

Н.П. БРУСЕНЦОВ

ПОРОГОВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТРОИЧНОЙ ЛОГИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Использование в цифровых устройствах трехзначной логики и троичного кода открывает возможность упрощения структуры и улучшения функциональных характеристик этих устройств по сравнению с их двоичными вариантами [1].

Практическое освоение этой возможности затруднено, помимо консерватизма, в основном двумя обстоятельствами:

1) трехзначная логика все еще недостаточно изучена как математическая система,

2) не разработаны пути эффективной технической реализации операционных и запоминающих элементов троичных устройств.

Эти две части проблемы, конечно, взаимосвязаны в том смысле, что отсутствие существенного прогресса в одной из них не способствует прогрессу в другой. Однако можно надеяться, что в силу этой же связи информация о разработках, касающихся одной из указанных частей, будет способствовать повышению активности в другой части и дело все же получит должное развитие.

В настоящей статье рассматриваются вопросы практического осуществления операционных элементов троичных устройств на основе электромагнитной техники.

Электромагнитная техника, т. е. техника, построенная на явлениях не только кондуктивного, но и индуктивного характера, является, по-видимому, наиболее подходящей для реализации троичных цифровых устройств. Не случайно наиболее экономные из известных реализаций этих устройств осуществлены электромагнитными средствами, и именно в условиях электромагнитной техники встречаются те случаи, когда для осуществления троичного элемента требуется ровно столько же оборудования, сколько и для двоичного (например, электромагнитные линии задержки, индуктивные параметроны, попарно скомпенсированные магнитные усилители). Одним из главных доводов, определивших выбор троичного представления информации в машине «Сетунь», явилось то, что примененные и качестве элементов этой машины магнитные усилители с питанием импульсами тока, вследствие невозможности отказаться от попарной компенсации их при использовании в двоичных устройствах, требовали для построения двоичных ячеек тех же затрат оборудования, что и для троичных, обладающих по сравнению с двоичными ячейками большей информационной емкостью и более сильными функциональными возможностями.

Благоприятность электромагнитной техники в отношении троичных устройств объясняется в общем тем, что трехзначная ситуация является наиболее типичной для индуктивных явлений, подобно тому как двузначная ситуация наиболее типична для логически менее сложных кондуктивных явлений. Так, в цепи с источником э.д.с. фиксированной полярности при использовании в ней только элементов нелинейного и управляемого сопротивления (например, транзисторов) осуществимы лишь два качественно различных

сигнала: наличие и отсутствие тока (напряжения), в то время как при использовании в такой цепи трансформатора можно получить уже три сигнала: ток одного направления, ток другого направления, отсутствие тока. Кондуктивная связь двух участков электрической цепи характеризуется двумя логическими значениями: есть проводимость, нет проводимости, а электромагнитная связь этих участков, осуществляемая трансформаторным путем, требует для описания ее логики трех значений: синфазная связь, противофазная связь, нет связи. Последнее обстоятельство, в частности, используется в троичных постоянных запоминающих устройствах, выполняемых на магнитных сердечниках: для запоминания одного из трех значений прошивка сердечника производится или в одном, или в другом направлении, или не производится [2].

Очень важным преимуществом электромагнитной техники при осуществлении троичных устройств является то, что на ее основе созданы простые и не предъявляющие трудновыполнимых требований к точности и стабильности параметров деталей и питания пороговые элементы. Известно, что реализация троичных устройств на основе пороговой логики оказывается особенно экономной и представляет пока единственный путь создания троичных устройств, способных конкурировать с двоичными устройствами в отношении количества содержащегося в них оборудования.

Все, что было сказано, ни в коей мере не направлено на то, чтобы как-то обесценить возможности реализации троичных устройств другими средствами, например средствами транзисторной техники, которая в связи с замечательными технологическими достижениями последних лет должна рассматриваться как наиболее перспективная в близком будущем также и в данной области. Однако технология продолжает развиваться, и нет принципиальных причин для того, чтобы электромагнитная техника не могла стать технологичной. Другое дело законы природы, на которых базируются технические концепции, они незыблемы: резистор (и даже транзистор), сколько бы его не улучшали, в принципе не может стать трансформатором. Поэтому, несмотря на технологическое отставание в настоящее время, электромагнитная техника сохраняет за собой превосходство как принципиально более совершенная для осуществления цифровых устройств.

Эта статья написана на основе опыта работы по использованию электромагнитной техники в троичных операционных устройствах, выполненной в проблемной лаборатории цифровых машин Вычислительного центра МГУ. Первый период этой работы завершился созданием вычислительной машины «Сетунь» – первой троичной машины и одной из немногих машин, в которых построенные на электромагнитных элементах операционные устройства оказались вполне удовлетворительными для серийного выпуска и показали хорошую эксплуатационную надежность. Завершением второго периода явилась постройка экспериментального образца машины «Сетунь 70» [3], в процессе создания которой получили дальнейшее развитие как пути использования трехзначной логики и троичного кода, так и принципы реализации троичных операционных и запоминающих устройств на основе электромагнитной техники.

Базовым элементом для построения операционных устройств как в машине «Сетунь», так и в машине «Сетунь 70» служит быстродействующий магнитный усилитель с питанием импульсами тока [4]. Главное преимущест-

во этого элемента заключается в том, что он позволяет экономно и надежно реализовать наиболее эффективный способ выполнения логических операций, названный в наших ранних работах [5, 6] способом алгебраического сложения управляющих ампервитков на входе магнитного усилителя и представляющий собой одну из важнейших разновидностей пороговой логики.

Другим достоинством этого элемента является свойственная ему высокая эксплуатационная надежность. Так, интенсивность отказов магнитных усилителей в операционных устройствах экспериментального образца машины «Сетунь», содержащего 4 тыс. усилителей, определенная по данным эксплуатации этого образца с 1959 по 1970 г. при суммарном рабочем времени около 40 тыс. час, составляет $2 \times 10^{-8} \frac{1}{\text{час}}$. Заметим, что указанный образец машины изготовлен в условиях примитивной технологии и в качестве одной из основных деталей в нем использован первенец отечественного производства полупроводниковых приборов – диод типа Д1, причем в процессе изготовления элементов проверялись только их функциональные характеристики, но не производилось каких-либо испытаний или контроля параметров (например, электрической прочности изоляции), определяющих надежность. Выход усилителей из строя был обусловлен в двух случаях пробоем диодов, обладавших, по-видимому, внутренними дефектами, и в одном случае – нарушением изоляции обмоток трансформатора.

1. Работа магнитного усилителя с питанием импульсами тока в качестве элемента, выполняющего операцию «запрет»

Несмотря на то что по магнитным элементам и вопросам их проектирования имеется обширная литература, мы еще раз подробно рассмотрим особенности работы магнитного усилителя с питанием импульсами тока в качестве

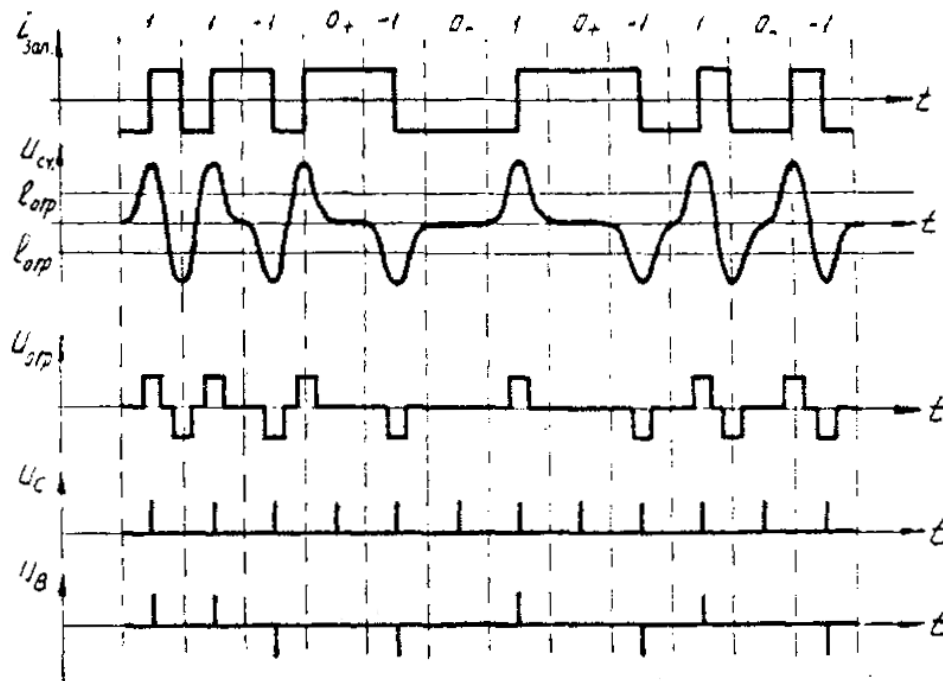


Рис. 1

логического элемента. Дело в том, что в описаниях принципа действия элементов этого типа (не исключая имеющихся в монографиях других авторов описаний принципа действия элементов машины «Сетунь») упускают из виду один эффект, играющий важную роль при выполнении логических операций. Чтобы учесть этот эффект, мы, как и в прежних наших статьях, рассматриваем работу магнитного усилителя не в качестве ячейки сдвигающего регистра, а в качестве логического элемента, осуществляющего операцию «запрет».

На рис. 1 изображена схема магнитного усилителя, работающего в качестве элемента «запрет». Усилитель состоит из выполненного на сердечнике с прямоугольной петлей гистерезиса трансформатора T_3 и включенного последовательно с нагрузочной обмоткой этого трансформатора диода D_3 , который смещен в обратном направлении постоянным напряжением E .

