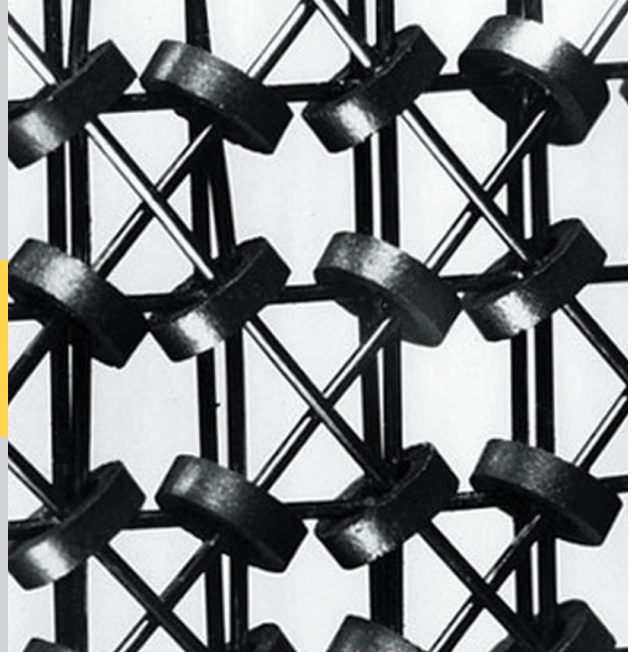




АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,

д. т. н., проф. каф.
систем автоматического управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
a.mikerov@gmail.com

Использование оперативной памяти на магнитных сердечниках было важным 30-летним этапом в середине XX в. — промежуточным для устройств памяти в переходе от электронных ламп к интегральным микросхемам.



ИЗОБРЕТЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ КОМПЬЮТЕРА

Первые компьютеры, созданные после Второй мировой войны, были оснащены оперативными запоминающими устройствами (ОЗУ) на ртутных линиях задержки, электронно-лучевых трубках и магнитных барабанах. Эти ОЗУ были дорогими, громоздкими, имели ограниченный размер памяти и были непригодны для мобильных приложений, например бортового оборудования [1]. Решить эти проблемы позволили

запоминающие устройства на магнитных сердечниках.

На рис. 1 показана зависимость в виде петли гистерезиса индукции в сердечнике B от напряженности магнитного поля в нем H , пропорциональной току управляющей катушки, намотанной на сердечник, где B_s и H_s — индукция и напряженность насыщения соответственно.

Сердечники с более пологой и узкой петлей (рис. 1а) использовались в магнитных усилителях, созданных в начале XX в. и широко применявшихся в усилительной технике вплоть до конца 1950-х гг., когда им на смену пришли транзисторы [2].

Для устройств магнитной двоичной памяти необходима релейная характеристика, близкая к прямоугольной (рис. 1б). Если магнитный сердечник намагничен до индукции насыщения ($+B_s$ или $-B_s$), то снижение напряженности магнитного поля H в нем до нуля приведет к остаточной намагниченности $B_r \approx B_s$, которая сохраняется сколь угодно долго. Впервые эта особенность была использована американским инженером Фредериком Вие (Frederick Viehe), работавшим дорожным инспектором в Лос-Анджелесе. Он создал в домашних условиях запоминающий трансформатор для

двухрядного двоичного счетчика и запатентовал его в 1947 г. (патент США US2992414А) (рис. 2) [3–5].

Устройство содержит входной запоминающий тороидальный трансформатор (Тр) с тремя обмотками: входной w_1 , на которую поступают счетные импульсы, выходной w_2 , подключенной с счетной схемой (С) на пентодах, и обмотку обратной связи w_3 , соединенную со схемой обратной связи (ОС). Число поступивших импульсов отражается индикатором (И). Особенность этого счетчика состояла в том, что при внезапном сбросе питания текущие показания индикатора (И) запоминались и сразу восстанавливались при возврате питания. Для этого схема (С) содержала, помимо входного, еще три подобных запоминающих трансформатора. Судя по всему, никакого практического применения этот счетчик не нашел, но вызвал последующие судебные споры.

