей в двоичном коде совершенного решения, в тритном симметричном коде просто нет, чем и обусловлены его принципиальные преимущества.

Машина “Сетунь” может быть охарактеризована как одноадресная, последовательного действия, с 9-тритным кодом команды, 18-тритными регистрами сумматора S и множителя R , 5-тритными индекс-регистром модификации адреса F и счетчиком-указателем выполняемых команд C , а также однобитным указателем знака результата ω , управляющим условными переходами.

Оперативная память - 162 9-тритных ячейки - разделена на 3 страницы по 54 ячейки для постраничного обмена с основной памятью - магнитным барабаном емкостью 36 либо 72 страницы. Считывание и запись в оперативную память возможны 18-тритными и 9-тритными

словами, причем 9-битное слово соответствует старшей половине 18-битного в регистрах S и R . Содержимое этих регистров интерпретируется как число с фиксированной после второго из старших разрядов запятой, т.е. по модулю оно меньше 4,5. При вычислениях с плавающей запятой мантисса M нормализованного числа удовлетворяет условию $0,5 < |M| < 1,5$, а порядок представлен отдельным 5-битным словом, интерпретируемым как целое со знаком.

Страничная двухступенная структура памяти с пословной адресацией в пределах трех страниц ОЗУ, обходящейся 5-битными адресами и соответственно 9-битными командами, обусловила необыкновенную компактность программ и вместе с тем высокое быстродействие машины, несмотря на то, что в интерпретирующих системах магнитный барабан функционирует как оперативная память.

В 1967 - 69 гг. на основе опыта создания и практических применений машины “Сетунь” разработана усовершенствованная троичная цифровая машина “Сетунь 70”, опытный образец которой вступил в строй в апреле 1970 г. Это была машина нетрадиционной двухстековой архитектуры, ориентированной на обеспечение благоприятных условий дальнейшего развития ее возможностей методом интерпретирующих систем [9].

Принятие арифметического стека (стека 18-битных операндов) обусловлено использованием в качестве машинного языка так называемой польской инверсной записи программ (ПОЛИЗ), положительно зарекомендовавшей себя в одноименном интерпретаторе на “Сетуни”. ПОЛИЗ-программа состоит не из команд той или иной адресности, а является последовательностью коротких слов - 6-битных трайтов (троичных байтов). Как элемент программы трайт может быть либо адресным, либо операционным. Адресный трайт либо используется в качестве операнда предшествующим операционным, либо воспринимается как предписание заслать в стек операндов из оперативной памяти адресуемое слово от одного до трех трайтов. В оперативной памяти всего 9 страниц по 81 трайту, причем открыты для доступа в данный момент три страницы, номера которых указаны в так называемых “регистрах приписки”.

Операционный трайт указывает операции, а вернее процедуры, выполняемые над стеком операндов, а также над регистрами процессора. Всего предусмотрена 81 операция - 27 основных, 27 служебных и 27 программируемых пользователем.

Второй (системный) стек, содержащий адреса возврата при обработке прерываний и при выполнении вложенных подпрограмм, позволил успешно реализовать на “Сетуни 70” идею структурированного программирования Э.Дейкстры, введя операции вызова подпрограммы, вызова по условию и циклического выполнения подпрограмм. Осуществленное таким образом процедурное структурированное программирование на практике подтвердило заявленные Дейкстрой преимущества его метода: трудоемкость создания программ сократилась в 5 - 7 раз,

благодаря исключению традиционной “отладки” тестированием на конкретных примерах, причем программы обрели надлежащую надежность, упорядоченность, понятность и модифицируемость. В дальнейшем эти особенности архитектуры “Сетуни 70” послужили основой диалоговой системы структурированного программирования ДССП, реализованной на машинах серии ДВК и на последующих персональных компьютерах [10, 11].