Диод D_3 служит вентилем, размыкающим цепь нагрузки трансформатора при перемагничивании сердечника под действием м.д.с, создаваемой управляющими (входными) обмотками. Благодаря этому размыканию получается эффект усиления мощности: подводимая к входным обмоткам трансформатора энергия управляющего импульса перемагничивает сердечник на холостом ходу, т. е. расходуется практически только на покрытие потерь, происходящих в сердечнике, и поэтому может быть сравнительно малой; энергия же импульса тока питания, под действием которого сердечник перемагничивается в обратном направлении, т. е. при подключенной нагрузке, превосходящая в несколько раз энергию управляющего импульса, за вычетом небольшой ее части, требующейся для перемагничивания сердечника в течение заданного промежутка времени, передается в нагрузку. Таким образом, импульс небольшой мощности, действующий на входе усилителя во время управляющего периода, вызывает в очередном рабочем периоде передачу от источника питания в цепь нагрузки усилителя импульса существенно большей мощности.

Особого разъяснения требует функция, выполняемая напряжением смещения E . Наличие этого напряжения связано с тем упускаемым обычно эффектом, о котором было упомянуто выше. Известные разновидности магнитных элементов рассматриваемого типа (например, весьма популярные в недавнем прошлом трехтактные элементы) не содержат напряжения смещения в цепи связи, причем если не приняты какие-либо другие специальные меры, то это является достаточным условием неустойчивости выполненных на таких элементах устройств, с которой неизменно сталкивались их разработчики.

Дело в том, что для элементов данного типа при использовании их в переключаемых схемах первостепенное значение имеет операция «запрет», применяемая во всех тех случаях, в которых в булевой формуле переключательной функции употреблен знак отрицания. Так вот как раз эту наиболее частую операцию элементы без напряжения смещения в цепях связи реализуют неудовлетворительно.

Дефектная ситуация возникает при наличии входного сигнала, возбуждающего положительно включенную управляющую обмотку (ток i_1 на рис. 1), и одновременном отсутствии сигнала, возбуждающего отрицательно включенную «запрещающую» обмотку (ток i_2). В этом случае под действием ампервитков, создаваемых током i_1 , должно произойти полное перемагничивание сердечника T_3 в течение управляющего периода или за время действия импульса тока i_1 если его длительность меньше длительности управляющего

периода. Однако если в цепи запрета нет напряжения смещения, то так не получается. При перемагничивании сердечника T_3 импульсом тока i_1 в его запрещающей обмотке наводится э. д. с, действующая в прямом относительно диода D_2 направлении и вызывающая «размагничивающий» ток i_2 , величина которого при отсутствии напряжения смещения E ограничена практически только сопротивлением диода D_2 , так как, трансформатор T_2 в это время оказывается под действием импульса тока питания, и поэтому сопротивление его нагрузочной обмотки ничтожно. Фактически в этой ситуации длительность перемагничивания сердечника T_3 зависит не столько от его собственных параметров, сколько от напряжения, создаваемого на диоде D_2 током i_2 . Если бы это напряжение было равно нулю («идеальный диод»), то, пренебрегая напряжением, возникающим вследствие сопротивления, которым обладают обмотки и соединительные провода, мы имели бы ситуацию, вообще исключаящую какое-либо перемагничивание сердечника T_3 током i_1 . Практически некоторое неконтролируемое перемагничивание происходит, и соответствующим увеличением силы тока i_1 можно даже добиться того, что оно будет совершаться за нужное время, но ясно, что это не тот путь, на котором находится удовлетворительное решение проблемы.

К сожалению, обычно шли именно этим слепым путем: достаточно вспомнить, что амплитуда ампервитков питания в устройствах на трехтактных элементах при таковой частоте, не превышающей 50 кГц , достигала $5-7 \text{ А}$ (впрочем, все же не обеспечивая необходимой устойчивости функционирования), в то время как в устройствах машины «Сетунь», выполненных на сердечниках того же диаметра и из того же материала, устойчивая работа на частоте 200 кГц обеспечивается при ампервитках питания с амплитудой 3 А , в которые входит, разумеется, увеличение этой амплитуды, обусловленное дополнительными потерями мощности, связанными с наличием напряжения смещения.

Таким образом, назначение и важность напряжения смещения в цепи запрета вполне очевидны. Очевидно также, что наибольшая гибкость будет достигнута при наличии смещения во всех цепях связи, так как в этом случае любую управляющую обмотку в любой цепи можно использовать для запрета. В дальнейшем мы приведем другие соображения, по которым наличие в цепях связи напряжения смещения оказывается целесообразным, а пока заметим, что указываемая обычно в литературе функция этого напряжения – предотвращать «возврат информации» – является наименее существенной, так как в правильно спроектированных элементах исключение возврата информации в большинстве случаев достигается за счет нелинейности вольт-амперной характеристики диода.

Гипнотизирующее действие явления «возврата информации» на разработчиков теории магнитных элементов объясняется, по-видимому, тем, что, как правило, рассмотрение и расчет физических параметров элемента производится в условиях его работы в сдвигающем регистре, где за отсутствием других проблем возврат информации является главной проблемой. Учет условий работы элементов при осуществлении логических операций приводит, как видно, к возникновению новых проблем, которые не выявляются в условиях сдвигающего регистра и, следовательно, не могут быть решены исходя из этих условий.

Мы не станем заниматься анализом других требований, предъявляемых к элементам, осуществляющим операцию «запрет», так как все эти требования и способы их удовлетворения, подробно рассмотренные, как и затронутый выше вопрос о напряжении смещения, в нашей работе [4], будут далее кратко обсуждены в связи с использованием магнитного усилителя с питанием импульсами тока в качестве универсального элемента пороговой логики.

2. Работа магнитного усилителя с питанием импульсами тока в качестве порогового логического элемента

Рассмотренная выше реализация операции «запрет» является простейшим примером использования магнитного усилителя с питанием импульсами тока в качестве порогового элемента. Применяя символику пороговой логики, выражение функции, реализуемой элементом запрета, можно записать в виде

$$f(x, y) = \text{sign}^+(x-y),$$

где x – двузначная переменная, соответствующая запрещаемому сигналу, y – двузначная переменная, соответствующая запрещающему сигналу, sign^+ – функциональный знак, смысл которого определяется так:

$$\text{sign}^+(u) \begin{cases} 1, & \text{если } u \geq 1, \\ 0, & \text{если } u \leq 0. \end{cases}$$

Конечно, для выражения только операции «запрет», которая в булевой алгебре представляется простой формулой $x \wedge \bar{y}$, данная символика нецелесообразна. Однако она правильно отражает логику выполнения этой операции магнитным усилителем с питанием импульсами тока: на входе усилителя происходит алгебраическое сложение ампервитков, дозволенным (в пределах необходимых допусков) величинам которых сопоставлены дискретные значения входных сигналов, затем оценивается значение полученной суммы и в зависимости от результата оценки выдается один из двух возможных выходных сигналов, т. е. производится или не производится передача импульса тока из цепи питания в цепь нагрузки магнитного усилителя.

Заметим, что двузначная пороговая функция общего вида

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{sign}^+(a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i)$$

в принципе осуществляется магнитным усилителем с питанием импульсами тока практически при тех же затратах оборудования, что и функция «запрет», – увеличивается лишь количество входных обмоток используемого трансформатора. Однако наиболее важным является то, что реализация пороговых функций магнитными усилителями с питанием импульсами тока может быть не связана с чрезмерными требованиями в отношении точности применяемых деталей, и системы питания, которые являются главным препятствием на пути практического использования пороговой логики. Известно, например, что в выполненной на транзисторных пороговых элементах экспериментальной цифровой машине DONUT (фирма RCA) [7] было достигнуто сокращение количества необходимых элементов по сравнению с осуществле-

нием той же машины средствами NOR-логики в 4 раза, но во столько же раз пришлось ужесточить допуски на параметры используемых деталей и на значения напряжений питания, т. е. используемая пороговая техника оказалась непригодной для производства и эксплуатации. Вместе с тем примененные в операционных устройствах машины «Сетунь» пороговые логические элементы типа быстродействующих магнитных усилителей с питанием импульсами тока не требуют прецизионных деталей, причем генератор импульсов тока, питающий указанные устройства, включен в сеть даже без стабилизатора. Это замечательное свойство обусловлено самим принципом действия усилителя с питанием импульсами тока. Усилитель данного типа действует как дискретно управляемый трансформатор тока – если условия срабатывания не выполнены, то передача импульса тока из цепи питания в цепь нагрузки не происходит, но если они выполнены, то при наличии в цепях связи напряжения смещения, предотвращающего возникновение тока во входных обмотках при перемагничивании сердечника под действием импульса тока питания (это еще одна важная функция напряжения смещения), импульс ампервитков питания за вычетом ампервитков намагничивания полностью передается в цепь нагрузки. При этом амплитуда тока в цепи нагрузки будет равна

$$I_n = \frac{\omega_n I_n - F}{\omega_n},$$

где I_n – амплитуда импульса тока питания,

F – амплитуда ампервитков намагничивания (чтобы упростить рассуждения, мы отвлекаемся от динамики процесса перемагничивания, полагая, что импульсы тока нагрузки и ампервитков намагничивания по форме идентичны импульсу ампервитков питания),

ω_n, ω_n – количества витков соответственно в питающей и нагрузочной обмотках трансформатора.

Из данной формулы следует, что амплитуда импульсов тока нагрузки (а это именно те импульсы, которыми возбуждаются управляющие обмотки усилителей, так как в цепях связи нет разветвлений) будет у всех усилителей, питаемых одним и тем же током питания, одинаковой при условии, что у них одинаковые значения ω_n, ω_n и F .

