

А-43
Министерство приборостроения,
средств автоматизации и систем
управления СССР

Академия наук
СССР

На правах рукописи

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ
(технической кибернетики)

ГЕРМ Э.И.

БЕЗЛИОДНЫЕ МАГНИТНЫЕ
ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

(специальность № 253 - приборы и устройства
автоматики и телемеханики)

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Москва-1968г.

Министерство приборостроения,
средств автоматизации и систем
управления СССР

Академия наук
СССР

На правах рукописи

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ
(технической кибернетики)

ГЕРМ Э.И.

Б Е З Д И О Д Н Ы Е М А Г Н И Т Н Ы Е
Л О Г И Ч Е С К И Е Э Л Е М Е Н Т Ы

(специальность № 253 – приборы и устройства
автоматики и телемеханики)

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Москва-1968г.

За последнее десятилетие возник и успешно развивался новый класс дискретных бесконтактных магнитных устройств — так называемые бездиодные магнитные логические элементы. Схемы бездиодной магнитной логики (БМЛ) получили такое название в отличие от феррит-диодных элементов, содержащих полупроводниковые диоды. Схемы БМЛ привлекают внимание прежде всего простотой конструкции и потенциально высокой надёжностью, так как содержат только магнитопроводы из материала с ППГ и соединительные маловитковые обмотки. Они могут выполняться как на простых тороидальных сердечниках, так и на разветвлённых магнитопроводах сложной формы.

Общие достоинства, отличающие бездиодные магнитные логические элементы:

- 1) высокая надёжность, связанная с применением только миниатюрных магнитопроводов с маловитковыми обмотками;
- 2) произвольный выбор уровней сигналов и малое число витков, которое может быть сведено к 1–2, так как нет необходимости согласовывать характеристики магнитных сердечников и полупроводниковых приборов (диодов или транзисторов);
- 3) простота изготовления;
- 4) невысокая стоимость;
- 5) небольшие габариты;
- 6) высокая устойчивость к воздействию радиации.

К недостаткам схем БМЛ следует отнести:

- 1) относительную сложность источников питания, поэтому при оценке общей надёжности устройств надёжность источника питания становится зачастую определяющей;
- 2) трудности, связанные с получением устойчивой однонаправленной передачи дискретной информации;
- 3) относительно невысокое быстродействие (примерно в диапазоне от нескольких до сотен килогерц).

С последним связана специфика области применения схем БМЛ. Они не используются для построения быстродействующих вычислительных машин, но для построения специализированных вычислительных устройств и решения задач промышленной автоматизации применение бездиодных схем весьма перспективно.

Схемы БМЛ делятся на две основные группы – схемы, принципиально требующие наличия сопротивления в контуре связи, и схемы без сопротивления. Первые имеют так называемый такт медленной подготовки и называются схемами с гашением потока на сопротивлении, с медленным перемагничиванием, резистивными, или просто медленными. Вторые не имеют такта медленной подготовки, и в любом контуре всегда перемагничивается не менее двух сердечников одновременно. Такие схемы носят название схем без гашения потока на сопротивлении, схем без сопротивлений, нерезистивных, или быстрых. В дальнейшем для краткости будут использоваться термины "медленные" и "быстрые" схемы БМЛ.

В диссертации рассматриваются только бездиодные логические элементы с усилением, т.е. допускающие непосредственное включение друг на друга. Логика может также выполняться на различных элементах без усиления – флюксорах, магнитопроводах лестничного типа и т.п., однако в схемах на таких элементах необходимы промежуточные усилители.

Наиболее важными и известными в области схем БМЛ являются работы Рассела, Лжианолы, Прайвза, Бенниона, Крейна, Хелкена, Иохельсона, Авдеенковой и Королькова, Ньюхолла и др., а также работы, проводимые в ЛПИ, ВКАС, ИАТ (ТК).

Отметим, что медленные схемы нашли более широкое применение, чем быстрые, что объясняется недостаточной разработкой теории быстрых схем и большими трудностями в их осуществлении.

Сильный толчок развитию быстрых схем дало применение принципа динамического смещения, осуществлённого Ньюхоллом в так называемых балансных схемах БМЛ. В настоящее время эти схемы привлекают наибольшее внимание.

Большое количество схем БМЛ, как медленных, так и быстрых, с разными конструктивными вариантами без чёткого определения сходства и различия между ними затрудняет ориен-

тировку в схемах и правильную оценку той или иной схемы. Почти все опубликованные работы по БМЛ содержат описание и анализ отдельных схем или их вариантов без сравнения с другими.

