



## **Недвоичные системы в вычислительной технике**

*(Московский государственный институт электронной техники)*

Произведён краткий обзор наиболее перспективных альтернативных не двоичных систем счисления, рассмотрены известные вычислительные системы на их основе. Рассмотрены пути реализации троичной систем.

Первые компьютеры (тогда электронные вычислительные машины – ЭВМ) в шестидесятых-семидесятых годах прошлого века создавались на основе дискретных элементов, сначала электронных ламп, затем полупроводниковых диодов и транзисторов. Дело было принципиально новое и разработчики сами определяли подходы к построению ЭВМ и пути их реализации.

Сначала ЭВМ строились на основе различных реализаций привычной для человека десятичной системы. Но приемлемого варианта десятичного элемента для их построения найдено так и не было. Гораздо экономичнее и проще в аппаратном исполнении оказалась двоичная система счисления, она постепенно и победила. Таким образом, проблемы построения электронной элементной базы изначально определили путь развития вычислительной техники. Это влияние оказывалось решающим на всех этапах ее развития, и не всегда положительным.

Пока элементная база имела дискретный характер (электронные лампы, диоды, транзисторы и т.п.), разработчики ЭВМ имели возможность практической реализации своих идей в построении ЭВМ, и они пользовались этой возможностью. В те времена каждая ЭВМ была уникальна, никакой унификации между ними, тем более общепринятой стандартизации, еще не было. Первые ЭВМ вообще делались в одном экземпляре, затем их начали выпускать промышленно, с ничтожным в нынешнем понимании тиражом. Так первая в СССР серийная ЭВМ «Стрела» выпускалась три года (1953 - 1956 гг.), всего было выпущено 7 экземпляров. А первая «массовая» ЭВМ «Урал-1» выпускалась 5 лет (1956 – 1961 гг.), выпущено 183 машины.

Логические элементы для каждой ЭВМ разработчик проектировал сам. Интеллект разработчика ЭВМ еще ничто и никто не ограничивало, в результате появились и были реализованы самые разнообразные архитектурные, структурные и схемотехнические решения в построении ЭВМ. Не все главные конструкторы ЭВМ поддались легкости реализации двоичной системы счисления. Она несла с собой и серьезные неприятности, например проблемы округления результатов, представление отрицательных чисел, длинные цепочки переносов, затягивающие процесс вычислений, и т.п. Поэтому ученые искали иные пути построения высокопроизводительных ЭВМ, в том числе и в недвоичных системах счисления. Вот некоторые примеры, получившие реальную реализацию, в хронологической последовательности их зарождения.

## **Недвоичные ЭВМ**

### **Троичные ЭВМ**

**ЭВМ «Сетунь»** [1]. В 1959-60 гг. в вычислительном центра МГУ им. М.В. Ломоносова была разработана ЭВМ «Сетунь» (главный конструктор Н.П. Брусенцов). ЭВМ была рассчитана на использование в вузах, научно-исследовательских учреждениях и конструкторских бюро для решения научно-технических задач средней сложности. В 1961 – 65 гг. было выпущено около 50 комплектов ЭВМ «Сетунь».

Сетунь была машиной последовательного действия с блоком быстрого умножения. Ее главные особенности:

- троичная симметричная (с положительными и отрицательными

ми 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.

При длине слова 9 тритов, что эквивалентно 14,26 бит (1 трит соответствует 1,58 бита [2]) и наборе всего лишь из 24 команд, Сетунь была весьма эффективна при реализации широкого спектра алгоритмов, в том числе с плавающей запятой. Длина операндов - 9 тритов и 18 тритов, троичный порядок числа с плавающей запятой - 5 тритов. Сетунь отличалась от современников естественностью троичной логики, легкостью понимания, освоения и применения, сочетанием простоты и высокой эффективности программирования.

**ЭВМ «Сетунь-70».** В 1970 г. так же в ВЦ МГУ была разработана ЭВМ «Сетунь-70» с троичной симметричной системой представления данных и программ (главный конструктор Н.П. Брусенцов). Область применения: решение научно-технических задач средней сложности.