Числа витков ω_n и ω_n – величины дискретные и их точное соблюдение не представляет трудности.

Ампервитки намагничивания F являются параметром, значение которого варьируется от одного экземпляра сердечника к другому, а также в зависимости от температуры, при которой происходит перемагничивание, и от характеристик цепи нагрузки и импульса ампервитков питания. Поэтому этот параметр мы должны характеризовать его *номинальным* значением $F_{ном}$ и *допуском* δF , указывающим возможное с учетом всех рассматриваемых вариаций отклонение фактических значений величины F от ее номинального значения:

$$F = F_{ном} \pm \delta F.$$

Амплитуда тока нагрузки усилителей, одинаковых в отношении чисел витков ω_n и ω_n и питаемых одним и тем же током I_n , будет соответственно варьироваться с допуском

$$I_H = \frac{\omega_{\Pi} I_{\Pi} - (F_{\text{ном}} \pm \delta F)}{\omega_H} = \frac{\omega_{\Pi} I_{\Pi} - F_{\text{ном}}}{\omega_H} \pm \frac{\delta F}{\omega_H} = I_{\Pi, \text{ном}} \pm \frac{\delta F}{\omega_H}$$

Достаточная для правильной работы порогового элемента с входными сигналами минимального по абсолютной величине веса стабильность амплитуды I_H определяется следующим условием.

Пусть n – число четное, причем $n/2$ входных сигналов создают управляющие ампервитки положительной полярности и амплитуды их токов макси-

мальны, т.е. равны $I_{\Pi, \text{ном}} \pm \frac{\delta F}{\omega_H}$, а остальные $n/2$ входных сигналов создают

управляющие ампервитки отрицательной полярности и амплитуды их токов минимальны, т.е. равны $I_{\Pi, \text{ном}} - \frac{\delta F}{\omega_H}$. В таком случае некомпенсация управля-

ющих ампервитков будет наибольшей при данном n и составит $n\omega_y \frac{\delta F}{\omega_H}$,

где ω_y – число витков управляющей обмотки, которому соответствуют ампервитки с минимальным весом.

Допустимая некомпенсация управляющих ампервитков определяется максимальным значением м.д.с, еще не вызывающим необратимого изменения намагниченности сердечника, находящегося в состоянии, которое установлено под действием импульса ампервитков питания. Это значение в первом приближении можно принять равным значению коэрцитивной м.д.с. для внутреннего слоя магнитопровода сердечника. Его удобно представить в виде $k_1 F_{\text{ном}}$, где k_1 – константа, значение которой для практически используемых сердечников и режимов работы составляет обычно 0,4–0,6. Таким образом, искомое условие правильной работы магнитного усилителя в качестве порогового элемента с n входами выразится в виде неравенства

$$n\omega_y \frac{\delta F}{\omega_H} \leq k_1 F_{\text{ном}}.$$

Из этого неравенства определим относительную величину допуска на вариацию ампервитков намагничивания, гарантирующего правильность работы порогового элемента при n управляющих сигналах с минимальным по абсолютной величине весом:

$$\frac{\delta F}{F_{\text{ном}}} = \frac{k_1}{n} \cdot \frac{\omega_H}{\omega_y}.$$

Как видно, в принципе имеется возможность сделать этот допуск достаточно свободным при данных k_1 и n , увеличивая отношение чисел витков нагрузочной и управляющей обмоток ω_H/ω_y , что, однако, означает увеличение мощности, потребляемой усилителем от генератора импульсов тока питания. Кстати, баланс вольтсекунд в цепи нагрузки при этом может быть достигнут без введения в нее дополнительных элементов путем соответствующего увеличения напряжения смещения. Это еще одна функция, выполняемая данным напряжением.

Практически удовлетворительные пороговые элементы получаются при сравнительно невысоком уровне мощности питания и вполне приемлемых

значениях допуска $\delta F/F_{\text{ном}}$. Например, базовый элемент машины «Сетунь 70», выполненный на сердечнике из феррита 0,27 ВТ с размерами $3 \times 2,2 \times 0,6$ мм и германиевом диоде типа Д9Б, потребляет в режиме непрерывного переключения 120 мВт [8]. Для этого элемента $\omega_{\text{н}} = 54$, $\omega_{\text{в}} = 10$, $k_1 = 0,5$, $n_{\text{макс}} = 8$, причем относительное значение допуска на вариацию м.д.с. намагничивания F равно

$$\frac{\delta F}{F_{\text{ном}}} = \frac{0,5 \cdot 54}{8 \cdot 10} \approx 0,34,$$

т.е. $\pm 34\%$.

Такая величина допуска вполне приемлема с точки зрения практической выполнимости требований, которые при этом предъявляются к точности и стабильности используемых магнитных сердечников. В достаточно широком интервале рабочих температур этим требованиям способны удовлетворить даже сердечники, изготовленные из низкокоэрцитивных ферритов, у которых, как известно, температурная стабильность во много раз хуже, чем у сравнимых с ними по номинальным значениям параметров сердечников из ультратонких металлических лент.

Для базового элемента, использованного в машине «Сетунь», указанный выше допуск составляет $\pm 27\%$, и при выполнении этого элемента на низкокоэрцитивном сердечнике из феррита марки К-272 обеспечение устойчивой работы в заданном диапазоне температур от $+10$ до $+60^\circ\text{C}$ было достигнуто без каких-либо затруднений с сердечниками в процессе производства. Более того, требования к сердечникам были таковы, что по сравнению с изготавливавшимися в том же цехе и по той же технологии сердечниками для трехтактных элементов процент брака уменьшился в 5–7 раз [9].

Мы рассмотрели наиболее трудное из условий, которые должны быть выполнены при использовании магнитного усилителя с питанием импульсами тока в качестве порогового логического элемента. Другое условие, также касающееся амплитуд м.д.с, состоит в том, что соответствующие наименьшему по абсолютной величине весу управляющие ампервитки $I_{\text{н}}\omega_{\text{в}}$ должны быть достаточными для полного перемагничивания сердечника за установленное время. В случае элемента с n входными сигналами наихудшей в этом отношении является ситуация, при которой $n/2$ сигналов, обладающие наименьшей

допустимой амплитудой $I_{\text{н.ном}} - \frac{\delta F}{\omega_{\text{н}}}$, создают ампервитки положительной

полярности, а $\frac{n}{2} - 1$ сигнал, обладающий наибольшей допустимой амплитудой $I_{\text{н.ном}} + \frac{\delta F}{\omega_{\text{н}}}$ — создает ампервитки отрицательной полярности. Суммарная

амплитуда ампервитков, действующих на сердечник, в этом случае будет равна $\omega_{\text{в}}(I_{\text{н.ном}} - (n-1) \frac{\delta F}{\omega_{\text{н}}})$. Пусть амплитуда м. д. с, достаточная для перемагничивания за установленное время «наихудшего» в допустимых пределах сердечника при наименее благоприятных температурных условиях, равна $k_2 F_{\text{ном}}$ (обычно $k_2 = 1,5-2$). Тогда рассматриваемое условие можно представить в виде неравенства

$$\omega_{\text{в}}(I_{\text{н.ном}} - (n-1) \frac{\delta F}{\omega_{\text{н}}}) \geq k_2 F_{\text{ном}}.$$

Подставив в это неравенство выражение номинального тока нагрузки

$$I_{н.ном} = \frac{\omega_{п} I_{п} - F_{ном}}{\omega_{н}}$$

и решив его относительно $I_{п}$, имеем

$$I_{п} \geq \frac{\omega_{н}}{\omega_{п}} \left(\left(\frac{k_2}{\omega_y} + \frac{1}{\omega_{н}} \right) F_{ном} + \frac{n-1}{\omega_{н}} \delta F \right).$$

Полученная формула показывает, что рассматриваемое условие правильной работы порогового элемента обеспечивается просто ограничением по минимуму амплитуды тока питания $I_{п}$.

Удовлетворение установленных в результате изложенного амплитудных соотношений является необходимым, но не достаточным условием правильной работы пороговых элементов. Входные сигналы представляют собой импульсы тока в первом приближении прямоугольной, а точнее – трапециевидной формы, и для того, чтобы эти импульсы могли взаимно компенсироваться, они должны быть в необходимой степени одинаковыми не только по амплитуде, но и по длительности. Это требование заслуживает особого внимания потому, что длительность импульсов, генерируемых магнитным усилителем с питанием импульсами тока, сильно зависит от реакции цепи нагрузки, а эта реакция при выполнении логических операций оказывается переменной, дискретно изменяющейся [6]. Приходится, во-первых, следить за тем, чтобы усилители, импульсы которых создают на входе данного порогового элемента ампервитки положительной полярности, были нагружены не менее усилителей, создающих на его входе импульсы ампервитков отрицательной полярности, иначе последние будут короче первых и не смогут их скомпенсировать; во-вторых, в тех случаях, когда импульсы входных ампервитков разного знака оказываются номинально одинаковой длительности, надо позаботиться о том, чтобы неизбежный на практике разброс их фактических длительностей в пределах установленного допуска не приводил к неправильной работе элемента.

Исчерпывающее рассмотрение этих вопросов имеется в нашей работе [4], в которой изложена методика проектирования магнитных усилителей с питанием импульсами тока, обладающих заданным качеством амплитудной по потоку (передаточной) характеристики.

