

Троичная система счисления, трехзначная логика и ЭВМ на их основе

Б. М. Малашевич

От составителя

Многие читатели, наверно, слышали о том, что общепринятая в компьютерной области двоичная система счисления — всего лишь традиция, исторически сложившийся результат сложного компромисса математиков, схемотехников и проектировщиков, причем с учетом требований из смежных областей: связи или теории шифрования и кодирования. На раннем этапе двоичная система была далеко не единственным кандидатом для новой области: известные уже несколько веков механические калькуляторы работали в десятичной системе, и, например, разработчики первого электронного компьютера ENIAC последовали их примеру. Тщательно разобрав этот вопрос, теоретики обнаружили, что наиболее выгоднейшей системой счисления для электронной вычислительной техники будет троичная. Однако почти все без исключения авторы — предшественники Н. П. Брусенцова, отдавая должное троичной системе в применении к цифровым компьютерам, тут же делают оговорку, что технические сложности при конструировании соответствующих элементов заставляют рассматривать двоичную систему, как близкую по экономичности, но гораздо более простую в реализации.

Заслуга Николая Петровича Брусенцова в том, что, наткнувшись в процессе своих изысканий на феррит-диодные магнитные элементы, разработанные в лаборатории профессора Льва Израилевича Гутенмахера¹ в Институте точной механики и вычислительной техники (ИТМ и ВТ), он немедленно осознал возможность их применения в качестве простых, надежных и дешевых троичных логических элементов для вычислительной техники и тем самым открыл реальный путь к практической реализации того, что остальные рассматривали лишь, как любопытную гипотетическую возможность. При этом собственная разработка Л. И. Гутенмахера — ЭВМ ЛЭМ-1 на феррит-диодных элементах, аналогичных тем, что с некоторыми доработками применил Брусенцов в своей машине², заметного следа в истории компьютерной техники не оставила и упоминается обычно лишь в контексте истории Брусенцова и «Сетуни». Феррит-диодные элементы, кроме машины Брусенцова, были

¹ Лев Израилевич Гутенмахер (1908–1981) — советский математик, один из основателей физического моделирования природных и информационных систем с помощью электрических сетей. До создания ИТМ и ВТ в 1948 году его лаборатория электро моделирования (ЛЭМ) входила в состав Энергетического института АН СССР, а с 1957 года вошла в состав Всесоюзного института научной и технической информации (ВИНИТИ). — *Прим. сост.*

² Подробнее см., например, Евгений Лебедеко [«Tertium datur: другие компьютеры»](#). — *Прим. сост.*

использованы по крайней мере еще в одном заметном проекте 1960-х годов: в комплексе управления сложными производствами СОУ-1, разработанном в северодонецком филиале СКБ-245 (ныне северодонецкое НПО «Импульс»).

Получив возможность сконструировать уникальную ЭВМ на основе принципов, которым больше никто даже не пробовал следовать, Н. П. Брусенцов проявил упорство, трудолюбие и талант, сделавшие невозможное возможным. Он доказал, что преимущества троичной системы отнюдь не в мизерной экономии элементов, что в настоящее время практически потеряло всякое значение, а в намного более простой и естественной арифметике и логике, приближенной к естественному мышлению человека. Потому Н. П. Брусенцов вписал свое имя в историю далеко не только советской компьютерной техники — его достижение получило всемирную известность, навсегда оставшись одной из самых замечательных вех на пути становления «информационного века», в котором мы все сейчас живем.

Ю. В. Ревич

Идея использования троичной системы счисления в вычислительной технике имеет глубокую историю. Первое известное упоминание о реальном применении троичной системы относится к XIII веку. Известная «логическая машина» Раймунда Луллия (1235–1315) на бумаге в виде круговых диаграмм с секторами была именно троичной. Первым же упоминанием о технической реализации троичного счетного устройства является описание счетной машины Томаса Фаулера, сделанное шотландским математиком Августом де Морганом в 1840 году.

Томас Фаулер (Thomas Fowler, 1777–1843) был известным изобретателем своего времени: одним из самых значительных его изобретений была система центрального отопления, подобная современным. Из-за ошибки при патентовании его идея была украдена. Поэтому разработку троичной счетной машины Томас Фаулер держал в секрете до самого конца, и лишь завершив ее, пригласил известнейших людей своего времени (в том числе и де Моргана) на демонстрацию.

История создания счетной машины Томасом Фаулером началась с написания «Таблиц для упрощения вычислений». Работая казначеем, Фаулер постоянно имел дело с финансовыми вычислениями, осложненными десятичной английской денежной системой. Фаулер обнаружил, что подобные вычисления гораздо проще выполнять над числами с малыми основаниями (два и три). Углубившись в изучение этого вопроса, в 1838 году он составил и издал таблицы для упрощения вычислений.

Книга Фаулера содержала таблицы двоичных чисел в десятичном диапазоне от 1 до 130 048 и таблицы троичных чисел в симметричном коде в десятичном диапазоне от 1 до 3 985 807. Кроме того, книга содержала подробные инструкции по выполнению ряда операций с помощью этих таблиц.



Макет счетной машины Томаса Фаулера

К 1840 году Фаулер разработал и построил работающий макет счетной машины. Машина оперировала трехразрядными (в современной терминологии) троичными числами со знаком и выполняла над ними операции умножения и деления. В совокупности с опубликованными таблицами, с помощью этой машины можно было выполнять вычисления над большими числами. Сам Фаулер отмечал, что применение его машины эффективно лишь при большом количестве повторяющихся вычислений.

Макет, созданный Фаулером, был изготовлен из дерева и имел размеры 180×90×30 сантиметров. Такие большие размеры объяснялись низкой механической точностью, которую обеспечивало дерево. По словам Фаулера, металлический вариант машины был бы не больше настольной печатающей машинки. В 1999 году группа энтузиастов, наткнувшись на описание машины, сделанное де Морганом, воссоздала машину Томаса Фаулера. Работающий макет счетной машины Томаса Фаулера хранится в Большом Торрингтонском музее в Англии.

От составителя

О других предшественниках Н. П. Брусенцова упоминает Дональд Кнут в своем обстоятельном труде «Искусство программирования» [9.14], первое издание которого вышло в 1969 году:

«В „чистом“ виде уравновешенная троичная система счисления появилась в статье изобретателя механических вычислительных устройств Леона Лаланна (Leon Lalanne) [Comptes Rendus Acad. Sei. Paris 11 (1840), 903–905]. Система оставалась незамеченной до тех пор, пока спустя 100 лет после публикации Лаланна в Электротехническом институте Мура в 1945–1946 годах не стали разрабатывать первые электронные вычислительные машины. В то время она наряду с двоичной системой серьезно рассматривалась в качестве возможной альтернативы десятичной системе».

Видимо, именно в процессе упомянутых Кнутом дискуссий о наилучшей системе счисления в Муровском институте возникло доказательство того, что

симметричная троичная система (в терминах Д. Кнута — «уравновешенная») является самой экономичной с точки зрения количества элементов при построении электронных вычислительных машин³ (в подробном изложении читатель может ознакомиться с этим рассуждением в [9.15, § 14]). Троичная система рассматривалась в обстоятельной англоязычной монографии «High-speed computing devices», вышедшей в 1950 году (с. 287–289), причем в 1952 году в СССР был опубликован ее перевод [9.16]. Еще за несколько лет до этого советский математик Л. Д. Кудрявцев в своей статье «Успехи математических наук» [9.17] указывает, что «с точки зрения экономики числа употребляемых знаков из этих систем большей частью (учитывая значность чисел, используемых обычно машинами) оказывается наиболее выгодной троичная система».