Особенности ЭВМ: троичная симметричная система представления данных и программ, трехзначная логика в пороговой реализации на пороговых электромагнитных элементах с однопроводной передачей сигналов, страничная двухуровневая организация памяти, двухстековая архитектура, послоговое кодирование программ, управление ходом программы в духе структурированного процедурного программирования. Набор операций ЭВМ 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. Идентификаторами операций и адресов служат трайты (шестерки тритов).

ЭВМ «Сетунь-70» не была освоена в серийном производстве: не нашлось завода. Опытный образец машины 17 лет проработал на факультете ВМиК МГУ в составе диалоговой системы структурированного программирования «ДССП» и автоматизированной системы обучения "Наставник" до замещения его серийным микрокомпьютером "Электроника НЦ 80-20" (ДВК-2) в 1987 г.

На этом история создания троичных ЭВМ в стране была прервана.

### **Модулярные ЭВМ**

**ЭВМ «Т-340А» и «К-340-А»** [3]. В 1963-64 гг. в НИИ-37 (ныне НИИДАР) по инициативе его директора Ф.В. Лукина был разработан экспериментальный образец первой в стране модулярной ЭВМ Т-340А (главный конструктор Д.И. Юдицкий, научный руководитель И.Я. Акушкин). ЭВМ предназначалась для расчетов радиолокационных данных в радиолокаторе дальнего наблюдения системы ПРО. ЭВМ проработала ряд лет в составе полигонного варианта РЛС до его демонтажа.

По результатам испытаний и опытной эксплуатации Т340-А в 1963-66 гг. были произведены определенные доработки и ЭВМ с обозначением «К-340А» была освоена в серийном производстве. В течение 1966 – 73 гг. было выпущено около 50 комплектов ЭВМ «К-340А», ставшей базовой ЭВМ для всех РЛС, разрабатываемых в те годы в НИИ-37. По производительности (2,4 млн. оп/с) К-340А превосходила всех своих современников. ЭВМ и сейчас работают в действующих РЛС.

**ЭВМ «Алмаз» и «5Э53»**. В 1963 г. директор НИИ-37, инициатор разработки ЭВМ Т-340А и К-340А был назначен генеральным директором создаваемого в будущем Зеленограде Центра микроэлектроники. Туда же он пригласил коллектив Д.И. Юдицкого, который по заказу Генерального конструктора ПРО Г.В. Кисунько приступил к разработке высокопроизводительной ЭВМ для второй очереди ПРО Московского промышленного района. Сначала (1967 – 68 гг.) это был эскизный проект ЭВМ «Алмаз» с изготовлением экспериментального образца, а после победы на конкурсе эскизных проектов – разработка технического проекта ЭВМ «5Э53» (1969-71 гг.) с изготовлением опытного образца и серийным производством на Загорском электромеханическом заводе. Главным конструктором обоих ЭВМ был Д.И. Юдицкий.

Производительность Алмаза на задачах ПРО в общепринятом тогда понимании была порядка 30 млн. оп/с, 5Э53 – около 40 млн. оп/с. Это тоже был наивысший в мире в те времена результат. Завод почти завершил подготовку серийного производства и начал изготовление ее устройств, но в 1972 г., в связи со свертыванием работ над второй очередью системы ПРО, изготовление 5Э53 было ис-

ключено из плана завода. Другого применения и изготовителя для наиболее производительной в мире ЭВМ не нашлось, ЭВМ была погублена.

### **Самокорректирующий код**

**ЭВМ «Корень».** В 1964 – 65 гг. в НПО «Агат» была разработана специализированная ЭВМ «Корень» (главный конструктор – А. К. Заволокин, зам. главного конструктора – Е. К. Юферова). ЭВМ предназначалась для корабельной системы ПВО и применялась на авианесущих крейсерах и кораблях противолодочной обороны.