Как и всякий элемент, предназначенный для использования в цифровых устройствах, магнитный усилитель данного типа должен обладать существенно нелинейной амплитудной характеристикой: малые сигналы, амплитуда которых составляет менее половины номинальной амплитуды большого сигнала, должны подавляться усилителем, сигналы же с амплитудой, составляющей более половины от номинальной, должны усиливаться, приближаться к полноценному большому сигналу. В магнитных усилителях с питанием импульсами тока физической величиной, но которой различаются уровни сигналов, является магнитный поток (вольтсекунды): большому сигналу соответствует полное изменение потока сердечника по практически предельному циклу гистерезиса, малому сигналу – незначительное изменение в области, близкой к насыщению материала сердечника. Амплитудной характеристикой такого усилителя называется зависимость амплитуды вольтсекунд, наводящихся на его выходной обмотке, от амплитуды вольтсекунд, наводящихся на выходной обмотке идентичного усилителя, работающего на положительно включенную входную обмотку данного усилителя.

Желаемая нелинейность амплитудной характеристики достигается за счет перекрытия импульсов токов питания в двухфазной (двухтактной) системе. Импульсы тока питания каждой из двух фаз, сдвинутых одна относительно другой на 180° , следуют со скважностью, меньшей единицы. При этом перемагничивание сердечника импульсом тока питающей этой сердечник фазы начинается еще при наличии импульса тока другой фазы, под действием которого находятся сердечники усилителей, управляемых по входу импульсом тока нагрузки перемагничиваемого сердечника. Так как амплитуда ампервитков питания в несколько раз превышает амплитуду ампервитков, создаваемых управляющей обмоткой, то сердечники этих усилителей, пока не окончится действующий на них импульс тока питания, не будут перемагничиваться, и некоторая часть вольтсекунд сердечника, нагруженного их входными обмотками, величина которой зависит от степени перекрытия импульсов тока питания и от падения напряжения на элементах цепи нагрузки, т. е. на диоде и главным образом на источнике смещения (это еще одна важная его функция), израсходуется, не произведя никакого изменения потока управляемых сердечников. Оставшаяся часть вольтсекунд управляющего сердечника, расходуемая на интервале между импульсами тока, питающего управляемые сердечники, должна за вычетом потерь на указанных элементах цепи нагрузки обеспечить полное перемагничивание управляемых сердечников. При этом перемагничивание управляющего сердечника, которое должно заканчиваться с определенным запаздыванием после того, как полностью перемагнитились управляемые сердечники, но, естественно, до окончания импульса питания, действующего на этот сердечник, может продолжаться и за пределами интервала между импульсами тока питания другой фазы, т. е. во время перекрытия конечной части перемагничивающего импульса с началом очередного импульса другой фазы.

При значительном перекрытии импульсов питания можно осуществить такой режим, в котором окончания управляющих импульсов всегда будут накрыты импульсами питания другой фазы. В этом режиме совпадение длительностей импульсов при взаимной компенсации ампервитков, очевидно, не требуется. Однако осуществление такого режима связано со значительным увеличением расхода мощности питания, поэтому ни в машине «Сетунь», ни в машине «Сетунь 70» он не был принят. Для выполнения взаимной компенсации в обеих машинах использованы усилители с ужесточенным допуском на длительность импульса тока нагрузки: $\pm 3\%$ при фиксированных значениях температуры и сопротивления цепи нагрузки (для обычных усилителей этот допуск составляет ± 10). Несмотря на то, что при таком допуске некомпенсированная часть входного импульса может достигать 6% , а с учетом увеличения разброса длительностей, обусловленного изменениями рабочей температуры и неидентичностью сопротивлений нагрузки, возрастать до $10\text{--}12\%$, такая компенсация, как показала практика, вполне достаточна для обеспечения безошибочного функционирования устройств в заданном диапазоне температур.

Дело в том, что некомпенсированный участок всегда оказывается на заднем фронте импульса, причем, так как длительность этого фронта, определяющаяся характером процесса перемагничивания сердечника, составляет $20\text{--}25\%$ от полной длительности импульса, то даже в том случае, когда запрещающий импульс вследствие разброса короче запрещаемого на $10\text{--}12\%$ от

их номинальной длительности, амплитуда импульса-разности, воспринимаемого входом усилителя, не превышает 30–40% от номинальной амплитуды этих импульсов (см. рис. 2), и поэтому ощутимое намагничивание сердечника не может произойти. Только в том случае, когда должна происходить взаимная компенсация управляющих ампервитков в условиях максимально допустимого количества возбужденных входов и при наиболее неблагоприятном соотношении длительностей запрещаемых и запрещающих импульсов, возникает опасность неудовлетворительного функционирования порогового логического элемента. Вероятность такого случая весьма мала, и на практике встретиться с ним нам еще не пришлось. Поэтому предотвращать возможность этого случая дальнейшим ужесточением допусков нецелесообразно, а если он все-таки произойдет, то обусловленный им дефект будет обнаружен контролем на уровне простейших логических узлов (субблоков), собранных из первичных элементов (ячеек), так что ущерб будет небольшим.

Мы показали, что правильно спроектированный магнитный усилитель с питанием импульсами тока при вполне приемлемых требованиях к параметрам используемых деталей и к точности производства способен надежно и экономно выполнять функции порогового логического элемента с достаточно большим допустимым числом входов. Пожалуй, наиболее значительными недостатками элементов этого вида являются: ограничения количества возбуждаемых от одного выхода обмоток запрета, если они принадлежат элементам, срабатывающим одновременно [6], и зависимость длительности импульса тока на выходе элемента от его нагрузки. Эти недостатки можно устранить, заменив диод в цепи нагрузки элемента транзистором.

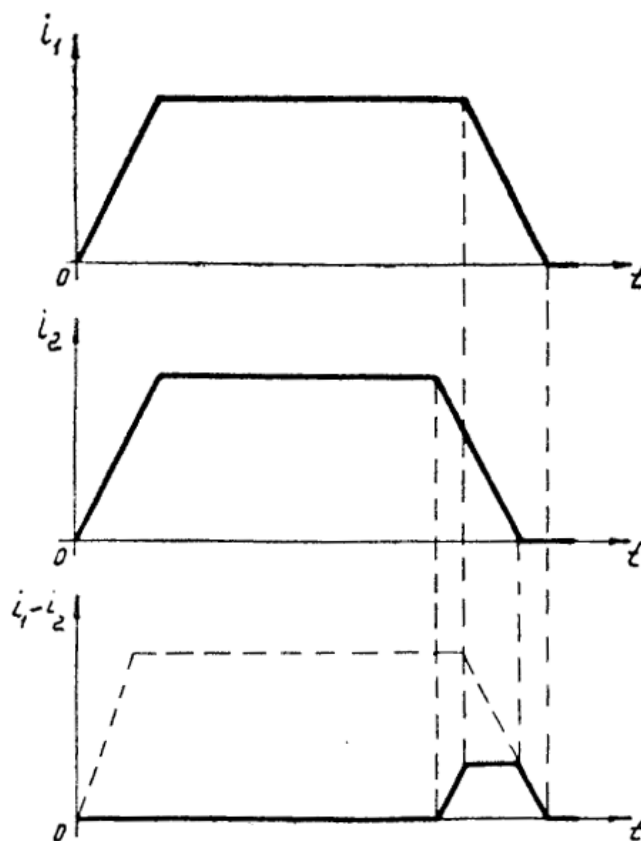


Рис. 2

3. Пороговые элементы и трехзначная логика

Благоприятность порогового способа для осуществления операции трехзначной логики объясняется тем, что сам этот способ базируется на трехзначной основе: веса входов порогового элемента и величина порога могут обладать значениями трех качественно различных видов – положительными, отрицательными и нулевыми. Принцип взаимной компенсации двух равных по абсолютной величине, но противоположных по знаку (полярности) значений и вообще получение из двух различных значений отличного от каждого из них третьего значения – это существенные элементы трехзначной логики, чуждые логике двузначной.

За исключением тех случаев, когда физический пороговый элемент является трехзначным по самой своей природе, или точнее, когда его нельзя разделить на два двузначных элемента (например, индуктивный параметром), он, естественно, состоит из двух двузначных пороговых элементов, т. е. содержит в 2 раза больше оборудования по сравнению с двузначным элементом. Однако надо иметь в виду, что осуществление трехзначных логических элементов другими (не пороговыми) способами связано со значительно большими относительными затратами оборудования.

Как показал опыт разработки машины «Сетунь» [10] и в особенности машины «Сетунь 70», относительный перерасход оборудования при Объединении двузначных пороговых элементов попарно в трехзначные с избытком компенсируется на следующем уровне проектирования за счет того, что структура троичных устройств проще и экономнее структуры функционально равноценных им двоичных устройств. При этом достигается также существенная экономия мощности питания, так как два двузначных элемента, объединенные в трехзначный, не могут срабатывать одновременно, и поэтому максимальное значение потребляемой мощности у трехзначного элемента то же, что и у двузначного, а число элементов в троичном устройстве всегда меньше, чем в двоичном.

В машине «Сетунь» каждый трехзначный элемент состоит из двух одинаковых магнитных усилителей, объединенных общими (включенными согласно или встречно, в зависимости от выполняемой функции) управляющими обмотками. При этом применена двухпроводная система передачи трехзначных сигналов: наличие импульса тока в 1-м проводе соответствует цифре 1, наличие импульса тока во 2-м проводе – цифре –1, отсутствие тока в обоих проводах – цифре 0 [11].

Как уже было сказано, одной из главных причин попарного объединения магнитных усилителей в ячейки с взаимной компенсацией управляющих ампервитков является наличие на выходе невозбужденного по входу усилителя импульсов тока «помехи», которые возникают под действием импульсов питания вследствие обратимых изменений потока сердечника на пологом участке характеристики намагничивания.

Распространенный способ компенсации этих «помех», использованный, в частности, в трехтактных элементах, заключается в том, что последовательно с нагрузочной обмоткой одного трансформатора (рабочего) включается встречно такая же обмотка другого трансформатора (компенсирующего). При этом э.д.с. «помехи», наводящиеся в этих обмотках под действием импульса питания в случае, когда вход элемента не возбужден, должны уравновешиваться и не создавать тока в цепи нагрузки.