Авторитетный Дональд Кнут высоко оценил троичную систему: «Быть может, самой изящной из всех систем счисления является уравновешенная троичная система счисления (по основанию 3), в которой вместо цифр 0, 1 и 2 используются „триты“ (троичные цифры) —1, 0 и +1». Он далее упоминает «Сетунь» Н. П. Брусенцова и, заключая эту тему, высказывает надежду, что «возможно, симметричные свойства и простая арифметика этой системы счисления окажутся в один прекрасный день весьма существенными (когда „флип-флоп“ заменится „флип-флэп-флопом“)⁴».

Троичная арифметика и трехзначная логика

В описании троичной вычислительной машины «Сетунь» [9.2], сделанном авторами разработки, приведены следующие характеристики троичной системы счисления.

1. Троичное кодирование на 59% экономнее десятичного и на 5,4% экономнее двоичного. При этом для представления чисел с одинаковой точностью троичных разрядов требуется в 2,10 раза больше, чем десятичных, и в 1,58 раза меньше, чем двоичных. Последнее позволяет в машине последовательного действия при данной тактовой частоте сократить за счет использования троичной системы счисления время выполнения арифметических операций в 1,5–2 раза по сравнению со временем выполнения их с двоичными числами.

³ Борис Яковлевич Фельдман (впоследствии — сотрудник ИНЭУМ), принимавший участие в разработке «Сетуни», указывает, что впервые это рассуждение распространилось в СССР благодаря кандидатской диссертации Михаила Александровича Карцева [9.18 с. 19]. Диссертация Карцева была защищена в 1956 году, и посвящена принципам построения арифметических устройств цифровых вычислительных машин.

⁴ Слово сочетание «flip-flap» (дословно «щелчок-шлепок») означает в английской технической литературе элемент с двумя устойчивыми состояниями. По аналогии «flip-flap-flap» (дословно «щелчок-хлопок-шлепок») должно означать элемент с тремя устойчивыми состояниями. — Прим. переводчика книги «Искусство программирования» Д. Кнута.

2. Благодаря тому, что основание 3 нечетно, в троичной системе возможно симметричное относительно нуля расположение цифр: $-1, 0, 1$, с которым связано два ценных свойства: естественность представления относительных чисел и отсутствие проблемы округления. Наличие положительного и отрицательного значений позволяет непосредственно представлять как положительные, так и отрицательные числа. При этом нет необходимости в специальном разряде знака и не надо вводить дополнительный (или обратный) код для выполнения арифметических операций с относительными числами. Все действия над числами, представленными в троичной системе счисления со значениями $0, 1, -1$, выполняются естественно с учетом знаков чисел. Знак числа определяется знаком старшей значащей цифры числа: если она положительна, то и число положительно, если отрицательна, то и число отрицательно. Для изменения знака числа надо изменить знаки всех его цифр (то есть инвертировать его код).

Н. П. Брусенцов пишет: *«Арифметические операции в троичной симметричной системе практически не сложнее двоичных, а если учесть, что в случае чисел со знаком двоичная арифметика использует искусственные коды, то окажется, что троичная даже проще. Операция сложения всякой цифры с нулем дает в результате эту же цифру. Сложение $+1$ с -1 дает нуль. И только сумма двух $+1$ или двух -1 формируется путем переноса в следующий разряд цифры того же знака, что и слагаемые и установки в текущем разряде цифры противоположного знака. Пример:*

$$\begin{array}{r}
 111011101010 \\
 + \\
 \hline
 11101110100 \\
 \hline
 101110011110
 \end{array}$$

В трехходовом троичном сумматоре перенос в следующий разряд возникает в 8 ситуациях из 27, а в двоичном — в 4 из 8».

3. Другим полезным следствием симметричного расположения значений цифр является отсутствие проблемы округления чисел: абсолютная величина части числа, представленной отбрасываемыми младшими цифрами, никогда не превосходит половины абсолютной величины части числа, соответствующей младшей значащей цифре младшего из сохраняемых разрядов (младший разряд всегда меньше половины старшего). Следовательно, в результате отбрасывания младших цифр числа всегда получается наилучшее при данном количестве оставшихся цифр приближение этого числа, и округления не требуется.

В литературе [9.3] указывается, что использование троичного кодирования информации в сочетании со схемами, сигналы в которых квантуются по трем уровням, в цифровых устройствах управления, контроля и прогнозирования неисправностей в сложных системах может оказать влияние на структурную организацию цифровых устройств. Возможность получения преимуществ здесь возникает в связи с применением более удобных устройств сопряжения цифровых следящих систем, цифровых систем передачи информации и исполнительных устройств, сигналы в которых, как правило, имеют троичный характер.

Таким образом, троичная система счисления и трехзначная диалектическая логика Брусенцова с симметричным кодом $(-1, 0, +1)$, по сравнению с традиционной двоичной системой, обладает рядом ценных свойств, не реализуемых в принятой двоичной системе.

Троичная ЭВМ «Сетунь»

В 1956 году академик Сергей Львович Соболев⁵, блестящий математик, широко эрудированный ученый, одним из первых в стране понявший значение вычислительной техники, в то время заведующий кафедрой вычислительной математики МГУ им. М. В. Ломоносова, выступил с инициативой разработки в МГУ малогабаритной, недорогой и простой в использовании ЭВМ для решения научно-технических задач средней сложности. С этой целью в механико-математическом факультете была создана специальная лаборатория во главе с молодым инженером Николаем Брусенцовым.

Одновременно Сергей Львович организовал семинар, в котором участвовали и крупные математики того времени, и сотрудники лаборатории. На семинаре обсуждались идеи и проблемы оптимизации архитектуры и технической реализации компьютеров, обсуждались варианты решений создаваемой машины. Как вспоминает Н. П. Брусенцов: *«Мы с моим коллегой Евгением Жоголевым⁶ изобретали, а старшие товарищи наводили на нас критику.*

⁵ Сергей Львович Соболев (1908–1989) — академик АН СССР, один из крупнейших отечественных математиков. Сопратник Курчатова по атомному проекту, инициатор создания Вычислительного центра МГУ и один из основателей Новосибирского академгородка. — *Прим. сост.*

⁶ Евгений Андреевич Жоголев (1930–2003) — один из первых отечественных программистов, сотрудник (позднее — заведующий) отделом ВЦ МГУ. К началу работы над «Сетунью» был уже опытным программистом: участвовал в разработке программного обеспечения ЭВМ М-2 и «Стрелы». Позднее — соавтор первого отечественного учебника по программированию для высшей школы (Жоголев Е. А., Трифонов Н. П. Курс программирования. — М.: Наука, 1964). — *Прим. сост.*

Это, кстати, нам очень помогло двигаться вперед». Намерения строить именно троичную машину у разработчиков изначально не было.