В ЭВМ «Корень» для повышения надежности работы был использован самокорректирующий код, исправляющий одиночные ошибки и обнаруживающий двойные. Арифметическое устройство для реализации арифметических операций было построено на табличном принципе, т. е. все результаты арифметических операций хранились в долговременном запоминающем устройстве и выбирались по входным данным. В машине была обеспечена возможность замены неисправного блока в процессе работы.

СЦВМ “Корень” представляла собой одноадресную машину с фиксированной запятой, быстродействием 10 тысяч операций в секунду, объемом оперативной памяти — 1568 слов, объемом долговременного ЗУ — 8232 слова. Число команд — 24. Машина потребляла 12 кВт электроэнергии. Характеристики, как видим, не очень высокие для того времени, но достаточные для решения поставленных задач. Главным требованием к ЭВМ была сверхвысокая надежность, и она была обеспечена.

Информации о дальнейшем применении самокорректирующего кода в других ЭВМ не имеется.

### **Влияние микроэлектроники**

Таким образом, в истории вычислительной техники нашей страны зафиксировано три случая создания не двоичных ЭВМ (возможно были и другие, но информация о них автору не известна), причем большинство из них входило в ряд лучших ЭВМ своего времени. Но по разным причинам, далеким от науки, техники и экономики, работы по этим направлениям были директивными методами остановлены. И все эти ЭВМ были построены на основе дискретных элементов, когда разработчик ЭВМ еще имел возможность реали-

зовать любые свои идеи.

Ситуация в технологии создания ЭВМ резко изменилась с появлением интегральных схем высокой сложности и особенно микропроцессоров. С одной стороны, такое развитие микроэлектроники коренным образом повлияло на физические характеристики ЭВМ, переведя их из категории штучной, в категорию массовой продукции. Довольно быстро и успешно пошел процесс унификации и стандартизации присоединительных характеристик функциональных устройств ЭВМ, превративший их в стандартные модули. Процесс создания ЭВМ выродился в простой подбор таких модулей и комплексирование из них требуемого компьютера «без паяльника и осциллографа», появился даже термин, удачно характеризующий этот процесс – «отверточная технология». Все это конечно весьма прогрессивно и положительно, но здесь имеется и другая, негативная сторона. Правила построения ЭВМ стали диктовать поставщики элементной базы, а они могут экономически эффективно работать только при условии массового производства их продукции. В результате острой конкуренции число поставщиков интегральных схем для компьютеров резко сократилось и в настоящее время их общее количество во всем мире ограничено несколькими фирмами. А фирма «Intel» является фактическим глобальным монополистом по определению архитектуры микропроцессоров для персональных компьютеров. В результате количество коллективов, занимающихся практической разработкой архитектурных, структурных и схемотехнических принципов построения ЭВМ, сократилось в мире до нескольких, причем их творческая мысль связана фирменными правилами, традициями, многолетним технологическим заделом. Многочисленные коллективы – генераторы новых архитектурных, структурных и схемотехнических решений в ЭВМ, практически исчезли. Отдельные энтузиасты и их группы из промышленных предприятий, где они могли «в железе» реализовать свои идеи, переместились в учебные заведения, где их деятельность ограничена сугубо теоретическими изысканиями. В какой-то мере это позволяет сохранять творческий потенциал, продолжать разработки перспективных направлений в развитии вычислительной техники и ждать того часа, когда в них появится необходимость. А она назревает.

В настоящее время в специальных изданиях и Интернете отмечается заметное повышение научной и инженерной активности в облас-

ти исследований нетрадиционных путей построения вычислительных средств и систем счисления для применения в вычислительной технике. В том числе и в нашей стране. Это можно объяснить несколькими причинами [3]:

- Во-первых, широкое проникновение вычислительной техники во все сферы жизнедеятельности человека резко повысило актуальность решения таких, ранее редких, а теперь массовых задач, как обработка сигналов, изображений, распознавания образов, криптография, обработка многоуровневой информации и т.п. Все они требуют огромных вычислительных ресурсов, часто превышающих возможности.