Известно, что на практике эта система работала плохо и нетрудно объяснить почему. Для того чтобы равновесие действительно могло иметь место, требуется строгая идентичность сердечников в рабочем диапазоне температур, что уже представляет собой трудновыполнимую задачу. Однако и при удовлетворительном выполнении этого условия желаемый эффект не будет достигнут, так как сердечник рабочего трансформатора будет, очевидно, работать в иных, причем зависящих от частоты перемагничивания его по полному циклу гистерезиса, температурных условиях, чем условия работы сердечника компенсирующего трансформатора. Поэтому точное равновесие невозможно в принципе, и в цепи нагрузки элемента будет возникать импульс тока «помехи», стремящийся уравновесить режимы намагничивания сердечников.

Впрочем, главный порок данного способа компенсации не в этом, а в том, что при компенсации (даже неполной) э.д.с. в цепи нагрузки трансформаторы работают практически в режиме «холостого хода» и под действием импульса тока питания в их обмотках возникают э.д.с, амплитуды которых ограничиваются лишь вследствие деформации импульса тока питания из-за перегрузки питающего генератора. Другими словами, применение компенсации э.д.с. в нагрузочных цепях элементов связано с практически неприемлемыми требованиями к источнику импульсов тока питания. Этот вывод вполне согласуется с отрицательными результатами производившихся на протяжении ряда лет многочисленных попыток создать удовлетворительный генератор импульсов для питания устройств, содержащих значительные количества трехтактных элементов.

Нетрудно заметить, что примененная в ячейках «Сетуни» токовая компенсация «помех» свободна от дефектов, присущих компенсации э.д.с. в цепи нагрузки.

Во-первых, трансформаторы во время компенсации работают не в режиме «холостого хода», а в режиме короткозамкнутых выходов ячейки, так как на входе следующей ячейки имеет место взаимная компенсация ампервитков и намагничивание сердечников не происходит. В таком режиме форма и амплитуда импульсов тока на выходах ячейки слабо зависят от параметров, определяющих характер процесса намагничивания сердечников: так как ампервитки намагничивания малы по сравнению с ампервитками питания, то в первом приближении ими можно пренебречь и считать, что импульсы тока на выходах ячейки получены путем идеальной трансформации импульсов тока питания, и поэтому в точности одинаковы по форме и по амплитуде. Единственным параметром сердечника, для которого требуется установить допуск в этом случае, является изменение магнитного потока на пологом участке характеристики намагничивания сердечника $\delta\Phi$, соответствующее амплитуде ампервитков питания. Величиной этого изменения определяется длительность импульса тока «помехи»:

$$\delta t = \frac{\omega_n \delta\Phi}{u_{н.ср}},$$

где $U_{н.ср}$ – усредненное на интервале δt напряжение на нагрузочной обмотке трансформатора, равное сумме напряжения смещения E и напряжения на диоде u_d . Практически достаточно потребовать, чтобы величина $\delta\Phi$ не превышала некоторой малой части от номинального значения полного изменения потока сердечника $\Delta\Phi$. Например, для сердечников, используемых в ячейках

машины «Сетунь», было принято условие $\delta\Phi < 0,1\Delta\Phi$. При этом поскольку для реальных сердечников существует некоторое естественное ограничение величины $\delta\Phi$ по минимуму, которое в рассматриваемом случае определялось приблизительно значением $0,05\Delta\Phi$, то используемые в ячейках сердечники в отношении величины $\delta\Phi$ удовлетворяют условию

$$0,05\Delta\Phi < \delta\Phi < 0,1\Delta\Phi,$$

из которого следует, что максимально допустимая некомпенсация «помехи» не превосходит 5% от минимального значения большого сигнала.

Во-вторых, амплитуда э.д.с. в нагрузочной обмотке каждого трансформатора во время компенсации не только не превышает, но оказывается в 2–3 раза меньше амплитуды э.д.с, наводящейся в нагрузочной обмотке нормально нагруженного трансформатора при перемагничивании его сердечника в режиме большого сигнала. Поскольку соответствующие амплитуды э.д.с, действующих в обмотках питания, находятся в той же пропорции, то требования к нагрузочной способности генератора импульсов тока питания во время компенсации оказываются приблизительно такими же, как в то время, когда от каждой ячейки, т. е. от каждой пары взаимно скомпенсированных трансформаторов, перемагничивается по одному сердечнику из числа тех, для которых ток нагрузки данной ячейки создает управляющие ампервитки положительной полярности. Выполнение этих требований не является трудной задачей, и они были в достаточной мере удовлетворены как при создании построенного на электронных лампах источника импульсов тока питания для машины «Сетунь», так и при создании транзисторного источника импульсов для машины «Сетунь 70».

Ячейки с компенсацией «помех» по току могут быть, конечно, использованы для построения двоичных устройств, и, по-видимому, с большим успехом, чем ячейки с компенсацией э.д.с. При этом, благодаря тому, что в ячейке с компенсацией по току в отличие от ячейки с компенсацией э.д.с. возможна передача импульсов (неодновременно) через оба усилителя, может быть реализована так называемая система двузначных сигналов с активным нулем или двукратное использование некоторых ячеек путем передачи каждой из них двух несовместных двузначных сигналов. Однако наиболее полное использование ячеек этого типа достигается, очевидно, при троичном кодировании, которое в данном случае в 1,59 раза экономнее двоичного.

Примененная в машине «Сетунь» двухпроводная система передачи трехзначных сигналов соответствует представлению трехзначной переменной в виде двух двузначных ее компонент [1, 10]. Если трехзначной переменной x присваиваются значения $\bar{1}$, 0, 1, то ее можно представить этим способом, задав плюс-компоненту $x^+ = \text{sign}^+(x)$ и минус-компоненту $x^- = \text{sign}^-(x)$, которые, как видно из их определения, принимают значения 0, 1. Плюс-компонента x^+ принимает значение 1 тогда и только тогда, когда трехзначная переменная x принимает значение 1, минус-компонента x^- принимает значение 1 тогда и только тогда, когда трехзначная переменная x принимает значение $\bar{1}$. В остальных случаях компоненты x^+ и x^- принимают значение 0. Естественно, эти компоненты не могут принимать значение 1 обе одновременно.

В двухпроводной системе передачи трехзначных сигналов передача импульса по 1-му проводу, сопоставленная ситуации $x = 1$, означает также $x^+ = 1$, а передача импульса по 2-му проводу, сопоставленная ситуации $x = \bar{1}$,

означает $x^- = 1$. Третья компонента трехзначной переменной x (нуль-компонента x^i) принимает значение 1 тогда и только тогда, когда переменная x принимает значение 0. Этой ситуации соответствует отсутствие импульсов в обоих проводах двухпроводной системы.

Таким образом, в двухпроводной системе трехзначной переменной x сопоставляются два провода (два входа, два усилителя и два выхода ячейки) с двузначными сигналами. При этом операции над трехзначными переменными сводятся к операциям над двузначными компонентами этих переменных. Трехзначная функция произвольного вида $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ n трехзначных переменных x_1, x_2, \dots, x_n реализуется в виде двух двузначных функций компонент $f^+(\)$ и $f^-(\)$, каждая от $2n$ двузначных переменных $x_1^+, x_1^-, x_2^+, x_2^-, \dots, x_n^+, x_n^-$. Индексам + и -, которыми отмечены функции-компоненты, сопоставляются соответственно 1-й и 2-й провода двухпроводной системы. Операция инверсии трехзначной переменной сводится, очевидно, к перестановке этих индексов и практически выполняется путем перекрестного соединения проводов: 1-й выход передающей ячейки соединения со 2-м входом приемной ячейки, а 2-й выход передающей – с 1-м входом приемной.

Вследствие взаимной компенсации ампервитков, при одновременной подаче импульсов на 1-й и на 2-й входы, рассматриваемая ячейка способна выполнять операцию трехзначной пороговой логики вида

$$\text{sign}(x_1 + x_2 + \dots + x_n).$$

Эту операцию обычно характеризуют значением порога, равным 1 [12], или парой значений: 1/−1 [13], хотя логичнее было бы считать ее операцией с нулевым порогом, потому что в одноместном варианте она представляет собой простое повторение значений операнда, т. е. не связана с наличием какой-либо «преграды» (порога) на пути этих значений. В дальнейшем мы будем вместо параметра порог t употреблять параметр смещение a_0 , который связан с определенным согласно [12] параметром t формулой

$$a_0 = 1 - t.$$

Описанные в [12, 13] пороговые операции с порогом $t > 1$, т. е. $a_0 < 0$, можно реализовать, модифицировав данную ячейку введением постоянно действующих управляющих ампервитков определенной амплитуды и полярности. Простой способ технического осуществления этой модификации заключается в следующем. Отношение чисел витков питающей $\omega_{\text{п}}$, управляющей ω_y и нагрузочной $\omega_{\text{н}}$ обмоток трансформатора должно быть таким, чтобы удовлетворялось равенство

$$\omega_{\text{п}} \frac{F}{I_{\text{п}}} = \frac{\omega_y}{\omega_{\text{н}}}.$$

При этом стандартная амплитуда управляющих ампервитков $I_{\text{н}}\omega_y$, в точности равна амплитуде тока питания $I_{\text{п}}$, и, следовательно, всякая обмотка, возбуждаемая током питания создает ампервитки, амплитуда которых кратна стандартному значению управляющих ампервитков $I_{\text{н}}\omega_y$:

$$\frac{I_{\text{п}}\omega_{\text{н}2}}{I_{\text{н}}\omega_y} = \omega_{\text{н}2}.$$

Таким образом, для получения ячейки, выполняющей трехзначную пороговую функцию с заданным значением смещения a_0 , достаточно иметь на ее трансформаторах дополнительную обмотку питания с числом витков $\omega_{H2} = |a_0|$ (это число должно быть на 1 больше значения порога, понимаемого так, как в [12]) и возбуждать эту обмотку импульсами тока питания другой, т. е. не питающей данную ячейку фазы. При этом ячейка, не обладающая дополнительными обмотками питания, характеризуется нулевым значением смещения, ячейка, у которой дополнительные обмотки питания содержат по ω_{H2} витков и создают ампервитки той же полярности, что и ампервитки, создаваемые основными обмотками питания, характеризуется отрицательным значением смещения, равным $-\omega_{H2}$, ячейка с дополнительными обмотками противоположной полярности характеризуется положительным значением смещения $+\omega_{H2}$. Примером ячеек с положительным значением смещения являются так называемые «генераторы единиц», т. е. ячейки, генерирующие непрерывную последовательность выходных импульсов, следующих с частотой следования импульсов тока питания. Возможны также управляемые ячейки с положительным смещением, например ячейки с запретом выдачи очередного импульса выходной последовательности при поступлении импульса на вход.