Николай Петрович Брусенцов в 1960-е годы

С. Л. Соболев устроил Н. П. Брусенцову стажировку в лаборатории у Льва Израилевича Гутенмахера⁷ в ИТМ и ВТ АН СССР, где создавалась двоичная ЭВМ на магнитных элементах. Н. П. Брусенцов рассказывал: *«Именно тогда у меня возникла мысль использовать троичную систему счисления. Она позволяла создать очень простые и надежные элементы, уменьшала их число в машине в семь раз по сравнению с элементами, используемыми Гутенмахером. Существенно сокращались требования к мощности источников питания, к отбраковке сердечников и диодов, и, главное, появилась возможность использовать натуральное кодирование чисел*

⁷ Лев Израилевич Гутенмахер (1908–1981) — крупнейший отечественный ученый в области электрического моделирования. С 1948 по 1956 год лаборатория электро моделирования Гутенмахера входила в Институт точной механики и вычислительной техники АН СССР, где он выдвинул собственную концепцию ЭВМ на основе феррит-диодных элементов. — *Прим. сост.*

вместо применения прямого, обратного и дополнительного кодов чисел. После стажировки я разработал и собрал схему троичного сумматора, который оказался надежным и сразу же заработал». Проработка показала, что на основе таких элементов может быть реализована трехзначная версия пороговой логики с положительными и отрицательными весами [9.1], на основе которой можно построить троичную ЭВМ. С докладом о возможностях исследованной элементной базы он выступил 7 января 1956 года на семинаре Соболева. После обстоятельного обсуждения было решено создавать машину на феррит-диодных элементах с использованием троичной системы счисления. «Летом 57-года на пляже в Новом Афоне я прорисовал в тетрадке все детали будущей машины», — вспоминал Брусенцов.

В [9.2] указывается, что «по мере создания трехзначных логических элементов и троичных функциональных схем становилось все более очевидным, что неизбежно возникающее на базовом уровне усложнение узлов троичной машины по сравнению с двоичной с избытком возмещается простотой и естественностью устройства машины на более высоких уровнях, гармоничностью троичной архитектуры в целом. В троичном варианте обеспечивались более высокое, по сравнению с двоичным, быстродействие, экономия оборудования и лучшая надежность. Уже в конце 1956 г. однозначно определилось решение сделать машину троичной. В процессе разработки в ней нашли воплощение ряд оригинальных идей, относящихся к троичным логическим и запоминающим устройствам, и было получено несколько авторских свидетельств на изобретения».

Так началась история первой в мире троичной ЭВМ «Сетунь», названной по имени речки, протекавшей около университета. «Сетунь» была машиной с арифметическим устройством последовательного действия и блоком быстрого умножения, благодаря чему достигнуто быстродействие 1–2 тыс. операций в секунду, то есть на уровне параллельных машин того времени.

Главные особенности ЭВМ «Сетунь»:

- троичная симметричная (с положительными и отрицательными значениями цифр) система представления чисел и команд;
- трехзначная логика;
- страничная двухуровневая организация памяти;
- пороговая реализация трехзначной логики на электромагнитных элементах с двухпроводной передачей трехзначных сигналов;
- длина операндов 9 и 18 тритов (аналог бита в троичной системе, 1 трит соответствует 1,58 бита);
- система команд — 24 команды.

Приступая к созданию Сетуни, ее разработчики изначально ставили перед собой задачу построения недорогой, простой в освоении, обслуживании и использовании, малогабаритной, надежной машины для вузов, КБ, лабораторий. В качестве основного запоминающего устройства использовали магнитный барабан ЭВМ «Урал», связанный с небольшой, 3 страницы по 54 слова, оперативной памятью (в современном понимании — «кэш-память») постраничным обменом, что позволило как минимум в 10–20 раз увеличить производительность машины. Важнейшим фактором обеспечения простоты и практичности машины явилось представление чисел и команд в троичном симметричном коде. При длине слова 9 тритов и наборе всего лишь из 24 команд она была весьма эффективна при реализации широкого спектра алгоритмов, в том числе с плавающей запятой.

Набор машинных команд ЭВМ «Сетунь» был минимальным (всего 24 одноадресные команды), но полностью обеспечивал вычисления с фиксированной запятой и возможность программной реализации операций с плавающей запятой. В него были включены команды нормализации мантиссы числа при вычислениях с плавающей запятой, команды сдвига и команды комбинированного умножения со сложением, оптимизирующие вычисление полиномов, операция поразрядного умножения и три команды условного перехода по знаку результата.



Первый опытный экземпляр машины «Сетунь»

Первый экземпляр «Сетуни», сделанный руками сотрудников лаборатории под руководством Н. П. Брусенцова: Е. А. Жоголевым, С. П. Масловым, В. В. Веригиным, В. С. Березиным, Б. Я. Фельдманом, Н. С. Карцевой, А. М. Тишулиной, В. П. Розиным и др., был готов к концу 1958 года. На десятый день комплексной наладки машина заработала, что по тем временам было очень быстро. Она с блеском выдержала трехсуточные испытания, продемонстрировав соответствие всем заявленным параметрам и высокую надежность.

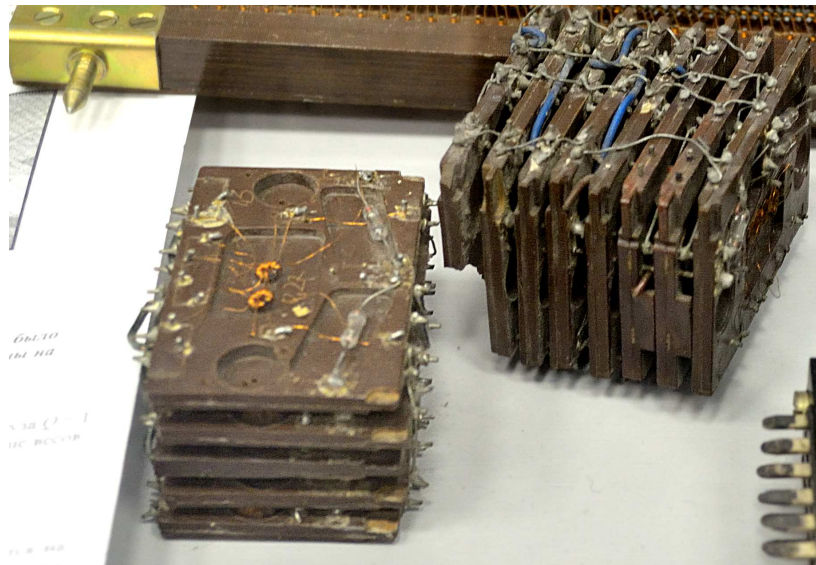
Основные характеристики «Сетуни» представлены в одноименном приложении в конце этого очерка.

Но не все шло гладко в судьбе Сетуни. «Осенью 1959 года, когда ЭВМ уже работала, представителей МГУ пригласили на Коллегию Государственного Комитета Радиоэлектроники — ГКРЭ. И там им сообщили, что с целью экономии государственных средств работы над ЭВМ „Сетунь“ прекращаются. На замечание С. Л. Соболева: „А вы хотя бы видели эту машину, ведь она уже существует?“, директор СКБ-245 В. В. Александров ответил: „Нам не надо ни видеть, ни знать — должна быть авторитетная бумага с печатями и подписями“. После коллегии Сергей Львович пошел в ЦК КПСС. Было принято решение провести межведомственные испытания ЭВМ, которые были проведены в апреле 1960 г. На них „Сетунь“ показала 95% полезного времени — это время, которое ЭВМ решает задачи по назначению, остальное время — профилактика и ремонт. Надежность ЭВМ тогда была низкая, 60% полезного времени считалось очень хорошим результатом», — вспоминает Брусенцов.