Характерно, что все авторы используют чисто словесное описание последовательности работы схем, при котором затруднено даже внешнее сравнение различных схем, не говоря о существенных внутренних свойствах.

Сложившееся в области бездиодных схем положение требует найти единый подход к различным схемам, дать методы, которые позволили бы обоснованно сказать, чем та или иная схема лучше или хуже другой и почему, указать предельные возможности различных схем и попытаться найти возможные пути дальнейшего развития схем БМЛ.

В данной работе ставятся следующие задачи:

1. Дать классификацию схем БМЛ по существенным внутренним свойствам.
2. Дать количественную оценку свойств различных схем, сравнить их между собой и указать предельные возможности.
3. Сравнить схемы по возможному быстродействию с учётом реальных свойств применяемых магнитных материалов.
4. Теоретически и экспериментально исследовать один из наиболее перспективных видов схем – схемы на тороидальных сердечниках с динамическим смещением.

Основное внимание в работе уделяется быстрым схемам, как менее исследованным и более перспективным. Материал по медленным схемам привлекается для сравнения.

Диссертация состоит из введения и шести глав.

В первой главе предлагается и рассматривается метод структурно-тактовых (СТ) диаграмм и на его основе вводится классификация быстрых и медленных схем БМЛ.

Известно, что с точки зрения передачи магнитного потока схемы на тороидальных и разветвлённых магнитопроводах принципиально не отличаются. Поэтому в дальнейшем не делается различия между схемами на тороидальных и разветвлённых сердечниках.

Рассмотрение различных известных быстрых схем на тороидальных сердечниках показывает, что они в первую очередь отличаются количеством сердечников, связанных общим контуром, и последовательностью передачи сигнала, записанного в виде направления остаточного магнитного потока, от одного сердечника к другому. Для сравнения разных схем прежде всего нужен наглядный метод их изображения.

Оказалось, что схемы БМЛ можно представить графически в виде структуры — условного изображения связи магнитных потоков, которая в действительности осуществляется или непосредственно, или через соединительные обмотки. Линии структуры, соответствующие магнитным потокам, будем называть стержнями. Стержням может быть приписано условное нулевое или единичное направление. Таким образом, стержни структуры соответствуют отдельным сердечникам или ветвям разветвлённого магнитопровода, а узлы структуры — контурам связи или физическим узлам разветвлённого магнитопровода.

Оказывается возможным так расположить стержни структуры, чтобы изменения потоков при передаче информации в каждом отдельном такте питания происходили только в стержнях, образующих одну ячейку структуры. Тогда такую ячейку можно обозначить точкой с номером такта. Последовательность тактов при этом изобразится линией, соединяющей эти точки. Такое совмещённое изображение связи магнитных потоков элемента и последовательности тактов названо структурно-тактовой (СТ) диаграммой. Применение СТ-диаграммы подробно пояснено на примере одной известной схемы.

СТ-диаграмму можно считать "топологической" характеристикой схем, так как она отражает пространственные и временные связи между отдельными стержнями. По СТ-диаграмме легко видеть качественные особенности схем — связь между стержнями, последовательность работы, функции отдельных стержней. Предлагаемый метод даёт общий подход ко всем схемам БМЛ, значительно облегчает их анализ и классификацию.

На основе СТ-диаграмм быстрые схемы БМЛ классифицированы. Показано, что может быть построено ограниченное число простых односвязных схем. Для структуры, имеющей 3 стержня

в узле (3 сердечника в контуре), возможны только четыре типа СТ-диаграмм, для структуры с 4 стержнями в узле (4 сердечника в контуре) — только два типа. Таким образом, показано, что существует только шесть основных типов односвязных быстрых схем БМЛ, причём из них два типа ранее описаны не были. Известные быстрые схемы на трансфлюксорах реализуют только один тип из шести возможных.

Существует ряд более сложных схем, в которых связь между элементами осуществляется через несколько магнитопроводов. Таким схемам соответствуют СТ-диаграммы с несколькими стержнями связи, как плоские, так и неплоские. Несколько таких схем, в том числе известная мостовая (ортогональная) схема, рассмотрены подробно.