В 1949 г. Говард Эйкен (Howard Aiken), создавший в Гарварде один из первых компьютеров Mark I и заменивший затем в Mark III электромеханическую память на магнитный барабан, начал работу по заказу ВВС США над полностью электронным компьютером Mark IV [6–8]. Он пригласил присоединиться китайца Ань Ванга (An Wang),

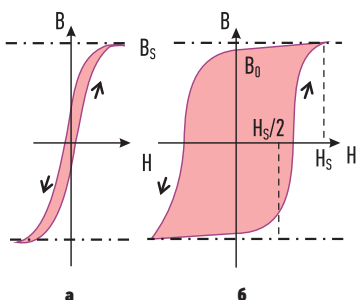


РИС. 1. ►

Петля гистерезиса:
а) электротехническая
сталь; б) феррит

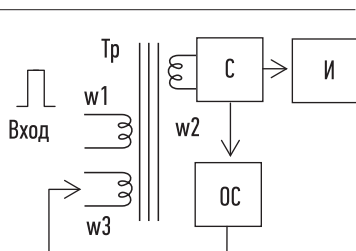


РИС. 2. ►

Счетчик Вие

прибывшего в США после войны по стипендии китайского правительства и только что получившего докторскую степень по физике Гарвардского университета. Тот предложил использовать в качестве памяти линию задержки на магнитных сердечниках, работавшую подобно ультразвуковой линии задержки компьютера EDSAC Кембриджского университета [1]. Основным новшеством такой линии, запатентованной Вангом в 1949 г., был механизм записи/чтения информации, показанный на рис. 3 [2–5, 7, 8].

Это устройство содержит тороидальный запоминающий трансформатор (Тр) с обмоткой записи w_1 , чтения w_3 и выходную w_2 , подключенную через диод (Д) к индикатору (И). Состояние «цифровая 1» соответствует индукции в сердечнике $+B_s$, для записи которого на вход w_1 подается положительный импульс (рис. 1). Для чтения на вход w_3 подается отрицательный импульс, переводящий индукцию в сердечнике в состояние $-B_s$, при этом в выходной обмотке w_2 индуцируется положительный импульс, поскольку согласно закону Фарадея индуцируемая ЭДС обратна производной от изменения магнитного потока, т. е. индукции в сердечнике. Этот импульс проходит через диод и высвечивается в индикаторе (И) как 1. Если же первоначальное состояние сердечника было $-B_s$, то отрицательный импульс чтения не вызывает перемагничивания сердечника и индикатор покажет 0. Однако после чтения состояние сердечника $+B_s$ стирается. Чтобы этого не произошло, информация одновременно переносится во второй сердечник, где и хранится. Таким образом, в памяти Ванга каждая ячейка памяти содержит два сердечника. Последовательное соединение таких ячеек и введение обратной связи, подобной ртутной трубке, создают магнитную линию задержки [1, 6, 7]. Следовательно, подобная память, аналогичная ртутной, является последовательной.

Ванг оформил патент на свое имя и за свой счет, поскольку в те времена в Гарварде не одобряли патентования результатов научных исследований. Это позволило ему впоследствии создать процветающую компьютерную компанию Wang Laboratories стоимостью \$3 млрд со штатом в 30 тыс. человек [3].

Память произвольного доступа (RAM) стала возможной только после создания в конце 1940-х гг. матричной памяти, в которой использовался механизм записи/чтения Ванга, однако каждая ячейка имела всего один сердечник. Такую память разработали независимо друг от друга американские инженеры Джей Форрестер (Jay Forrester) и Ян Райхман (Jan Rajchman).

Форрестер стал магистром электротехники в Массачусетском технологическом институте (MIT), где и прошла вся его 76-летняя карьера, вплоть до его кончины в 98 лет [3–5, 7]. После войны он занимался аналоговым моделированием авиационных систем, которое заменил на цифровое, создав компьютер с памятью на электронных лампах. Проект получил неожиданную поддержку в 1949 г. после взрыва в СССР атомной бомбы, что вызвало создание национальной системы противовоздушной обороны США, для которой потребовались компьютеры с гораздо большей оперативной памятью. Вопрос был решен Форрестером в 1953 г.: он заменил электронную память магнитной. Затем он круто сменил область деятельности, занявшись динамикой социально-экономических систем.