Постановлением Совмина СССР серийное производство «Сетуни» было поручено Казанскому заводу математических машин. Элементы выпускались на Астраханском заводе и делали их там превосходного качества, стоил элемент 3,5 руб. Никаких высоких технологий там использовано не было (см. фото элемента далее). Но руководство Казанского завода с самого начала относилось к «Сетуни» негативно. В действовавших тогда экономических условиях для завода она была невыгодной, слишком дешевой, всего 27,5 тыс. рублей со всей периферией. Выпускали по 12–20 машин в год, а вскоре и от этого отказались. За все время было выпущено около 50 ЭВМ, примерно 30 из них были поставлены в вузы, остальные — в различные НИИ. ЭВМ демонстрировалась на ВДНХ⁸. Географически машины были разбросаны по всей стране. Несмотря на практически полное отсутствие сервиса в

⁸ Фото первого промышленного образца «Сетуни», размещенного на ВДНХ, см. в очерке «Казанское производственное объединение вычислительных систем». — Прим. сост.

подавляющем большинстве машины были успешно освоены и нашли применение.



Феррит-диодная ячейка - основной элемент ЭВМ "Сетунь"

Благодаря простоте и естественности архитектуры, а также разработанной в ВЦ МГУ под руководством Е. А. Жоголева развитой системе программирования, ЭВМ «Сетунь» использовались в вузах, на промышленных предприятиях и в НИИ, оказываясь эффективным средством решения практически значимых задач в различных областях, от моделирования и конструкторских расчетов до прогноза погоды и оптимизации управления предприятием.

Разработчики взяли на себя и сопровождение выпущенных машин. Издаваемая ВЦ МГУ серия сборников «Математическое обслуживание машины «Сетунь» с описанием алгоритмов и текстами программ служила отличным пособием по программированию и способствовала созданию пользователями своих программ [9.7]. Для распространения опыта использования машин в разных городах проведены три семинара пользователей. «Сетунь» оказалась универсальным, несложно программируемым и эффективным вычислительным инструментом, зарекомендовавшим себя, в частности, как средство обучения вычислительной математике.

Большой интерес к покупке машины проявил ряд зарубежных стран, и Внешторг осуществил перевод ее документации на английский язык.

Чехословакия выразила желание купить лицензию и организовать у себя выпуск ЭВМ «Сетунь», они считали, что могли хорошо продавать ее в соответствии с рыночными ценами и получать при этом высокую прибыль. По их приглашению Н. П. Брусенцов ездил в Чехословакию, где ему показали завод «Зброевка Яна Шавермы», на котором планировалось выпускать «Сетунь». Завод его просто восхитил. Чехи уже приготовили для «Сетуни» магнитные барабаны, печатающее устройство, устройство ввода. В общем, все было готово для производства ЭВМ, не было только документации на нее.



Коллектив разработчиков ЭВМ «Сетунь». В первом ряду в центре Николай Петрович Брусенцов

Но когда Н. П. Брусенцов вернулся из Чехословакии, его вызвал референт председателя совета министров А. Н. Косыгина и попросил *«передать чешским товарищам, что документацию на „Сетунь“ они получат сразу после освоения крупносерийного производства этой машины в Советском Союзе»*. Что фактически означало — никогда. Как вспоминает Николай Петрович: *«позднее я узнал, что чехам говорили: все равно мы эту машину снимем с производства, так что вы ее не заказывайте. Вот так все и закончилось с „Сетунью“*. В начале 70-х нас из главного корпуса ВЦ переселили на чердак общежития. А „Сетунь“, несмотря на то, что она

была полностью исправной и загруженной задачами, через пару лет была уничтожена — ее разрезали и выкинули на свалку».

Сработало лобби ГКРЭ⁹: они не желали допускать в свои производственные мощности чужого главного конструктора, тем более со странной троичной ЭВМ, превосходящей по характеристикам ЭВМ того же класса их родных конструкторов. Тот факт, что «Сетунь» надежно и эффективно работала во всех климатических зонах, причем без какого-либо сервиса и по существу без запасных частей, в расчет не принимался. Н. П. Брусенцов вспоминает: *«В Якутске „Сетунь“ была в астрофизическом институте. У них была какая-то сложная задача, которую они в течение двух лет не могли поставить на большой машине „Урал-2“. Потом кто-то сказал: „Давайте попробуем на ‘Сетуни’“. Все решили, что это шутка. Однако через полтора месяца задача была решена».*

И то, что на поставку Сетуни было очень много заявок не только внутри страны, но и из-за рубежа, и не только из соцстран, но также и из таких стран, как США и Англия, так же во внимание принято не было.

От составителя

Реальная осуществимость планов чехословацких товарищей, собиравшихся производить «Сетунь» и продавать ее на внешнем рынке, не подлежит сомнению. Дефицит ЭВМ в начале 1960-х годов в странах восточного блока был огромным, а «Сетунь» была неприхотливой и дешевой машиной. Вопрос совместимости программного обеспечения еще не стоял так остро, как это произошло по мере увеличения парка компьютеров и проникновения их во все отрасли народного хозяйства. В силу ее уникальности, машиной активно интересовались и на Западе. Если бы не гигантомания и упертость советских чиновников, «Сетунь» вполне могла стать стандартом малых машин по крайней мере в сфере советского влияния, и тогда вся история вычислительной техники была бы несколько иной. Как указывалось в очерке «Казанское производственное объединение вычислительных систем», Б. М. Малашевич считает, что Брусенцову необходимо было перейти на работу в Минрадиопром (который считался основным разработчиком вычислительной техники — к нему, в частности, относился Казанский завод ЭВМ, на котором выпускалась «Сетунь»). Но представить себе кабинетного ученого Брусенцова на месте обычного отраслевого конструктора тех лет, основная задача которого, по словам бывшего главного инженера КЗЭВМ В. Ф. Гусева, состоит в том, чтобы «лбом пробивать стенку»¹⁰, как-то... не получается.

⁹ Государственный комитет по радиоэлектронике, существовал с 1957 по 1965 год, преобразован в Министерство радиопромышленности СССР. Возглавлялся В. М. Калмыковым (1908–1974). — *Прим. сост.*

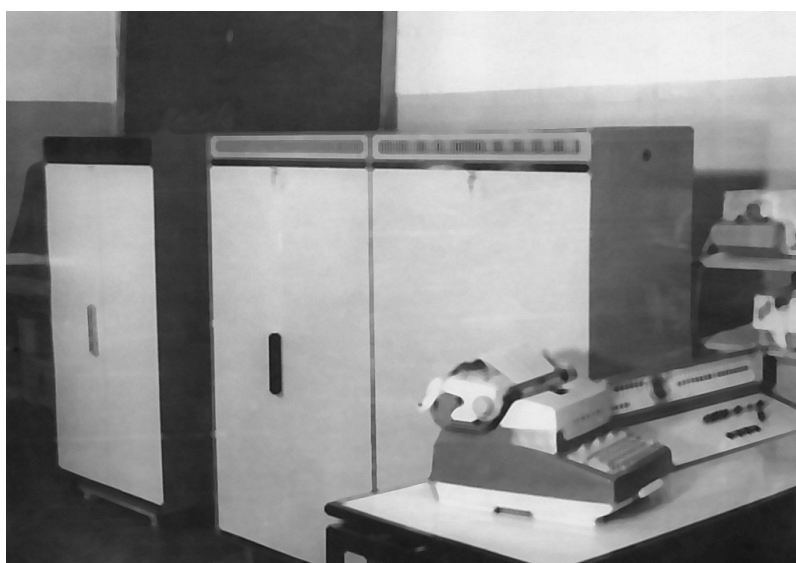
¹⁰ См. очерк «Информационные технологии и противоракетная оборона». — *Прим. сост.*

Производство «Сетуни» было прекращено. Но ее разработчики продолжали работу.