Осуществленные указанным путем трехзначные пороговые элементы в отношении их функциональных возможностей, при некоторых оговорках технического характера, соответствуют операциям трехзначной (пороговой логики), на основе которых построены методы синтеза троичных устройств, изложенные в [12–15], однако эти методы не были применены при разработке устройств машины «Сетунь», и не только потому, что указанные статьи появились через несколько лет, после того как разработка этой машины была завершена. Разработка машины «Сетунь 70» производилась в то время, когда эти методы уже были известны, но применения они все же практически не получили.

В значительной степени это обусловлено той причиной, по которой и методы формального синтеза двоичных переключательных устройств слабо используются при проектировании цифровых вычислительных машин: в машинах данного типа сравнительно немного узлов, характеризующихся сложными переключательными функциями, причем в основном это стандартные узлы (сумматоры, счетчики, дешифраторы), логика которых тщательно отработана как путем синтеза различными методами, так и в результате многолетних приложения интуиции большого числа людей; кроме того, формальные методы еще не так совершенны, чтобы гарантировать оптимум в реальных условиях, но, как правило, весьма громоздки, и поэтому подавляют интуицию разработчика.

Другая причина, препятствовавшая использованию указанных методов, заключается в том, что функциональные характеристики реальных ячеек машины «Сетунь» все же не полностью совпадают с характеристиками трехзначных пороговых операции, принятых в работах [12–15] в качестве базовых. Например, реальные ячейки обладают весьма ограниченной нагрузкой способностью, а в указанных работах синтез осуществляется без каких-либо ограничений ее. С другой стороны, реальные ячейки предоставляют значительно большие возможности для экономной реализации ряда важнейших операций трехзначной логики. Так, операция отделения положительной компоненты x^+ трехзначной переменной x , для осуществления кото-

рой согласно [14] требуется трехзначный элемент с порогами 2/−2 и константа 1, в системе ячеек машины «Сетунь» выполняется вообще без затрат оборудования и времени: обе компоненты x^+ и x^- всегда даны вместе с представляемой ими трехзначной переменной x благодаря двухпроводной системе передачи сигналов.

В силу названных причин в процессе разработки машины «Сетунь», а затем машины «Сетунь 70» сложился такой подход к построению троичных устройств на основе пороговой логики, при котором главным является стремление выбрать базовые операции и реализующие их ячейки так, чтобы они соответствовали простейшим переключателям, смесителям, разделителям и другим функциональным элементам, удобным для интуитивного синтеза. При этом, очевидно, не исключается возможность использования в тех случаях, в которых это окажется целесообразным, формальных методов синтеза при условии, конечно, что они с достаточной полнотой учитывают существенные особенности реальных ячеек.

Мы рассмотрим основные идеи базирующейся на указанном подходе системы и способы их технической реализации на примере ячеек машины «Сетунь 70», которые представляют собой усовершенствованный вариант ячеек машины «Сетунь». Усовершенствование выразилось, прежде всего, в переходе от двухпроводной системы трехзначных сигналов к однопроводной с использованием импульсов тока положительной и отрицательной полярности. Это позволило сократить почти в два раза количество соединительных проводов, разъемов и паяных соединений, а также значительно уменьшить общее число входных обмоток в ячейках. В остальном усовершенствование носило преимущественно технический характер: введен третий класс в разделении ячеек по нагрузочной способности, содержащий ячейки, предназначенные для возбуждения одновременно трех положительно включенных входных обмоток, уменьшено потребление мощности и улучшена амплитудная характеристика ячеек, ликвидировано разделение ячеек по конструкции корпуса на «левые» и «правые» и т. п.

4. Практическая система модулей трехзначной логики

Базовым элементом операционных устройств в машине «Сетунь 70», как и в машине «Сетунь», служит магнитный усилитель с питанием импульсами тока, но в машине «Сетунь 70» он используется в двух модификациях: с положительной полярностью выходного импульса (элемент типа А) и с отрицательной полярностью выходного импульса (элемент типа Б).

Электрическая схема элемента типа А совпадает с электрической схемой базового элемента машины «Сетунь». Электрическая схема элемента типа Б отличается обратным включением цепи нагрузки (рис. 3, б). На логических схемах элемент как типа А, так и типа Б изображается в виде квадрата. Квадрат, соответствующий элементу типа Б, отличается наличием в месте «подключения выходного провода» точки, которая является символом обратного включения обмотки, в данном случае выходной.

Управляющие обмотки элементов допускают положительное (прямое) и отрицательное (обратное) включение. Положительно включенная обмотка создает управляющие ампервитки положительной полярности при возбужде-

нии ее импульсом тока положительной полярности, а в случае импульса отрицательной полярности производит отрицательный, запрещающий эффект. Отрицательно включенная обмотка, наоборот, действует положительно при поступлении отрицательного импульса тока и запрещает при поступлении положительного импульса. Таким образом, знак управляющих ампервитков определяется произведением знака включения обмотки на знак поступившего импульса. Поскольку каждая управляющая обмотка снабжена двумя выводами, то имеется возможность включить ее или положительно, или отрицательно, в зависимости от возникающей в конкретном случае надобности.

На логических схемах входные обмотки обозначаются в виде прямых линий, упирающихся в левую сторону квадратика-элемента. Если импульсы, возбуждающие данную входную обмотку, подаются с ее второго вывода на ка-

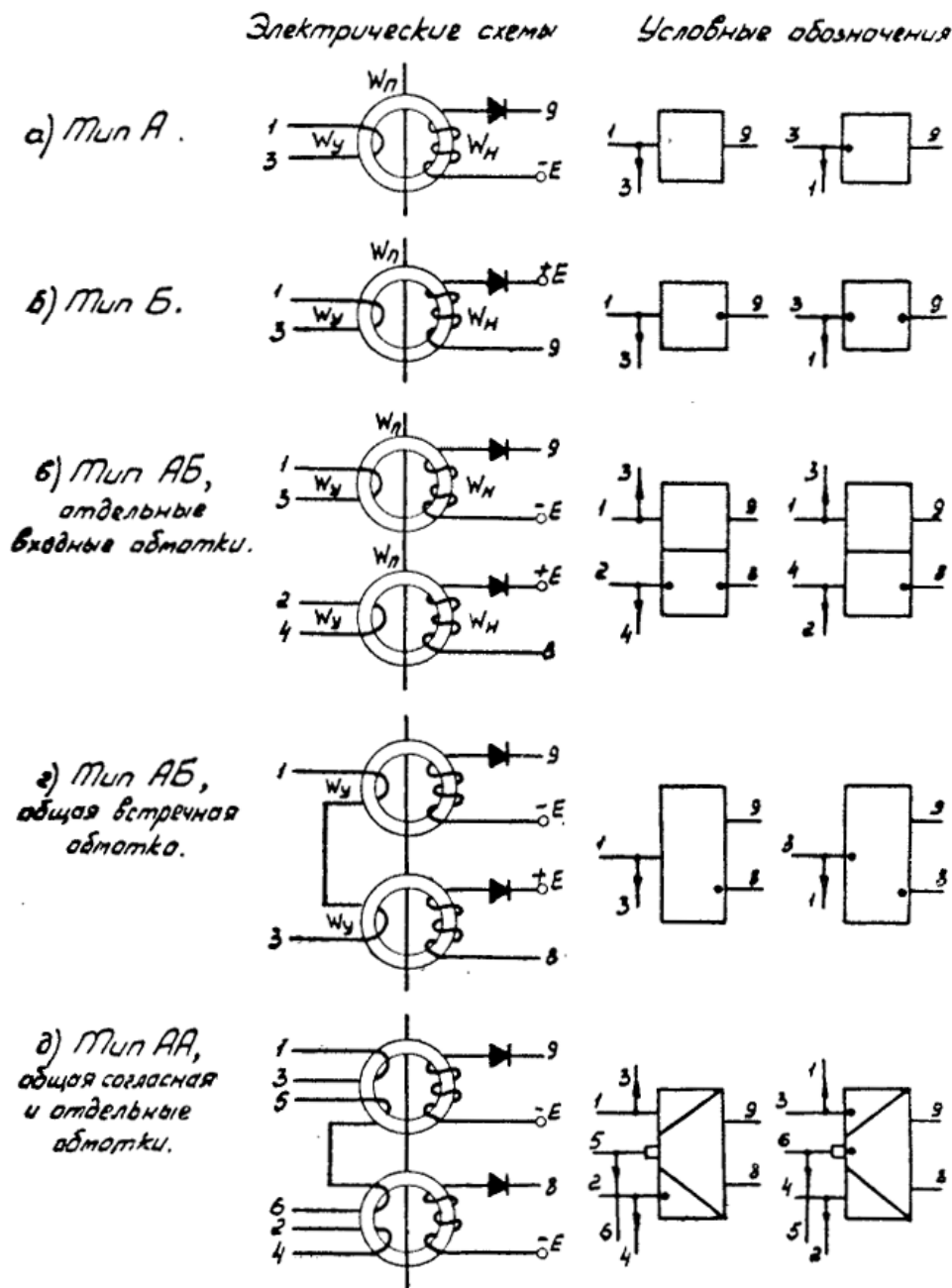


Рис. 3

кую-нибудь другую обмотку, то от соответствующей прямой делается ответвление со стрелкой в направлении отвода. Признаком отрицательного включения обмотки служит точка, помещаемая справа от места упора соответствующей прямой в левую сторону квадрата.