- Во-вторых, традиционная микроэлектроника подходит к пределу своих технологических возможностей, размеры ее элементов измеряются нанометрами, числом атомов. А идущие ей на смену наноэлектроника, молекулярная электроника, микромеханика, биоэлектроника и т.п. находятся в "эмбриональном" состоянии, еще далеки от промышленного применения и их перспективы оцениваются по-разному.

- В-третьих – остро встает проблема безопасности. Об этом еще далеко не достаточно говорят, но для России это проблема национальная. Применение зарубежной электроники в стратегически важных системах таит в себе огромную скрытую потенциальную угрозу. Современный уровень микроэлектроники, когда в кристалле одной интегральной схемы содержатся миллионы транзисторов, функционально законченные устройства и системы, обеспечивает и возможности введения диверсионных "закладок". Компьютер с такой "закладкой" может многие годы прекрасно работать, а "закладка" будет спать. Но в нужный кому-то момент, по сигналу извне (Internet, радиосигнал и т.п.) она просыпается и творит с системой все, что захочет ее хозяин. Обнаружить такие "закладки" практически невозможно. Эта задача по силам только мощнейшим в мире микроэлектронным фирмам, стоимость такой операции соизмерима со стоимостью создания исследуемой микросхемы, при обилии номенклатуры таких микросхем задача становится непосильной для экономики любой страны. В настоящее время ни кто не может дать гарантии, что в компьютерах Генштаба, Банка России, Правительства, Федерального собрания и других стратегически важных органов не "спят" диверсионные "закладки", и что они не проснутся в самый неподходящий для страны момент. Выход только один – в

создании отечественных изделий микроэлектроники и стратегически важных систем на их основе. Только здесь процесс можно полностью контролировать и исключить появление "закладок". Но поскольку технологически мы отстаем от зарубежной микроэлектроники, необходимо привлекать другие средства повышения эффективности систем.

В этих условиях интерес к поиску системных методов повышения эффективности и надежности вычислительных средств пробуждается вновь. Ряд серьезных фирм начал, пока теоретические, заделные работы в этой области. Работы ведутся в разных направлениях, но наиболее перспективными представляются модулярные и троичные ЭВМ, уже на практике доказавшие свои ценные особенности. Причем в настоящее время, по предложению главного конструктора троичных ЭВМ "Сетунь" и "Сетунь-70" Н.П. Брусенцова, прорабатывается вопрос об объединении модулярности и троичности. Остановимся кратко на наиболее ценных их свойствах.

## **Модулярная арифметика**

Главным преимуществом модулярной арифметики является естественное распараллеливание вычислений на уровне системы счисления. Представление операндов в виде набора остатков по малым основаниям позволяет избежать длинных межразрядных переносов переполнения заёма при выполнении модульных арифметических операций. Особенно сильно это преимущество модулярной арифметики проявляется при работе с числами очень большой разрядности, и растёт вместе с разрядностью операндов. Но при выполнении немодульных операций преимущества модулярной арифметики теряются и возникают новые проблемы, которых лишены обычные позиционные системы счисления. Поэтому считается, что модулярная арифметика наилучшим образом применима для обработки больших целых положительных величин. Тем не менее, существуют и развиваются методы выполнения и немодульных операций, что позволяет строить полноценные модулярные системы. При решении задач с высокой долей немодульных операций, целесообразно наличие в системе и модулярного сопроцессора.

Ещё одной особенностью модулярной арифметики является возможность введения дополнительных избыточных оснований, с помощью которых можно выполнять контроль и коррекцию



ошибок в процессе выполнения операций. Это одно из важнейших преимуществ СОК (арифметичность) перед всеми позиционными системами: ни одна из них не позволяет находить и, тем более, исправлять ошибки в процессе выполнения арифметических операций. Наоборот, в арифметическом устройстве они, раз возникнув, бесконтрольно размножаются. В ЭВМ, работающих в традиционных позиционных системах счисления, контроль и исправление ошибок (контроль на четность, избыточное кодирование, мажорирование и т.п.) обеспечиваются только в системах хранения и передачи информации. Арифметико-логические устройства – один из основных источников сбоев и ошибок в позиционных ЭВМ, остаются бесконтрольными.