Другим создателем магнитной памяти по праву является Райхман, поляк по национальности, получивший докторскую степень в Технологическом институте Цюриха. В 1935 г. он иммигрировал в США и проработал там всю оставшуюся жизнь в знаменитой радиоконпании RCA, создав, в частности, знаменитую трубку памяти Selectron [1–7, 8].

Память Форрестера, известная также под названием схемы совпадения токов, из его патента, заявка на который была подана в 1951 г., показана на рис. 4 [4, 7, 9, 10].

Элементами этой памяти были ферритовые сердечники (1–4), имеющие прямоугольную петлю гистерезиса (рис. 16) и снабженные тремя обмотками. В данном случае использовано четыре колечка, образующих матрицу $X_1 X_2 Y_1 Y_2$ для хранения 4 бит. Входы X_1, X_2, Y_1 и Y_2 подключены к обмоткам выбора колечка, а верхние, являющиеся обмотками чтения S, соединены с выходом через диоды D_{12} и D_{34} . На входы подаются положительные и отрицательные

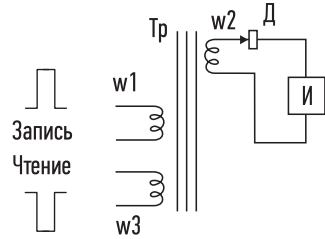
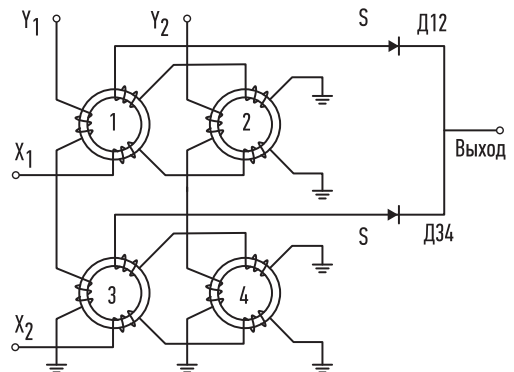


РИС. 3. ◀
Память Ванга

импульсы тока, амплитуда которых создает напряженность магнитного поля $H_s/2$, равную половине перемагничивающей силы H_s (рис. 1). Таким образом, перемагничивание каждого сердечника возможно лишь при одновременной подаче импульса по входу выбора X и Y (совпадении токов).

Первоначально посредством подачи отрицательных импульсов на все входы сердечники приводятся в состояние $-B_s$, соответствующее цифровому 0. При записи цифровой 1 на соответствующие входы подаются, подобно памяти Ванга, положительные импульсы, переводящие эти сердечники в состояние $+B_s$, при этом в обмотках чтения индуцируется отрицательный импульс, не проходящий через диоды на выход. Для чтения информации на соответствующие входы сердечника подаются отрицательные импульсы, переводящие его из состояния $+B_s$ в $-B_s$, что вызывает в обмотке чтения положительный импульс, соответствующий цифровой 1 и проходящий на выход. Если же выбранный сердечник находился в состоянии $-B_s$, то при чтении на выходе импульс будет отсутствовать (цифровой 0). Очевидно, что при каждом чтении записанная в матрице информация разрушается и ее необходимо снова перезаписывать.