Величина смещения a_0 , характеризующая описанным выше образом порог элемента, указывается цифрой, помещаемой внутри квадрата (для отрицательных значений смещения – со знаком минус в виде черты над этой цифрой). Элементы с нулевым смещением обозначаются квадратами без цифр. Для элементов машины «Сетунь 70» допустимы пять значений смещения: $\bar{2}$, $\bar{1}$, 0, 1, 2.

Описанные элементы реализуют семейство пороговых функций трехзначных переменных x_1, x_2, \dots, x_n , определяемое формулой

$$F_{ka_0a_1\dots a_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = k \operatorname{sign}(a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i),$$

в которой коэффициент k принимает для элементов типа А значение 1, а для элементов типа Б – значение $\bar{1}$, весовые коэффициенты управляющих обмоток a_i принимают значение 1 для положительно включенных и значение $\bar{1}$ для отрицательно включенных обмоток, параметр a_0 характеризует величину и знак смещения.

Заметим, что для осуществления функции n переменных необязательно наличие n управляющих обмоток. В подавляющем большинстве случаев достаточно иметь две обмотки: положительно включенную и отрицательно включенную (а в ряде случаев можно обойтись даже одной), при этом к первой надо подключить все те сигналы x_i , которые входят в формулу с коэффициентами $a_i = 1$, а ко второй – остальные сигналы. Необходимость большого числа обмоток возникает в том случае, когда подаваемые на вход данного элемента сигналы должны быть поданы, кроме того, на вход другого элемента, а также в случае, когда какой-либо сигнал надо подключить с весовым коэффициентом, превышающим 1 по абсолютной величине, что осуществляется путем последовательного соединения соответствующего числа входных обмоток.

Ограничение числа управляющих обмоток у реального элемента обусловлено, главным образом, стремлением уменьшить количество выводов, так как с ростом числа выводов увеличиваются габариты корпуса элемента. При монтаже однострансформаторного элемента в корпусе для ячеек машины «Сетунь 70», допускающем 9 сигнальных выводов, используя один вывод в качестве выходного, имеем возможность осуществить 4 управляющих обмотки.

Совместное применение элементов типа А и типа Б позволяет сократить необходимое количество обмоток и соединительных проводов в конструируемом устройстве по сравнению со случаем использования элементов только одного типа, даже если эти элементы выполнены каждый в виде отдельного модуля. Например, операцию «запрет» можно выполнять при помощи элемента с единственной входной обмоткой, которую следует включить положительно, если запрещаемые импульсы положительны, а запрещающие отрицательны, или отрицательно, если запрещаемые импульсы отрицательны, а запрещающие положительны. В обоих случаях возможна передача сигналов обеих полярностей на вход элемента по одному проводу.

Дальнейшая экономия может быть получена за счет того, что элементы объединяются в пары, образуя двухэлементные модули (ячейки). При этом

благодаря использованию общих для пары элементов управляющих обмоток требуется меньшее в расчете на один элемент количество выводов. Кроме того, в два раза уменьшается необходимое число корпусов. А так как размеры корпуса определяются в основном числом требующихся выводов, и это число при использовании сигналов положительной и отрицательной полярности оказывается для двухэлементной ячейки приблизительно тем же, что и для отдельного элемента, то увеличивать корпус не приходится. Таким образом, применение двухэлементных ячеек позволяет существенно уменьшить габариты устройства и значительно сократить, в нем количество электрических соединений.

Условимся различать в составе двухэлементной ячейки верхний и нижний элементы и будем изображать ее в виде прямоугольника, образованного соединением квадратов-элементов (рис. 3, *в*). Ячейку с верхним элементом типа А и нижним элементом типа Б будем называть ячейкой типа АБ. Возможны также ячейки типов АА, БА, ББ. Тип АБ мы будем считать основным. Типы АА и ББ будем допускать в исключительных случаях, как специальные. Тип БА, в сущности равносильный типу АБ, употребляться не будет.

Установим, что выходу верхнего элемента соответствует 9-й, а выходу нижнего элемента – 8-й вывод корпуса ячейки. В ячейках типа АБ на выходе верхнего элемента полярность импульса положительна, а на выходе нижнего – отрицательна. Если рассматривать совокупность этих импульсов как значения трехзначного сигнала, т. е. считать, что возможность одновременного появления их исключена, то можно обойтись единственным выходным выводом. Мы намеренно пренебрегаем этой возможностью, снабжая каждый элемент отдельным выходным выводом. При этом трехзначный сигнал на выходе ячейки будет представлен в виде отдельных плюс- и минус-компонент, а для перехода к однопроводной системе достаточно соединить выходные выводы ячейки снаружи. Важное значение имеет рациональный выбор конфигурации входных цепей ячейки.

Наиболее универсальной была бы, очевидно, ячейка, элементы которой обладают несколькими отдельными входными обмотками, допускающими построение требуемой конкретной конфигурации путем внешних соединений. Однако такой подход предполагает наличие значительного числа выводов для входных обмоток, что противоречит самой идее двухэлементной ячейки, основу которой составляет стремление к уменьшению числа выводов за счет внутренних соединений. В соответствии с этой идеей рациональное решение заключается в том, чтобы, используя как отдельные, так и общие для обоих элементов ячейки обмотки, реализовать типовые конфигурации входных цепей, экономные в отношении числа выводов и обладающие широкими операционными возможностями. Этот путь наряду с достигаемым при двухэлементных ячейках уменьшением габаритов устройств и упрощением коммутации между ячейками позволяет сократить количество типов ячеек, необходимых для эффективной реализации произвольной логической схемы.

Разработка целесообразных в указанном смысле конфигураций входных цепей ячейки показала, что эти конфигурации соответствуют простейшим пороговым операциям над трехзначными переменными и их компонентами. Описываемая далее система конфигураций входных цепей построена в предположении, что число выводов, приходящихся на входные цепи ячейки, не превосходит 7.

Мы различаем три вида входных обмоток:

1) отдельная обмотка – обмотка, относящаяся только к одному из элементов ячейки (рис. 3, в);

2) общая встречная обмотка – пара включенных встречно обмоток верхнего и нижнего элементов (рис. 3, г);

3) общая согласная обмотка – пара включенных согласно обмоток верхнего и нижнего элементов (рис. 3, д).

Обмотка каждого из этих видов допускает как положительное, так и отрицательное включение. Общая встречная обмотка считается включенной положительно, если ее часть, связанная с верхним элементом, включена положительно, а часть, связанная с нижним элементом, включена отрицательно. Положительное включение общей согласной обмотки означает, что обе ее части включены положительно. Отрицательное включение обмоток обратно положительному.

Общая встречная обмотка является трехзначным аналогом входной обмотки двузначного элемента. Поэтому для нее сохранено то же условное обозначение – прямая линия, «подключенная» к прямоугольнику-ячейке слева (рис. 3, г).

Отличие обозначения общей встречной обмотки от обозначения отдельной обмотки состоит в том, что отдельная обмотка связывается с одним из элементов ячейки, а общая встречная – с ячейкой в целом. Поэтому прямоугольник, обозначающий ячейку с отдельными обмотками, разделяется на два квадрата-элемента (рис. 3, а), а при наличии также общих обмоток – на три сектора (рис. 3, д). Верхний и нижний секторы соответствуют верхнему и нижнему элементам ячейки, а со средним сектором связываются общие обмотки. Таким образом, линия, примыкающая слева к неразделенному прямоугольнику или к среднему сектору разделенного прямоугольника, обозначает общую встречную обмотку, а линия, примыкающая к верхнему или к нижнему сектору (квадрату), обозначает отдельную обмотку соответственно верхнего или нижнего элемента ячейки.

Общая согласная обмотка в отличие от встречной обозначается линией, которая в месте подключения к прямоугольнику-ячейке раздваивается (рис. 3, д). Отрицательное включение общих обмоток обозначается точкой.

Наличие в корпусе ячейки семи входных выводов позволяет осуществить три отдельные или общие обмотки, причем одну общую с выводом средней точки. При этом оказываются целесообразными следующие конфигурации входных цепей двухэлементной ячейки:

1) одна общая встречная обмотка (рис. 3, г),

2) три общие встречные обмотки (рис. 4, а),

3) две общие встречные и одна согласная (рис. 4, в),

4) одна общая встречная и две согласные (рис. 4, б),

5) одна общая встречная и две отдельные (рис. 4, г),

6) одна общая согласная и две отдельные (рис. 3, д). Количество вариантов ячейки, возникающих при использовании данных конфигураций, может показаться слишком большим, особенно если учесть, что допустима вариация величины смещения a_0 , причем как для одного элемента ячейки (рис. 4, г), так и для обоих (рис. 4, б). Однако следует иметь в виду, что с переходом от двузначного элемента к трехзначной ячейке сильно расширяется класс опе-

раций, возможных при данном числе входов. Так, уже число двухместных операций увеличивается с 16 до 19 683.