Работу медленных схем БМЛ также оказалось возможным описать с помощью СТ-диаграмм. В этом случае сопротивление контура связи, на котором "гасится" магнитный поток, соответствует одному из стержней СТ-диаграммы быстрых схем. Для 3 из 6 типов быстрых схем можно получить медленные аналоги. Таким образом, существует три основных типа медленных схем.

Во второй главе рассматривается вопрос усиления мощности в схемах БМЛ. В качестве основной количественной характеристики схем предлагается коэффициент усиления мощности, непосредственно определяющий допустимое число выходов логического элемента. Запас по усилению позволяет увеличить быстродействие, расширить диапазон по температуре и допустимым колебаниям питающих токов, увеличить допуски на параметры сердечников.

Вводится понятие предельного коэффициента усиления мощности $m_{пр}$ при некоторых допущениях. Реальные свойства магнитного материала с учётом условий его работы в схеме характеризуются кратностью γ по току (или по напряжённости поля). Кратность γ определяется отношением напряжённости поля, которое можно приложить к магнитопроводу со стороны контурной обмотки без разрушения его магнитного состояния, к напряжённости поля, которое нужно приложить по той же обмотке, чтобы переключить магнитопровод с за-

данной скоростью. Показано, что $m_{\text{пр}}$ есть функция кратности γ , причём для разных схем эта функция различна. Вид функции $m_{\text{пр}}(\gamma)$ позволяет сравнить различные схемы в равных условиях и показывает теоретический максимум усиления.

Ниже приведена таблица предельных коэффициентов усиления для всех шести типов простых односвязных быстрых схем соответственно классификации, предложенной в I-й главе.

Схема	Предельный коэффициент усиления
Тип 1	$m_{\text{пр}} = \gamma^2$
Тип 2	$m_{\text{пр}} = \gamma(\gamma+1)$
Тип 3	
Тип 4	
Тип 5	$m_{\text{пр}} = \gamma^2$
Тип 6	

Таблица показывает, что схемы в сильной степени различаются по усилению. Наиболее известная схема Иохельсона (тип 6) на кольцевых сердечниках оказывается одной из наилучших по усилению. Единственная ранее известная быстрая схема на трансфлюксорах (тип 2) также полностью не использует возможностей схемы этого типа.

Найдены также предельные коэффициенты усиления многосвязных схем. Показано, что известные схемы - мостовая и схема с "удвоением потока" - не имеют преимуществ по усилению по сравнению с односвязными. Можно полагать, что пределом усиления любых четырёхтактных схем является $m_{\text{пр}} = \gamma(\gamma+1)$. Найдены некоторые схемы с более высоким усилением, но они по существу являются шеститактными.

Все три типа медленных схем оказываются примерно равными по усилению.

Рассмотрены некоторые возможные пути увеличения усиления быстрых схем: применение неразрушающего считывания, использование параллельных выходов, разнесённых по времени, применение более сложных структур. Однако наиболее перспективно для логических элементов увеличение усиления за счёт повышения кратности γ в простых односвязных структурах.

В третьей главе рассмотрены различные режимы работы ферритов в схемах БМЛ - без смещения, со статическим смещением, с динамическим смещением.

При работе без смещения магнитопровод из материала с ППГ имеет симметричные по отношению к направлению тока характеристики. Теоретический интерес представляет тот факт, что и в схемах на компонентах с симметричными характеристиками может быть получено усиление мощности и однонаправленность передачи сигнала. В этом случае усиление и однонаправленность достигаются только за счёт топологии схемы.

Практически все быстрые схемы БМЛ требуют смещения, т.е. подмагничивания сердечников полем, меньшим порогового, которое облегчает запись и затрудняет разрушение информации. Такое смещение обычно производится постоянным током и может быть названо статическим смещением. Исследование показывает, что свойства существующих ферритовых (и микронных) сердечников практически не позволяют построить быстрые схемы со статическим смещением, имеющие достаточно широкие допуски по температуре и параметрам питающих токов.

Применение динамического смещения даёт возможность существенно снизить напряжённость поля, необходимого для записи, и тем самым повысить кратность γ и, следовательно, коэффициент усиления мощности логических элементов. Принцип динамического смещения изложен применительно к разветвлённым и тороидальным сердечникам. Показаны различные возможности управления ключами с динамическим смещением на двух тороидальных сердечниках.

В четвёртой главе дана теория расчёта характеристик записи ключа с динамическим смещением, позволяющая оценить влияние различных факторов на характеристики записи.