К сожалению, дальнейшее развитие заложенных в “Сетуни 70” возможностей путем разработки ее программного оснащения было административным порядком прекращено. Пришлось переориентироваться на компьютеризацию обучения. “Сетунь 70” стала основой для разработки и реализации автоматизированной системы обучения “Наставник” [12, 13], воплотившей принципы “Великой дидактики” Яна Амоса Коменского. Назначение компьютера в этой системе не “электронное перелистывание страниц” и не мультимедийные эффекты, а отслеживание верности понимания учащимся того, чему он учится, своевременное преодоление заблуждений и обеспечение путем обоснованно назначаемых упражнений реального овладения предметом обучения. Вместе с тем компьютер протоколирует ход занятия, предоставляя разработчику учебного материала возможность оценивать эффективность используемых дидактических приемов и совершенствовать их.

Учебный материал в “Наставнике” предоставляется учащимся в печатном виде с пронумерованными секциями, абзацами, упражнениями и справками к ошибочным ответам, благодаря чему при помощи простейшего терминала с цифровой клавиатурой и калькуляторным индикатором компьютер без гипертекстового дисплея легко и безвредно взаимодействует с обучаемым, придавая книге недостающую ей способность диалога с читателем. Создание учебных материалов для “Наставника” не связано с программированием компьютера и, как показала практика, разработка вполне удовлетворительных пособий по математике, физике, английскому языку и другим предметам посильна школьным учителям. Дидактическая эффективность этой немудреной системы оказалась на редкость высокой. Так, курс “Базисный Фортран” студенты факультета ВМК МГУ проходили в “Наставнике” за 10 - 15 часов, студенты экономического факультета - за 15 - 20 часов, показывая затем в практикуме более совершенное умение программировать на Фортране, чем после обычного семестрового курса.

Реализованный в “Наставнике” принцип “книга+компьютер” обусловил оптимальное использование компьютера как средства обучения практически во всех отношениях: необходимая аппаратура (микрокомпьютер и подключенные к нему 3-4 десятка терминалов, подобных простейшему калькулятору) предельно дешева, надежна и легко осваивается как учащимися, так и преподавателями, работа в режиме диалога с книгой неустомительна, увлекательна и при надлежащей организации изложения гарантирует быстрое и полноценное

усвоение изучаемого предмета. Применение системы в МГУ, МАИ, ВИА им. Куйбышева, в средней школе и для профессионального обучения на ЗИЛе подтвердили ее высокую эффективность в широком спектре предметов и уровней обучения. Вместе с тем “Наставник” уже более 30 лет постоянно используется на факультете ВМиК для автоматизированного проведения контрольных работ, а также тестирования поступивших на факультет, определяющего уровень владения английским языком для комплектования однородных учебных групп.

Однако при, казалось бы, насущной потребности действенного усовершенствования процесса обучения в наш “информационный” век “Наставник” не был востребован. Повидимому, слишком прост и дешев, да и какая же это компьютерная система, без дисплея, мышки и гипертекста. Ведь ИТ-оснащенность учебного процесса все еще принято оценивать не по уровню и качеству обучения, а по количеству и мощности вовлеченных в него компьютеров.

Л и т е р а т у р а

1. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Получисленные алгоритмы. Т.2. - М.: МИР, 1977. С.218.
2. Shannon C.E. A symmetrical notation for numbers. // The American mathematical monthly, v.57, n.2, Feb. 1950, pp.90-93.
3. Брусенцов Н.П. Заметки о троичной цифровой технике. // Архитектура и программное оснащение цифровых систем. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. С.114-123.
4. Брусенцов Н.П. Вычислительная машина “Сетунь” Московского государственного университета. // Новые разработки в области вычислительной математики и вычислительной техники. - Киев, 1960. С.226-234.
5. Малая цифровая вычислительная машина “Сетунь” / Н.П.Брусенцов, С.П.Маслов, В.П.Розин, А.М.Тишулина. - М.: Изд-во МГУ, 1965. 145 с.
6. Жоголев Е.А. Система команд и интерпретирующая система для машины “Сетунь”. // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1961, №3. С.499-512.
7. Аннотированный указатель программ для вычислительной машины “Сетунь” / Н.П.Брусенцов, В.А.Морозов. - М.: ОНТИ ВЦ МГУ, 1968, выпуск 2, 1971.
8. Кузнецов С.И. и др. Материалы по математическому обслуживанию ЭЦВМ “Сетунь”, - М.: Изд-во ВВИА им. Жуковского, 1964.
9. Брусенцов Н.П., Жоголев Е.А. Структура и алгоритм функционирования малой вычислительной машины. // Вычислительная техника и вопросы кибернетики. Вып. 8. Л: Изд-во Ленингр. ун-та, 1971. С. 34-51.