Малая разрядность оснований обеспечивает возможность реализации табличного выполнения модульных операций, если их результат не выходит за пределы диапазона представления чисел в процессоре. Причем в качестве операции в табличной арифметике может выступать не только элементарная модульная операция (сложение, умножение и т.п.), но и сложные функции, при вычислении которых не используются немодульные операции, например функции, которые могут быть представлены в виде полинома. Это свойство модулярной арифметики ставит ее вне конкуренции по производительности на определенных классах задач перед любыми позиционными системами. И это же свойство определяет специальный характер модулярных процессоров, отводит им роль высокопроизводительных арифметических сопроцессоров для решения определенных задач.

## **Троичная система**

Троичная система счисления и троичная диалектическая логика Брусенцова [4] с симметричным кодом  $(-1,0,+1)$  обладает рядом ценных свойств наиболее интересными из которых являются [5]:

- Простота и гарантированная точность округления результатов вычислений. Значение каждого разряда равно  $1/3$  следующего более старшего, т.е. всегда менее половины его значения. Следовательно округление сводится к простому отбрасыванию лишних младших разрядов.
- Естественность представления знака числа. Нет необходимости в введении дополнительного кода и хлопотах с ним в процессе

обработки информации, как это имеет место в двоичной системе.

- Более высокая информационная емкость троичного кода, по сравнению с двоичным, уменьшает количество межрядных переносов при соответствующих операциях.
- Для двоичных ЭВМ все данные одинаково ценны, они не могут игнорировать несущественную информацию или сделать выбор из равных условий. Как известно двоичный Буриданов осел умер от голода между двумя стогами сена. А троичный Брусенцов осел прекрасно себя там чувствует.
- Троичная логика, где есть «да», «нет» и «может быть» более естественна и понятна для человека в отличие от двоичной, исключающей вероятностный ход событий. Да и нейрон человеческого мозга, оказывается, тоже троичный (<http://www.sci-tech-today.com/story.xhtml?story%20id=30799>).

Уже этих кратких иллюстраций полезных свойств модулярной арифметики и троичной системы Брусенцова достаточно, чтобы разработчики ЭВМ обратили на них серьезное внимание. Недавно основатель троичной вычислительной техники Н.П. Брусенцов выступил с идеей их объединения, а крупнейший специалист в модулярной арифметике академик В.М. Амербаев заинтересовался этой идеей. Есть все основания ожидать высоких результатов от этого объединения.

О различных аспектах модулярной арифметики на конференции сказано достаточно много, поэтому остановимся на троичной системе Брусенцова. Большинство авторов, пишущих на эту тему, считает, что главной проблемой на пути построения троичной ЭВМ является отсутствие троичных электронных элементов. Даже Кнут в своей монографии [2] отметил *«До сих пор уравновешенная (по Брусенцову – симметричная, прим. авт.) троичная система все еще не нашла серьезного применения, но возможно, что ее симметричность и простая арифметика окажутся в один прекрасный день весьма существенными (когда «флип-флоп» заменится на «флип-флэп-флоп»)»*. С технической точки зрения они в какой-то мере правы, это действительно проблема. Но на этом пути есть еще и препятствия, далекие от научных или технических проблем. Об

этом свидетельствует судьба ЭВМ «Сетунь-70», элементная база для которой коллективом Н.П. Брусенцова была создана и опытный образец ЭВМ многие годы прекрасно работал. Именно эти препятствия, а так же подавляющее господство двоичной системы, и мешали созданию троичных элементов. Но вернемся к элементной базе.

Автором рассмотрены пути создания элементной базы для реализации симметричной троичной системы [6] (троичная арифметика и троичная диалектическая логика Брусенцова) на основе промышленной технологии ОАО «Ангстрем». Работа еще далеко не завершена и проводится в тесном контакте с Николаем Петровичем Брусенцовым.