Рассмотрим функциональные характеристики и пути использования ячеек с перечисленными конфигурациями входных цепей.

Ячейка с тремя общими обмотками реализует трехзначную пороговую функцию вида

$$\text{sign}^+ (a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i) + \overline{\text{sign}^+} (b_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i),$$

которая обычно [12–15] служит базой для формального синтеза троичных операционных устройств.

Конечно, данная реализация связана с сильными ограничениями тех возможностей, из которых исходят три формальном синтезе: резко ограничен выбор значений, присваиваемых коэффициентам a_i , число входов n может превышать 3 лишь при использовании одной и той же обмотки несколькими сигналами. Но эти ограничения вполне приемлемы, если не стремиться к тому, чтобы все синтезируемые функции были суперпозициями функций только одного данного вида. Более того, в реальных операционных устройствах возможности ячейки с тремя встречными обмотками оказываются обычно недоиспользованными, и поэтому дополнительно введена более простая разновидность ячейки этого типа, обладающая единственной встречной обмоткой (рис. 3, з).

Общий вид функции, реализуемой ячейкой с согласными и встречными общими обмотками, выражает формула

$$\text{sign}^+ (a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i) + \overline{\text{sign}^+} (b_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=k+1}^n \bar{a}_i x_i),$$

в которой k младших, $k < n$, значений индекса i соответствуют согласным обмоткам, а прочие $n-k$ значений – встречным обмоткам.

Эта функция является весьма полезным обобщением пороговой функции, реализуемой ячейкой, обладающей только встречными обмотками. Наличие согласных общих обмоток позволяет управлять величиной смещения, дискретно изменяя ее прибавлением или вычитанием создаваемых этими обмотками ампервитков. Простейшим примером использования данной возможности является вентиль трехзначного сигнала – ячейка, в которой передача поступающего на встречную обмотку трехзначного сигнала может быть запрещена при помощи согласной обмотки, создающей на обоих элементах ампервитки отрицательного знака.

На рис. 4, б представлена другая разновидность вентиля этого рода: трехзначный сигнал, подаваемый на встречную обмотку, поступает на выход ячейки лишь при условии, что сумма ампервитков двух согласных обмоток компенсирует постоянное смещение $a_0 = b_0 = -2$, препятствующее прохождению сигнала.

Ячейка с одной согласной и двумя встречными обмотками (рис. 4, в) позволяет сочетать взаимодействие трехзначных сигналов и вариацию смещения ампервитками согласной обмотки.

Дальнейшее расширение функциональных возможностей ячейки связано с применением отдельных обмоток. Посредством согласной общей обмотки

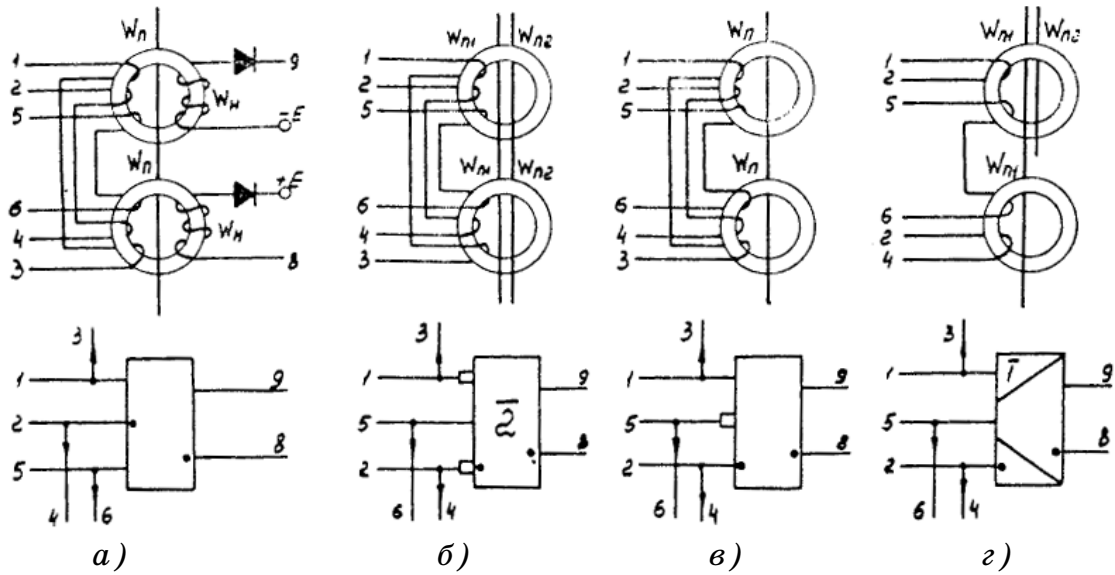


Рис. 4

достигается одинаковое воздействие входного сигнала на оба элемента ячейки, посредством встречной обмотки – воздействие разных знаков, а отдельная обмотка позволяет воздействовать на один элемент, не воздействуя на другой. Конечно, все три возможности достижимы и при наличии только отдельных обмоток путем внешней их коммутации, но это потребует большого числа выводов и сильно усложнит коммутацию, т. е. мы приходим к тому, с чего начали. Выгоднее использовать в основном общие обмотки, предусмотрев при этом ячейки, обладающие также отдельными обмотками (рис. 3, д, 4, з).

В заключение дадим краткую сводку принципиальных и технических решений, на основе которых осуществлено построение описанной системы ячеек.

1. Главным является использование порогового способа, который в условиях трехзначной логики особенно эффективен.

2. Простое и совершенное воплощение порогового способа достигнуто средствами электромагнитной техники, наиболее полное использование которой также связано с трехзначной логикой.

3. Рациональная методика проектирования позволила создать на базе магнитного усилителя с питанием импульсами тока пороговый элемент, обеспечивающий при умеренных требованиях к точности деталей и питания надежное выполнение операций с числом входных сигналов до восьми.

4. Применение двухэлементной ячейки с отдельными и различающимися полярностью выходами элементов обеспечило наряду с уменьшением габаритов и количества соединений возможность совмещения однопроводной передачи трехзначных сигналов и использования по отдельности их компонент.

5. Система типовых конфигураций входных цепей ячеек, сочетающих общие согласные, общие встречные и отдельные обмотки, обеспечивает реализацию обширного класса практически важных переключательных функций и построение операционных устройств при значительном сокращении числа выводов в корпусе ячейки и уменьшении количества внешних соединений.

Л и т е р а т у р а

1. Брусенцов Н.П. Об использовании троичного кода и трехзначной логики в цифровых машинах. В сб.: «Вычислительная техника и вопросы кибернетики», вып. 7. Изд-во МГУ, 1970, стр. 3–33.
2. Маслов С.П. Вопросы построения запоминающих устройств для троично-кодированной информации. В сб.: «Вычислительная техника и вопросы кибернетики», вып. 7. Изд-во МГУ, 1970, стр. 34–52.
3. Брусенцов Н.П., Жоголев Е. А. Алгоритмическое описание структуры и системы команд вычислительной машины «Сетунь 70». Научный отчет ВЦ МГУ № 27-ВТ (417). М., Ротапринт ВЦ МГУ, 1970.
4. Брусенцов Н.П. Цифровые элементы типа быстродействующих магнитных усилителей с питанием импульсами тока. В сб.: «Магнитные цифровые элементы и устройства». Изд-во МГУ, 1966. стр. 4–66).
5. Брусенцов Н.П. Логический элемент. Авт. свид. № 145070 по заявке «Магнитный элемент для осуществления функций логики путем алгебраического сложения входных ампервитков» от 22/2 1961 за № 698409/26. «Бюлл. изобретений, 1962, № 4
6. Брусенцов Н.П. Построение логических схем на магнитных усилителях с питанием импульсами тока. В сб.: «Магнитные элементы автоматики, телемеханики измерительной и вычислительной техники». Киев. «Наукова думка», 1964, стр. 361–366.
7. Coates C.L., Lewis P.M. DONUT: a threshold gate computer, IEEE Trans, on GC, v. EC-13, No. 1, 1964, pp. 240–247.
8. Брусенцов Н.П. Экономичные магнитные переключательные элементы. В сб.: «Магнитные цифровые элементы». М., «Наука», 1968, стр. 112–116.
9. Брусенцов Н.П. Контроль сердечников для быстродействующих магнитных усилителей. XII Всесоюзное совещание по магнитным элементам автоматики и вычислительной техники, 7–8 октября 1968 г. Тезисы докладов. Ташкент, «Фан», 1968, стр. 166–167.
10. Брусенцов Н.П. Опыт разработки троичной вычислительной машины. «Вести. Моск. ун-та», сер. матем. мех., 1965, № 2, стр. 39–48.
11. Брусенцов Н. П., Маслов С. П., Розин В. П., Тишулина А. М. Малая цифровая вычислительная машина «Сетунь». Изд-во МГУ, 1965.
12. Hanson W.H. Ternary threshold logic. IEEF. Trans. on EC, v. EC-12, No. 3, 1963, pp. 191–197.
13. Merrill R.D. Some properties of ternary threshold logic. IEEE Trans.on EC, v. EC-13, No. 3, 1964, pp. 632–635.
14. Merrill R.D. A tabular minimization procedure for ternary switching functions. IEEE Trans. on EC. v. EC-15, No. 4, 1966, pp. 578–585.
15. Боголюбов И.Н. Вопросы синтеза трехзначных логических функций на пороговых элементах В сб.: «Автоматика и вычислительная техника», №.11. Рига, «Зинатис». 1965, стр. 5–17.