В такте записи при отсутствии сигнала индукция обоих сердечников ключа под воздействием управляющего напряжения за заданное время изменяется от насыщенного состояния до нуля. Ток сигнала, подаваемый на ключ в такте записи, ускоряет переключение одного и замедляет переключение другого сердечника, хотя время переключения остаётся тем же самым. Следовательно, сигнал записывается в виде разности магнитных потоков двух сердечников ключа. Поэтому расчёт характеристик записи ключа сводится к расчёту частичного переключения одного сердечника от состояния насыщения под воздействием тока фиксированной длительности, но разной амплитуды. Наклон характеристики записи определяется значением производной

$$\left(\frac{\partial B}{\partial H} \right)_{B=0, t=const.}$$

Применение общепринятого уравнения динамического состояния сердечника

$$\frac{dB}{dt} = z_m \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2} \right) (H - H_0)$$

даёт значение производной $\left(\frac{\partial B}{\partial H} \right)_{B=0} = z_m t$. Однако это выражение даёт качественное расхождение с результатами эксперимента для ключа на тороидальных сердечниках даже при достаточно больших полях.

Значительно более точное описание процесса можно получить, используя уравнения, учитывающие зависимость напряженности поля в кольцевом слое сердечника от радиуса слоя. Считая, что основное уравнение динамического состояния справедливо для элементарного кольцевого слоя сердечника, получим для любого слоя:

$$\frac{dB_x}{dt} = z_m \left(1 - \frac{B_x^2}{B_s^2} \right) \left(\frac{\alpha+1}{2} \frac{1}{X} H - H_0 \right),$$

где α - отношение внешнего и внутреннего радиусов сердечника, а X - отношение текущего и внутреннего радиусов.

Тогда индукция B_x в любом слое определяется как функция от H, t, x :

$$B_x = B_s \operatorname{th} \left[\frac{z_m}{B_s} \cdot \left(\frac{\alpha+1}{2} \frac{1}{X} H - H_0 \right) t - A z \operatorname{th} \frac{B_z}{B_s} \right].$$

Средняя по сечению сердечника индукция B_z определяется интегрированием вдоль радиуса:

$$B_z = \frac{1}{\alpha-1} \int_1^\alpha B_x dx.$$

Последнее выражение и его производные по напряженности поля и времени в элементарных функциях не интегрируются. Однако для производной $\frac{\partial B_z}{\partial H}$ получено более простое выражение, позволяющее существенно упростить приближённое интегрирование:

$$\frac{\partial B_z}{\partial H} = \frac{1}{H} \left(\frac{B_{(\alpha-1)} - \alpha B_{(\alpha-1)} + B_z}{\alpha-1} \right).$$

Три последних уравнения позволяют с помощью метода последовательных приближений достаточно просто вычислить значения $\frac{\partial B_z}{\partial H}$ при любом заданном значении t и B_z . На основании проведённых расчётов предложена приближённая формула, позволяющая учесть влияние геометрии сердечника:

$$\frac{\partial B_z}{\partial H} = \frac{B_z}{H_0} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1} \right)^2 + \left(\frac{B_z}{H_0} \frac{1}{z_m t} \right)^2}}$$

Приведены экспериментальные данные, подтверждающие теоретические расчёты.

Для элемента с динамическим смещением, выполненного на разветвленном магнитопроводе, отношение внешнего и внутреннего диаметров отверстия в первом приближении не влияет на характеристику элемента. Поэтому такой элемент эквивалентен ключу на тороидальных сердечниках, имеющих $\alpha=1$, т.е. в смысле геометрии такая конструкция оптимальна.

Показано также, что динамические характеристики сердечника $B=B(Q_0)$ будут различными в зависимости от того, каким образом достигается изменение Q_0 - изменением длительности импульса тока или амплитуды тока.

Найдены теоретические характеристики записи ключа с динамическим смещением, определяющие необходимую напряженность поля записи при заданном уровне сигнала, времени переключе-

ния и данной геометрии сердечников. При уровне записи по индукции, равном 0,7 от максимально возможного, напряженность поля записи определяется выражением:

$$H_{зап} \approx H_0 \sqrt{\left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1}\right)^2 + \left(\frac{B_s}{H_0} \frac{1}{2mt}\right)^2}$$

В пятой главе различные типы схем БМЛ сравниваются по максимально возможному быстродействию. Поскольку усиление логических элементов есть функция времени переключения, есть возможность найти оптимальные значения коэффициента усиления и времени переключения так, чтобы скорость нарастания мощности сигнала в многоступенчатых разветвлённых схемах была максимальной. Результаты сравнения исследуемых схем по максимальному быстродействию при оптимальном коэффициенте разветвления приведены в виде графиков, где максимальное быстродействие, оптимальные коэффициент усиления и время переключения даны в виде функций от относительного поля трогания феррита. Анализ показывает, что схемы с динамическим смещением превосходят все остальные по быстродействию.