10. ДССП - диалоговая система структурированного программирования / Н.П.Брусенцов, Г.В.Златкус, И.А.Руднев // Программное оснащение микрокомпьютеров. - М.: Изд-во МГУ, 1982. С.11-40.

11. Развиваемый адаптивный язык РАЯ диалоговой системы программирования ДССП / Н.П.Брусенцов, В.Б.Захаров, И.А.Руднев, С.А.Сидоров, Н.А.Чанышев. - М.: Изд-во МГУ, 1987. 80 с.

12. Автоматизированная система обучения "Наставник" / Н.П.Брусенцов, С.П.Маслов, Х.Рамиль Альварес // Вычислительная техника и вопросы кибернетики. Вып.13. - М.: Изд-во МГУ, 1977. С.3-17.

13. Микрокомпьютерная система обучения "Наставник" / Н.П.Брусенцов, С.П.Маслов, Х.Рамиль Альварес. - М.: Наука, Физматлит, 1990. 223 с.

Система команд машины "Сетунь"

Код операции	Название операции	Содержание команды	Выработка ω	Время выполнения в мксек
-0-0	Считывание с МБ	$[M] \Rightarrow [\Phi_a]$	Сохраняется	7500
-000	Ввод-вывод	Ввод в Φ_a Вывод из Φ_a	Сохраняется	-
-0+0	Запись на МБ	$[\Phi_a] \Rightarrow [M]$	Сохраняется	7500
-+-0	Нормализация	Норм (S) \Rightarrow (A); N \Rightarrow (S)	ω (S)	$275+5 N $
-+00	Сдвиг	Сдв (S) на (A) \Rightarrow (S)	ω (S)	$290+5 N $
-++0	Запись из S	(S) \Rightarrow (A)	ω (S)	225
0--0	Сложение в F	(A)+(F) \Rightarrow (F)	ω (F)	180
0-00	Посылка в F	(A) \Rightarrow (F)	ω (F)	180
0-+0	Сложение в C с посылкой в F	(A)+(C) \Rightarrow (F)	ω (F)	180
00-0	Запись из F	(F) \Rightarrow (A)	ω (F)	180
0000	Безусловный переход (БП)	A \Rightarrow (C)	Сохраняется	100
00+0	Запись из C	(C) \Rightarrow (A)	Сохраняется	180
0+-0	Условный переход УП-	A \Rightarrow (C) при $\omega=-$	Сохраняется	100,180
0+00	Условный переход УПО	A \Rightarrow (C) при $\omega=0$	Сохраняется	100,180
0++0	Условный переход УП+	A \Rightarrow (C) при $\omega=+$	Сохраняется	100,180
+--0	"Останов"	"Останов"; (A) \Rightarrow (R)	ω (R)	180
+ -00	Поразрядное умножение	(A) \otimes (S) \Rightarrow (S)	ω (S)	180
+ -+0	Посылка в R	(A) \Rightarrow (R)	ω (R)	180
+0-0	Вычитание в S	(S) - (A) \Rightarrow (S)	ω (S)	180
+000	Посылка в S	(A) \Rightarrow (S)	ω (S)	180
+0+0	Сложение в S	(S) + (A) \Rightarrow (S)	ω (S)	180
++-0	Умножение1	(A) + (S) (R) \Rightarrow (S)	ω (S)	320
++00	Умножение2	(S) \Rightarrow (R); (A) (R) \Rightarrow (S)	ω (S)	320
+++0	Умножение3	(S) + (A) (R) \Rightarrow (S)	\square (S)	320

Доложено на Международной научной конференции «SORUCON.2006: Развитие вычислительной техники в России и странах бывшего СССР: история и перспективы» Петрозаводск, 3-7 июля 2006 г.

Опубликовано: SORUCON.2006: Развитие вычислительной техники в России и странах бывшего СССР: история и перспективы: материалы междунар. конф. (3-7 июля 2006 года): В 2 ч. Ч. 1. – Петрозаводск. 2006. С. 45- 51.