Троичная ЭВМ «Сетунь-70»

В 1961–1968 годах, на основе приобретенного опыта Н. П. Брусенцов вместе с Е. А. Жоголевым разработали архитектуру новой двухстековой троичной ЭВМ, названной затем «Сетунь-70». В ней достоинства троичности воплощены с более обстоятельным пониманием и полнотой, в частности:

- установлен троичный формат для кодирования алфавитных символов (аналог двоичного байта) — трайт из шести тритов;
- пополнен набор операций трехзначной логики и «троичных» команд управления ходом выполнения программы;
- увеличены возможности операций с числами различной длины: один трайт, два трайта, три трайта, с допустимой длиной результата до шести трайтов.



Троичная ЭВМ «Сетунь-70»

Весной 1970 года образец ЭВМ, названный «Сетунь-70», уже работал — это был подарок стране от МГУ к 100-летию со дня рождения В. И. Ленина.

В техническом отношении «Сетунь-70» характеризуется рядом усовершенствований по сравнению с «Сетунией» [9.4]. Она имела

двухстековый (стек операндов — развитие регистра-аккумулятора одноадресной ЭВМ и стек адресов возврата — основа механизма управляющего вложенностью подпрограмм), троичный процессор с послоговым кодированием программ и данных. Идентификаторами операций и адресов служат трайты. Набор операций включает 81 операцию: 27 основных (тестирование и преобразование данных, управление ходом программы), 27 служебных (управление магнитным барабаном, внешними устройствами, системой прерываний), 27 макроопераций, программируемых пользователями¹¹.

Элементарная база «Сетуни-70» — электромагнитные пороговые логические элементы с однопроводной передачей трехзначных сигналов. Это позволило почти в два раза уменьшить число электрических соединений, логические элементы стали проще, миниатюрней и потребляли в 2,5 раза меньше энергии, значительно улучшены параметры троичной памяти и магнитной записи троичного кода.

«Сетунь-70» была задумана так, что обеспечивалась эффективная возможность ее программного развития. Команд в традиционном понимании не было — они виртуально складывались из слогов. Длина и адресность команд варьировалась по необходимости, начиная с нуль-адресной. В «Сетуни-70» отсутствует традиционное понятие команды как слова, содержащего коды операций и адресов операндов. Программа представляет собой последовательность трайтов-операций и трайтов-адресов, выполнимые сочетания которых можно рассматривать как виртуальные команды. Однако программисту думать о командах не приходится — он конструирует постфиксные выражения¹² непосредственно из операндов и операций подобно тому, как это делается в алгебре. Для процессора эти алгебраические выражения являлись готовой программой, только алгебра еще была дополнена такими операциями, как тестирование, управление, ввод-вывод. Пользователь мог пополнять набор слогов своими операциями и вводить (определять) постфиксные процедуры, использование которых практически не снижало быстродействия, но обеспечивало идеальные условия для структурированного программирования. Результат — трудоемкость написания программ уменьшалась в 5–10 раз при небывалой простоте модификации, надежности, а также компактности и скорости.

¹¹ Аналог современных макросов. — *Прим. сост.*

¹² Постфиксная нотация, то же самое, что ПОЛИЗ — обратная (инверсная) польская запись — форма записи математических и логических выражений, в которой операнды расположены перед знаками операций. Использовалась в ряде компьютеров, была широко распространена в калькуляторах 1960–80 годов, применяется в ряде современных конструкций. Алгоритм с применением обратной польской записи называется стековой машиной. — *Прим. сост.*

Минимальная непосредственно адресуемая единица главной памяти «Сетуни-70» — 6-битный трайт (~9,5 бита), — на редкость удобна. Трайт лишь немногим больше восьмибитного байта, но уже достаточно велик, чтобы закодировать, например, алфавит, включающий русские и латинские заглавные и строчные буквы, цифры, математические и служебные знаки. В трайте целое число как 9-разрядных, так и 27-разрядных цифр. Два трайта — это 19 битов, три трайта — почти 29 битов и т. д.

Представление чисел симметричным троичным кодом позволило легко реализовать последовательное выполнение арифметических операций с варьируемой длиной операндов от 1 до 3 трайтов и длиной результата до 6 трайтов. Благодаря симметричности кода просто и естественно реализованы реверсивные счетчики и указатели стеков, играющих в архитектуре машины важную роль.

В 1975 году машина подверглась модернизации, выразившейся в небольшие по объему переделки, приведшие к принципиальному усовершенствованию архитектуры на основе идеи структурированного программирования Э. Дейкстры. Двухстековая организация процессора и польская инверсная запись оказались исключительно благоприятными для реализации структурированного программирования на уровне языка машинных команд. При этом в условиях новой дисциплины программирования стали несущественными затруднения, возникавшие в связи с мелкостраничной структурой памяти. Все, что потребовалось сделать, — это ввести команды ветвления, цикла и вызова подпрограммы вместо практически не употреблявшихся команд приращения, убавления и установки нуля в регистре порядков. Новые команды, в отличие от обычных в польской инверсной записи однословных команд, представлены словосочетаниями.

Основные характеристики «Сетунь-70» приведены в одноименном *приложении в конце этого очерка.*

ЭВМ «Сетунь-70» была последней в стране попыткой внедрения троичной системы в вычислительную технику, не понятой и не принятой современниками. И судьба у нее была хуже, чем у предшественницы — ее даже не пытались производить серийно, мало того, пресекли всякую возможность дальнейших работ в этом направлении. Директивные указания были подкреплены практическими действиями: лаборатория Н. П. Брусенцова вскоре после создания машины «Сетунь-70» была выселена из помещения ВЦ МГУ на чердак студенческого общежития. Первое детище Николая Петровича — экспериментальный образец «Сетуни», проработавший безотказно 17 лет, — было варварски уничтожено: машину разрезали на куски и выбросили на свалку. «Сетунь-70» сотрудники лаборатории забрали с собой на чердак и там на ее основе создали начальный

вариант автоматизированной системы обучения «Наставник» [9.6]. Впоследствии появились другие варианты «Наставника», последний из которых, реализованный на персональном компьютере, используется в МГУ до настоящего времени. Заложенные в ЭВМ «Сетунь-70» идеи нашли воплощение в Диалоговой Системе Структурированного Программирования (ДССП), программно эмулирующей архитектуру двухстековой машины [9.7].

Современное состояние дел в троичной арифметике и трехзначной логике

В настоящее время интерес к троичной системе в зарубежных средствах научной информации заметно возрос. Появилось множество публикаций и сообщений о проводимых исследованиях: в частности, американские ученые пришли к выводу о троичности нейрона человеческого мозга.

Показательны два факта, иллюстрирующие повышение интереса зарубежных специалистов к троичной системе в наши дни.