Однако при сравнении между собой различных типов схем необходимо указывать, при каком значении относительного поля трогания идёт сравнение. Независимо от значения поля трогания можно сравнить между собой только 2 вида схем — быстрые на разветвлённых магнитопроводах с динамическим смещением и медленные. Первые имеют быстродействие примерно в 6 раз больше, чем вторые. Известное утверждение, что схемы без гашения потока на сопротивлении имеют быстродействие в 4 раза выше, чем схемы с гашением, оказывается справедливым только в сильно идеализированном случае.

Более целесообразно сравнивать схемы по быстродействию при заданном коэффициенте разветвления. Ниже приведены ориентировочные значения максимальной теоретически возможной тактовой частоты для различных схем при коэффициенте разветвления, равном 2, и при параметрах магнитного материала, соответствующих ферриту типа I, 5 ВТ.

Схемы	Максимальная возможная такт. частота, кГц
Быстрые со стат. смещ., $m_{пр} = \gamma^2$	60
Быстрые со стат. смещ., $m_{пр} = \gamma(\gamma+1)$	200
Быстрые с динам. смещ., $\alpha = 1,5, m_{пр} = \gamma^2$	500
Быстрые с динам. смещ., $\alpha = 1,0, m_{пр} = \gamma^2$	700
Медленные со стат. смещением	130

В шестой главе даны примеры реализации быстрых схем с динамическим смещением на тороидальных сердечниках. Глава содержит результаты теоретического и экспериментального исследования нескольких конкретных вариантов схем с динамическим смещением.

Поскольку ключ с динамическим смещением в силу симметрии схемы действует одинаково при разных направлениях тока рабочей обмотки, есть смысл строить схемы, работающие с разнополярными сигналами. Если при этом обеспечить устойчивую передачу нулевого уровня сигнала, то получается троичный элемент, работающий на сигналах вида $-I, 0, +I$. Кроме того, на основе той же схемы легко могут быть получены двоичные элементы с двумя вилами передаточных характеристик — двоичной с нулем $(I, 0)$ и биполярной $(-I, +I)$.

Разработаны два типа троичных и двоичных элементов. Даны основы расчёта таких схем и проведено их экспериментальное исследование. Выполнено несколько вариантов регистров сдвига, построенных с применением ферритовых сердечников типа I, 5 ВТ размером $3 \times 2 \times 1,5$ мм и 0,16 ВТ размером $3 \times 2,2 \times 1$ мм. Приведены осциллограммы напряжений и магнитных потоков при разных режимах работы. Получены характеристики вход-выход элементов, зоны устойчивой работы замкнутого регистра при изменении параметров питания, проведены некоторые температурные испытания.

Рассмотрено влияние на устойчивость характеристики вход-выход различных факторов: порога сердечников связи, сопротивления и индуктивности контура связи.

В диссертации рассмотрены общие и ряд частных вопросов, касающихся бездиодных магнитных логических элементов. Предложен общий подход ко всем известным видам схем БМЛ с помощью метода СТ-диаграмм, причём в качестве основного критерия сравнения принят коэффициент усиления мощности. Основные схемы БМЛ, кроме схем на тонких плёнках, подробно рассматриваются и сравниваются. Дана оценка основных показателей, характеризующих схемы БМЛ, выполненные как на тороидальных, так и на разветвлённых магнитопроводах.

Основные полученные результаты:

1. Предложен метод СТ-диаграмм, отражающий топологические свойства схем. СТ-диаграмма является удобным графическим способом описания работы схем и выявляет их качественные особенности. Показано топологическое соответствие между быстрыми и медленными схемами.