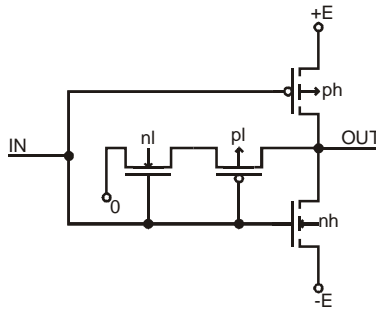
Рассмотрено два варианта построения троичных элементов:

- Однопроводный с электрическими сигналами трех уровней (+E, 0, -E).
- Двухпроводный с электрическими сигналами двух уровней (E, 0) и кодированием троичных значений, например 01 – «+1», 00 – «0» и 10 – «-1». Четвертое состояние «11» либо блокируется, либо используется в целях обеспечения безопасности или достоверности информации – этой проблемой заинтересовался академик Амербаев В.М., математик.

Оба варианта принципиально реализуемы, на основе технологии Ангстрема (и, по-видимому, большинства других полупроводниковых фирм), однако их готовность для практического применения, требуемые для этого затраты времени и средств существенно различаются.

### **Однопроводные троичные элементы**

На данный момент проработана схемотехника нескольких троичных элементов на SPICE-моделях транзисторов технологии AT-12 ОАО «Ангстрем», пример такого элемента, реализующего функцию троичного инвертора, приведен на рис. 1. Исследования показали принципиальную возможность построения таких элементов с точки зрения схемотехники и полупроводниковых технологий, но и вскрыли ряд неразрешимых пока проблем.



IN	OUT
-1	+1
0	0
+1	-1

Рис. 1. Схема однопроводного троичного инвертора: nl, pl – КМОП транзисторы с нормальным порогом, nh, ph – КМОП транзисторы с высоким порогом, и его таблица истинности.

Реализация однопроводного троичного элемента сопряжена с серьезными проблемами технологий производства и проектирования. Такой элемент имеет две особенности, отражающиеся на технологии его производства:

- Выходные транзисторы в некоторых кодовых комбинациях оказываются под двойным напряжением питания.
- Некоторые транзисторы необходимо гальванически изолировать от подложки.

Обе эти проблемы решены в Ангстреме, но нет такого производственного технологического маршрута по изготовлению ИС промышленного назначения, в котором они бы присутствовали оба. В технологии «кремний на изоляторе» эти обе проблемы решаются, но это очень дорогая технология для изготовления радиационно-стойких ИС, она не для экспериментов. Создание же нового технологического маршрута для производства ИС общепромышленного назначения технически не проблематично, но требует не только больших затрат времени и средств, но и гарантии рентабельной загрузки в последующем. Ни средств, ни гарантий в настоящее время никто дать не может.

Но главная проблема не в этом. Существующие системы автоматизации проектирования ИС (САПР), особенно их системы модели-

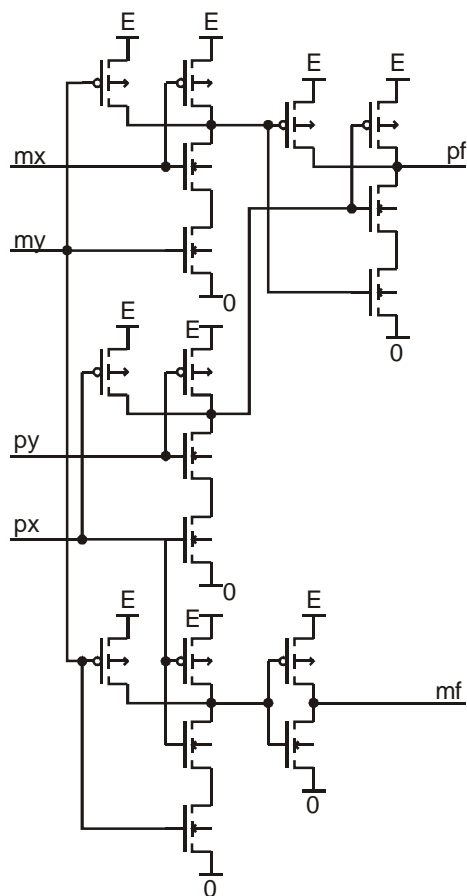
рования и синтеза, не умеют работать в троичной логике. И не просматриваются пути их адаптации к ней. Т.е. для проектирования однопроводных троичных элементов и троичных устройств требуется создание новых САПР. Это задача не только весьма трудоемкая и дорогостоящая, но и требующая переобучения разработчиков САПР на «троичное» мышление.