Первый приведен Б. Н. Малиновским в известной книге «История вычислительной техники в лицах» [6.7]: *«Прав или не прав Н. П. Брусенцов — покажет время. Со своей стороны приведу лишь один факт. В декабре 1993 г. я (Б. Н. Малиновский) встретился с известным специалистом в области компьютерной науки профессором С. В. Клименко, работающим в вычислительном центре Института физики высоких энергий (г. Протвино Московской области). Ученый только что возвратился из США, где по просьбе американской стороны прочитал небольшой курс лекций по истории развития компьютерной науки и техники в Советском Союзе. На мой вопрос — о чем и о ком спрашивали его американские слушатели, он ответил: „Почему-то только о Брусенцове и его машине ‘Сетунь’“»*. Обращаем внимание — это происходило в 1993 году, когда у нас и научные, и промышленные круги ни о Н. П. Брусенцове, ни о его «Сетуни», ни о троичной системе уже и не вспоминали¹³.

Второй рассказан автору В. С. Заборовским из Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, интерес которого к троичной системе начался со следующего: *«Это было в марте 2004 году на конференции ICN'04 на острове Гваделупа (заморская территория Франции*

¹³ В дополнение к этому свидетельству о западном интересе к «Сетуни»: в 2012 году к составителю этого сборника обратились из аппарата главы Минэкономразвития Э. С. Набиуллиной с просьбой провести экскурсию в области отечественных компьютерных достижений для американской делегации, которая особенно интересовалась «Сетунию» и личностью Н. П. Брусенцова. — *Прим. сост.*

в Карибском море). Я выступал с докладом по сетевым процессорам — устройствам для обработки пакетного трафика в задачах маршрутизации и фильтрации. В ходе обсуждения возник вопрос о теории вычислительных систем в широком смысле и как можно повысить производительность вычислений. Один из участников, кажется, аспирант из США, сказал, что среди известных решений есть одно, которое явно выделяется в аспекте теоретических преимуществ. Это решение было реализовано еще в 60-х годах в России при создании ЭВМ Сетунь, разработчиком которой был Н. П. Брусенцов. К этому времени я слышал о троичной системе счисления для ЭВМ, но не знал имени автора. Когда приехал в Санкт-Петербург, сразу же нашел ссылки через поисковые системы и через своих коллег из МГУ вышел на контакт с Николаем Петровичем».



В МГУ. Обсуждение путей построения модулярно-троичной ЭВМ. Слева направо: Н. П. Брусенцов, П. Р. Машевич (ОАО «Ангстрем»), академик В. М. Амербаев, Д. Б. Малашевич

На этом фоне некоторое оживление наблюдалось и у нас. МГУ задумывался о создании новой троичной ЭВМ, Росэлектроника приглашала на свой научно-технический совет Н. П. Брусенцова, ОАО «Ангстрем» совместно с Николаем Петровичем провел предварительную проработку путей построения троичной элементной базы, Санкт-Петербургский государственный политехнический

университет проявил интерес к созданию троичных ЭВМ для разрабатываемых им систем.

Николай Петрович Брусенцов предложил также объединить положительные стороны модулярности¹⁴ и троичности. Такой синтез заинтересовал академика В. М. Амербаева и встретил с его стороны полное понимание. Пути такого симбиоза неоднократно обсуждались ими с участием специалистов микроэлектроники и САПР [9.13] (см. фото выше). К величайшему сожалению, Н. П. Брусенцов и В. М. Амербаев в конце 2014 года почти одновременно ушли из жизни.



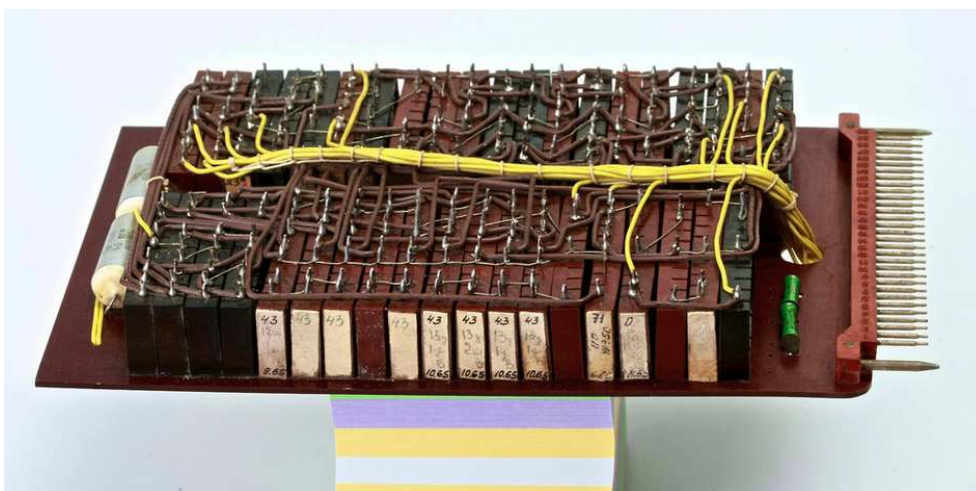
Н. П. Брусенцов и В.М. Амербаев в МГУ

Многие годы Н. П. Брусенцов и его соратники в МГУ напряженно работали над развитием троичной системы счисления и трехзначной логики. Значительная часть исследований посвящена области троичной информатики, связанной с упорядочением логических отношений посредством трехзначного обобщения булевой алгебры [9.8]. По словам

¹⁴ См. в этом сборнике очерк «Модулярная арифметика и модулярные компьютеры».

Николая Петровича, ему удалось развить учение Аристотеля, построить строгую диалектическую трехзначную логику, соответствующую естественной человеческой логике, обеспечивающую возможность построения алгоритмов решения задач, ранее не находивших эффективных решений на двоичных компьютерах. Установлена трехзначность основного в логике отношения необходимого следования — для его выразимости требуются три истинностных значения: наряду с необходимостью и исключенностью должна быть также возможность. В этих условиях оказывается достижимой компьютеризация рассуждений.

Еще одно направление исследований — возможности технической реализации троичных компьютеров на основе современной интегральной техники. В период с 2009 по 2011 годы был запатентован ряд технических решений по построению троичных элементов и разработана троичная схемотехника [9.9].



Корпуса модулей с катушками внутри для ЭВМ «Сетунь-70».
Фото с сайта «Контент-центр ВМК МГУ» (vmkcontent.zenfolio.com)

От составителя

Невозможность прямого переноса «электромагнитных пороговых логических элементов» (формулировка из описания «Сетуни-70») на интегральные технологии была, конечно, одним из главных технических препятствий для развития идей Н. П. Брусенцова. С точки зрения технолога начала 1970-х годов, уже начавшего привыкать к интегральной схемотехнике, модули ЭВМ «Сетунь-70» (см. фото) иначе, как «прошлым веком» назвать трудно. В то время никто — ни у нас, ни на Западе, — не взялся за непростую задачу перевода троичных решений на интегральную электронику. Хотя решения на дискретных транзисторах и даже электронных лампах появлялись и ранее, но

они не решали проблему. Интегральные решения появляются только в наше время: кроме указанной работы [9.9], см. раздел «Аппаратная реализация» на сайте «Материалы по троичной информатике», который упоминается далее в тексте.

Ведется также разработка троичных вычислительных алгоритмов [9.10]. В 2011 году был разработан программный комплекс ТВМ (Троичная Виртуальная Машина), имитирующий функционирование современного варианта троичного процессора двухстековой архитектуры с поддержкой структурированного программирования на уровне машинных команд, аналогичной той, что была обеспечена в троичной ЭВМ «Сетунь-70» [9.11]. Первичное инструментальное средство подготовки программ для ТВМ — ассемблер. В качестве основного языка разработки программ для нее создан язык ДССП-Т, троичный вариант ДССП [9.12].