2. На основе метода СТ-диаграмм предложен принцип классификации схем по существенным качественным признакам. Найдено, что возможно построить только 6 основных типов простых односвязных быстрых схем БМЛ, в том числе несколько новых, ранее неизвестных схем, и 3 типа медленных схем. Предложенный метод применим и к более сложным схемам, которые описываются многосвязными и неплоскими СТ-диаграммами. Рассмотрен ряд таких схем, в том числе известная мостовая (ортогональная) схема.

3. В качестве основной количественной характеристики схем БМЛ предложен предельный коэффициент усиления мощности. Предельный коэффициент усиления позволяет обоснованно сравнить различные схемы в равных условиях с учётом реальных свойств магнитных материалов и определить предельные теоретические возможности схем. Два из 6 возможных типов простых односвязных схем — тип 2 и тип 6 — имеют наибольший предельный коэффициент усиления $m_{пр} = \gamma(\gamma + 1)$.

Показано, что многосвязные схемы могут иметь более высокое усиление только за счёт увеличения числа тактов. Известные схемы — мостовая и схема с "удвоением потока" — не имеют преимуществ по усилению перед простыми односвязными схемами.

4. Рассмотрены возможные пути повышения коэффициента усиления логических элементов. Для логических элементов наиболее перспективно увеличение усиления за счёт повышения кратности по току γ в простых односвязных структурах. Наибольшее увеличение кратности может быть получено применением принципа динамического смещения.

5. Получены уравнения, позволяющие достаточно просто рассчитать процесс переключения ферритового сердечника по частным циклам с учётом зависимости напряжённости поля от радиуса. Показано, что динамические характеристики $V=V(Q_2)$ будут различными в зависимости от того, каким образом достигается изменение Q_2 — изменением времени или амплитуды переключающего тока. На основе выведенных уравнений даны простые приближённые выражения характеристик ключа с динамическим смещением.

6. Все схемы БМЛ сравниваются по быстродействию в случаях оптимального и заданного коэффициента разветвления. Показано, что оптимальный коэффициент разветвления различен для разных схем. Быстродействие всех схем в сильной степени зависит от относительной напряжённости поля трогания магнитного материала, поэтому конкретное сравнение схем по быстродействию возможно только при заданном значении относительного поля трогания. Наибольшим быстродействием обладают схемы с динамическим смещением, затем быстрые схемы со статическим смещением. Приведены ориентировочные значения максимально возможной тактовой частоты в килогерцах для всех типов схем.

7. Проведённые исследования показали, что лучшими среди схем БМЛ по всем показателям являются схемы с динамическим смещением. Эти схемы могут практически обеспечить быстродействие порядка нескольких сотен килогерц и достаточно широкие допуски на параметры источников питания. Ключ с динамическим смещением на разветвлённом магнитопроводе обладает лучшими характеристиками, чем ключ на тороидальных сердечниках.

8. Проведено экспериментальное исследование нескольких

вариантов быстрых схем на тороидальных сердечниках с динамическим сметением. Результаты экспериментальных исследований подтверждают основные теоретические положения.

По отдельным разделам работы были сделаны доклады на X и XI Всесоюзных совещаниях по магнитным элементам автоматики и вычислительной техники в Каунасе (1964) и Таллине (1966).

Основные вопросы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Герм Э.И., Маторина В.С. Сравнительная оценка быстрых схем БМЛ по структурно-тактовым диаграммам и коэффициенту усиления мощности. "Автоматика и телемеханика", 1967, № 12.
2. Герм Э.И. Стабилизация среднего значения импульсов напряжения питания для магнитных логических элементов. Магнитные элементы промышленной автоматики. Изд. "Наука", 1966.
3. Герм Э.И. Дроссельные бездиодные магнитные логические элементы на тороидальных сердечниках с медленной подготовкой. Тезисы докладов XI Всесоюзного совещания по магнитным элементам. Таллин, 1966.
4. Герм Э.И., Маторина В.С. Сравнительная оценка схем БМЛ без гашения потока на сопротивлении по СТ-диаграммам и коэффициенту усиления мощности. Тезисы докладов XI Всесоюзного совещания по магнитным элементам. Таллин, 1966.
5. Васильева Н.П., Маторина В.С., Петрухин Б.П., Прохоров Н.Л., Седых О.А., Герм Э.И. Области взаимоустойчивых характеристик логических элементов и вопросы проектирования. "Автоматика и телемеханика", 1965, № 6.

Т-13061 от 2.10.68 г.

Заказ 387 Объем 2 печ.л. Тираж 120

Москва В-485, Профсоюзная ул., 81, ИАТ