Таким образом, реализация однопроводного варианта троичной системы хотя потенциально технологически и возможна, но в настоящее время нереализуема по экономическим и организационным причинам. Эти препятствия могут быть преодолены только в том случае, если должностные лица и специалисты увидят преимущества троичной системы, достаточные для принятия решения о соответствующих вложениях и организации разработок технологий, САПР и изделий в троичной системе. А для этого нужно построить троичную ЭВМ иным способом.

#### **Двухпроводные троичные элементы**

Таким способом может быть двухпроводная реализация троичных элементов. Она обеспечивает возможность построения троичной ЭВМ на основе существующих промышленных полупроводниковых технологий и САПР без каких-либо доработок. На основе двухпроводного варианта возможно создание элементов, устройств и систем, полностью реализующих троичную арифметику и троичную диалектическую логику Брусенцова. По существу по этому варианту была построена и первая троичная ЭВМ «Сетунь».

Такой вывод в какой-то мере подтверждается проведенными исследованиями. В частности проведена схемотехническая разработка элемента, реализующего сугубо троичную функцию «отношения следования», результаты которой приведены на рис. 2. Разработка проведена в SPICE-моделях транзисторов базового матричного кристалла (БМК) ОАО «Ангстрем» 1592XM1 (100 тыс. вентиляей). Предполагается дополнить библиотеку стандартных элементов этого БМК троичными элементами, с тем, чтобы проводить разработку ЭВМ на его основе.



X	Y	m_x	p_x	m_y	p_y	m_f	p_f
-1	-1	1	0	1	0	0	1
-1	0	1	0	0	0	0	0
-1	+1	1	0	0	1	0	0
0	-1	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	+1	0	0	0	1	0	0
+1	-1	0	1	1	0	1	0
+1	0	0	1	0	0	0	0
+1	+1	0	1	0	1	0	1

Рис. 2. Схема двухпроводного троичного элемента «отношения следования» и его таблица истинности.

Таким образом, имеются все необходимые предпосылки для создания элементной базы троичной ЭВМ, работа над проектом которой в настоящее время начата Н.П. Брусенцовым в МГУ им. М.В. Ло-

моносова с участием ОАО «Ангстрем» и Санкт-петербургского государственного политехнического университета.

### Литература

1. **Брусенцов Н. П.** и др. Общая характеристика малой цифровой машины «Сетунь-70». В кн.: Вычислительная техника и вопросы кибернетики, вып.10. Л., 1973, – С. 3-21.
2. **Кнут Д.** Искусство программирования для ЭВМ - Получисленные алгоритмы// М.: Мир, 1977. – С. 724
3. **Малашевич Б. М.** Неизвестные модулярные суперЭВМ// PC WEEK/RE, М., 2005. № 9. С. 44-45. № 10. – С. 52-54.
4. **Брусенцов Н. П.** Математическая теория силлогистики// Вычислительная техника и вопросы кибернетики. ЛГУ, 1971. – С. 154-176.
5. **Малашевич Д. Б.** Особенности применения троичной арифметики в вычислительных системах// Микроэлектроника и информатика – 2004. 11-я всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2004. – С. 88
6. **Малашевич Д. Б.** Анализ способов реализации троичной логики на КМОП схемах// Микроэлектроника и информатика – 2005. 12-я всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2005. – С. 105