Исторические материалы, результаты исследований, ссылки на работы по троичной информатике и многие другие материалы размещены на сайте «Материалы по троичной информатике» (<http://ternarycomp.cs.msu.su>), созданном Н. П. Брусенцовым и его коллегами из лаборатории электронно-вычислительных машин факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М. В. Ломоносова.

9 декабря 2008 года в МГУ им. М. В. Ломоносова была проведена конференция, посвященная пятидесятилетию создания ЭВМ «Сетунь» и вопросам развития архитектур цифровых ЭВМ. Основными темами конференции стала история создания и использования троичных машин, математические исследования, связанные с троичным представлением чисел и логических отношений. В конференции участвовал и Н. П. Брусенцов (см. фото ниже).

Результаты разработки и применения ЭВМ «Сетунь» и «Сетунь-70», а также последующие исследования Николая Петровича свидетельствуют о ряде существенных преимуществ троичной арифметики и трехзначной логики перед двоичной системой. Но в свое время ей не дали развиваться, в результате двоичные компьютеры и системы внедрились почти во все сферы деятельности человека, а троичная информатика существует фактически только на бумаге при минимальном количестве сторонников. Прорваться троичная информатика может только в сугубо специальные стратегически значимые системы, например военные, где наряду со своими преимуществами перед двоичной, является гарантом недоступности для диверсионных проникновений противника. Однако заказчики таких систем пока молчат.



Н. П. Брусенцов выступает на конференции, посвященной 50-летию ЭВМ «Сетунь» (МГУ, 9 декабря 2008 года). Фото Надира Чанышева

Дополнение от составителя

Некоторые необходимые уточнения по поводу практического развития троичного направления в период после работ Н. П. Брусенцова и по настоящее время, дополняющие информацию Б. М. Малашевича. В 1973 году Геден Фредер (Gideon Frieder) с коллегами из университета Буффало, США создали Ternac — экспериментальный троичный эмулятор с арифметикой над 24-третними целыми и 48-третними действительными числами на двоичном компьютере Burroughs B1700¹⁵. Потом последовал долгий перерыв, который был нарушен в 2001 году заметкой Брайана Хайеса (Brian Hayes) в журнале *American Scientist* под названием «Третье основание» («Third Base»)¹⁶, получившей широкий резонанс. Хайес не сказал ничего принципиально нового по сравнению с работами 1950-х годов или Дональдом Кнутом [9.14], но напомнил современным западным исследователям о существовании троичной системы. В результате чего родился еще один экспериментальный троичный компьютер — не программный эмулятор, а настоящая «железная» конструкция на основе трехуровневой транзисторной логики под названием TSA2. Она была построена в 2008 году в университете Сент-Луиса в Калифорнии Джеффом Коннелли (Jeff Connolly) с коллегами при поддержке профессора Филлипа Нико (Phillip Nico). Некоторое время проблема троичной логики обсуждалась в связи с нашумевшим проектом квантовых компьютеров, однако это направление

¹⁵ См. описание эмулятора Ternac: ([часть 1](#)) и ([часть 2](#)).

¹⁶ См. Hayes Brian. [Third Base](#) // *American Scientist*. — 2001. — November–December.

потом затихло: тема квантовых вычислений в настоящее время признана бесперспективной. Ряд интересных программных проектов, посвященных применениям троичной системы счисления, читатель найдет также на сайте [«Тринари»](#).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Основные характеристики машины «Сетунь»

Главный конструктор: Брусенцов Н. П.; основные разработчики: Жоголев Е. А., Маслов С. П., Веригин В. В.

Организация-разработчик: ВЦ МГУ им. М. В. Ломоносова.

Завод-изготовитель: Казанский завод математических машин ГКРЭ. Изготовитель логических элементов — Астраханский завод электронной аппаратуры и электронных приборов ГКРЭ.

Год окончания разработки: 1959.

Годы выпуска: 1961–1965, выпущено около 50 ЭВМ.

Описание машины: одноадресная с одним аккумулятором, регистром множителя и индекс-регистром, значение которого используется с изменением либо без изменения знака. Длины операндов — 9 тритов и 18 тритов, троичный порядок числа с плавающей запятой — 5 тритов. Два скоростных фотоввода с перфоленты, ленточный перфоратор, электроуправляемые пишущие машинки с русским и латинским алфавитами.

Элементная база: электромагнитные пороговые с положительными и отрицательными весами входов элементы типа быстродействующих магнитных усилителей импульсов тока на ферритовых сердечниках и диодах. Тактовая частота 200 кГц.

Конструкция ЭВМ: модульная, шкаф-стойка с габаритами 2,9×1,85×0,5 м, съемные субблоки (конструктив ЭВМ М-20), вмещающие до 18 плат с логическими элементами.

Технология: в условиях значительного разброса значений физических параметров, примененных в логических элементах диодов и ферритовых сердечников (которые поставщиками по существу не контролировались), введена сортировка тех и других на попарно соответствующие друг другу группы, благодаря чему производство элементов было практически безотходным, а их параметры жестко стандартизованными. При дальнейшей сборке из таких элементов логических узлов (субблоков) и блоков машины

требовалась только правильность проводных соединений, проверяемая на стендах логического контроля.

Программное обеспечение: основными средствами автоматизации программирования для машины «Сетунь» являются созданные под руководством Е. А. Жоголева так называемые «интерпретирующие системы»:

- ИП-2 для вычислений с 8-ю десятичными знаками в диапазоне 10^{-19} – 10^{+19} ;
- ИП-3 для вычислений с 6-ю десятичными знаками в том же диапазоне;
- ИП-4 для вычислений с комплексными числами (плавающая запятая, 8 десятичных знаков);
- ИП-5 для вычислений с 12-ю десятичными знаками в диапазоне 10^{-19} – 10^{+19} .

Кроме того, в ПО для «Сетуни» входили система ИП-Н СибНИИЭ, осуществляющая полную интерпретацию набора трехадресных команд машины М-20, другие ИП, созданные пользователями машины в своих организациях; автокод ПОЛИЗ с символьным языком программирования типа польской инверсной записи.

Было выпущено более 30 брошюр в серии «Математическое обслуживание машины „Сетунь“», в которых представлен широкий набор стандартных программ решения типовых математических, а также прикладных задач, автоматизированных систем статистической обработки, моделирования и т. п.

Технико-эксплуатационные характеристики: потребляемая мощность — 2,5 кВА, площадь для размещения — 25–30 кв. м, функционирует при 15–30 °С, заводская цена — 27,5 тыс. руб.

Машина последовательного действия с блоком быстрого умножения. Время выполнения операций: сложение-вычитание — 180 мкс; умножение, в частности, с прибавлением третьего операнда либо с суммированием в аккумуляторе — 320 мкс; передача управления — 100 мкс. Оперативное ЗУ — 162 слова по 9 тритов. Память на магнитном барабане — 1944 либо 3888 слов по 9 тритов. Среднее время страничного (54 слова) обращения к магнитному барабану — 7500 мкс.

Особенности ЭВМ: троичная симметричная (с положительными и отрицательными значениями цифр) система представления чисел и команд, трехзначная логика, страничная двухуровневая организация памяти, пороговая реализация трехзначной логики на электромагнитных элементах.

Разработка «Сетуни» защищена 10-ю авторскими свидетельствами, удостоена Диплома первой степени и Большой золотой медали ВДНХ СССР.

ЭВМ «Сетунь 70»

Главный конструктор: Брусенцов Н. П.; основные разработчики: Жоголев Е. А., Маслов С. П., Альварес Хосе Рамиль¹⁷

Организация-разработчик: Вычислительный центр Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Ведомство: Министерство высшего образования СССР.

Год окончания разработки: 1970.

Год начала выпуска: машина серийно не выпускалась.

Год прекращения производства: опытный образец машины «Сетунь-70» функционировал в составе автоматизированной системы обучения «Наставник» на факультете ВМиК МГУ до замещения его серийным микрокомпьютером «Электроника НЦ 80-20» (ДВК-2) в 1987 году.

Область применения: решение научно-технических задач средней сложности; основание для микропрограммной реализации специализированных систем. На основе опытного образца машины созданы диалоговая система структурированного программирования ДССП и автоматизированная система обучения «Наставник», эмулируемые в дальнейшем на серийных компьютерах.

Число выпущенных машин: один опытный образец.

Описание машины: двухстековый троичный процессор с послоговым кодированием программ и данных. Идентификаторами операций и адресов служат трайты (шестерки тритов), последовательность которых представляет собой программу в польской инверсной (постфиксной) записи. Набор операций включает 81 операцию: 27 основных (тестирование и преобразование данных, управление ходом программы), 27 служебных (управление магнитным барабаном, внешними устройствами, системой прерываний), 27 макроопераций, микропрограммируемых пользователями. Память с непосредственным доступом состоит из девяти страниц по 81 трайту ОЗУ и 18-ти страниц ПЗУ. Магнитный барабан с постраничным обращением емкостью 972 страницы (в опытном образце машины задействовано 243). Каналов ввода-вывода три, до восьми устройств в каждом. На опытном образце ввод/вывод перфолентный и посредством электроуправляемой пишущей машинки «Консул 254». К машине был подключен также класс «Наставник» с 27-ю терминалами учащихся,

¹⁷ Хосе Рамиль Альварес (р. 1940) — советский и российский программист с испанскими этническими корнями, ведущий научный сотрудник НИИ ТИ (Научно-исследовательская лаборатория троичной информатики) ВМК МГУ. Ведущий системный программист троичных компьютеров «Сетунь» и «Сетунь-70». — *Прим. сост.*

оборудование для диагностики цветного зрения и устройство для оцифровывания графиков.

Элементная база: электромагнитные пороговые логические элементы с однопроводной передачей трехзначных сигналов.

Конструкция ЭВМ: модульная, шкаф-стойка 1,8×1,5×0,5 м, съемные платы с логическими элементами, до 40 элементов на плате.

Технология: однопроводная передача трехзначных сигналов сократила почти в два раза количество межэлементных и межблочных соединений.

Программное обеспечение: операционная система, выполняющая функции загрузчика, отладчика и монитора, организацию обмена с магнитным барабаном и осуществление макроопераций, предоставляет пользователю макрорасширяемый редактор текстов, однопроходный ассемблер с входным языком структурированного программирования и библиотеку сервисных программ, призванных повысить эффективность разработки и облегчить использование программных систем. Наиболее широкое практическое применение получила автоматизированная система обучения «Наставник», которая явилась весьма действенным средством группового обучения теоретическим дисциплинам, проведения автоматизированных контрольных работ, коллоквиумов, экзаменов и различного рода тестов.

Технико-эксплуатационные характеристики: потребляемая мощность — 1,5 кВА, площадь для размещения — 15–20 кв. м, производительность — 5–6 тыс. операций в секунду.

Особенности ЭВМ: троичная симметричная система представления данных и программ, трехзначная логика в пороговой реализации на электромагнитных элементах с однопроводной передачей сигналов, страничная двухуровневая организация памяти, двухстековая архитектура, послоговое кодирование программ, управление ходом программы в духе структурированного процедурного программирования.

Литература

- 9.1. Брусенцов Н. П. Пороговая реализация трехзначной логики электромагнитными средствами // Вычислительная техника и вопросы кибернетики. — Вып. 9. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. — С. 3–35.
- 9.2. Брусенцов Н. П., Маслов С. П., Розин В. П., Тишулина А. М. Малая цифровая вычислительная машина «Сетунь». — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965.

- 9.3. Брусенцов Н. П., Морозов В. А. Аннотированный указатель программ для вычислительной машины «Сетунь». — М.: ОНТИ ВЦ МГУ, 1968; Вып. 2, 1971.
- 9.4. Брусенцов Н. П., Жоголев Е. А., Маслов С. П. Общая характеристика малой цифровой машины «Сетунь-70» // Вычислительная техника и вопросы кибернетики. — Вып. 10. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1974. — С. 3–20.
- 9.5. Брусенцов Н. П., Маслов С. П., Рамиль Альварес Х. [Микрокомпьютерная система обучения «Наставник»](#). — М.: Наука, 1990.
- 9.6. Брусенцов Н. П., Захаров В. Б., Руднев И. А., Сидоров С. А. Диалоговая система структурированного программирования ДССП-80. // Диалоговые микрокомпьютерные системы. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. — С. 3–21.
- 9.7. Брусенцов Н. П. [Заметки о троичной цифровой технике](#) / Сайт «Виртуальный компьютерный музей».
- 9.8. Брусенцов Н. П. [Усовершенствование логики умозаключений](#). — М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2012.
- 9.9. Маслов С. П. [Троичная схемотехника](#) / Программные системы и инструменты. — Тематический сборник № 13. — М.: Изд-во факультета ВМиК МГУ, 2012. — С. 152–158.
- 9.10. Рамиль Альварес Х. [Алгоритмы троичной арифметики](#). — М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2012.
- 9.11. Сидоров С. А., Владимирова Ю. С. [Троичная виртуальная машина](#) / Программные системы и инструменты. — Тематический сборник № 12. — М.: Изд-во факультета ВМиК МГУ, 2011. — С. 46–55.
- 9.12. Бурцев А. А., Рамиль Альварес Х. [Кросс-система разработки программ на языке ДССП для троичной виртуальной машины](#) / Программные системы и инструменты. — Тематический сборник № 12. — М.: Изд-во факультета ВМиК МГУ, 2011. — С. 183–193.
- 9.13. Малашевич Б. М., Малашевич Д. Б. Отечественные модулярные и троичные ЭВМ / Труды Юбилейной научно-технической конференции «50 лет модулярной арифметики» — Россия, Москва, Зеленоград, 23–35 ноября 2005, издательство МИЭТ, тираж 150 экз. — С. 101–148.
- 9.14. Кнут Д. Искусство программирования: в 2 т. — Т. 2. Получисленные алгоритмы. — 3-е изд. — М.: «Вильямс», 2007. — С. 832.

- 9.15. Фомин С. В. [Системы счисления](#). — 5-е изд. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 48 с. — (Попул. лекции по мат.).
- 9.16. High-speed computing devices. By the staff of Engineering research associates, inc. — McGRAW-HILL, New York-Toronto-London, 1950. (Перевод на русский: Быстродействующие вычислительные машины. // Пер. с англ. под ред. Д. Ю. Панова. — М.: Иностранная литература, 1952. — 432 с., илл.)
- 9.17. Кудрявцев Л. Д. [О принципах производства арифметических операций на вычислительных машинах](#) // УМН. — 1950. — 5:3 (37). — С. 104–127.
- 9.18. Фельдман Б. Я. От калькулятора к суперкомпьютеру. Записки разработчика. — М.: Издательство «РТСсофт», 2014.