РИС. 4. ▼
Память Форрестера



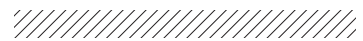


РИС. 5. ▶
Ферритовый сердечник

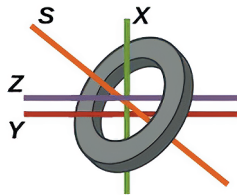


РИС. 6. ▼
Матрица памяти

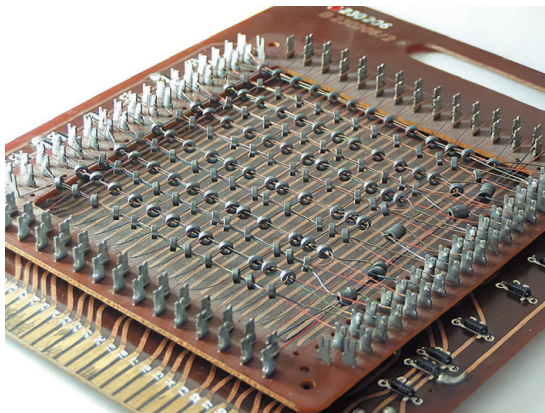


РИС. 7. ▶
Пластина трансфлюксора

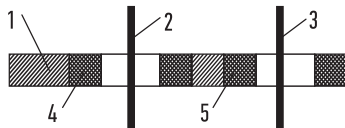


РИС. 8. ▶
Куб памяти

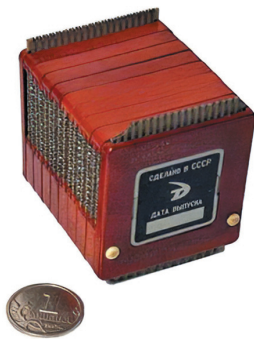
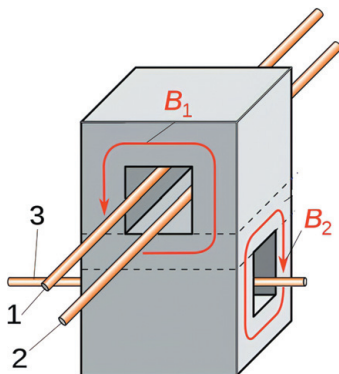


РИС. 9. ▶
Биакс



Ферритовые тороидальные сердечники имеют диаметр 1–2 мм, а в качестве обмоток применяются просто провода, пропущенные в отверстие, как видно из рис. 5, где показан предложенный Райхманом четырехпроводной вариант памяти с дополнительным проводом запрета Z, переводящим колечко перед записью в нулевое состояние [3, 7, 8].

Пример матрицы памяти на 144 бита представлен на рис. 6.

Монтаж подобной матрицы был весьма трудоемким, поскольку выполнялся обычно женщинами вручную под микроскопом [3]. Более удобной для автоматизации была магнитная память на многоотверстных ферритовых пластинах, предложенная Райхманом в 1957 г. и названная им трансфлюксором (рис. 7) [3, 6, 7, 10]. На рисунке показана ферритовая пластина (1) с двумя отверстиями, через которые пропущены намагничивающие провода (2) и (3).

Расстояние между отверстиями подбирается таким образом, чтобы зоны намагничивания феррита (4) и (5) не перекрывались, поэтому каждое отверстие действует подобно отдельному сердечнику. Такая конструкция не только упрощает процесс изготовления сердечников, но и позволяет обеспечить печатный монтаж соединительных проводов. Матричная память на многоотверстных пластинах применялась для бортовых компьютеров как в США, так и в СССР вплоть до 1990-х гг. На рис. 8 показан так называемый куб памяти, созданный в Ленинграде в 1969 г. Иозефом Вениаминовичем Бергом в ОКБ Филиппа Георгиевича Староса для первых микро-ЭВМ УМ1 и УМ2 и других компьютеров специального назначения, например для Международной космической станции [11]. В нем использовались пластины с 256 отверстиями.

Все рассмотренные выше схемы памяти разрушают записанную информацию при чтении, поэтому были разработаны другие методы неразрушающего считывания.

Одним из них было применение магнитного элемента с намагничиванием по двум взаимно перпендикулярным направлениям, называемого Биакс (от англ. Bi Axes core) и созданного компанией Ford в 1959 г. (рис. 9) [3, 10, 12].

В данном случае провода записи (1) и чтения (2) расположены перпендикулярно проводу опроса (3). При записи сердечник намагничивается до индукции насыщения B_1 , направленной по оси верхнего отверстия. При подаче импульса опроса индукция по оси нижнего отверстия B_2 поворачивает суммарную индукцию сердечника на определенный угол, но не меняет его амплитуду в режиме насыщения, вследствие чего ее проекция индукции B_1 уменьшается, что вызывает появление ЭДС в проводе чтения (2). При снятии импульса опроса индукция B_1 возвращается в исходное состояние, т. е. разрушения записанной информации не происходит.

Частота считывания информации при этом доходит до 5 МГц, однако частота записи на порядок меньше. Вследствие своей дороговизны такая память применялась главным образом в ракетно-космической аппаратуре.

История развития магнитной памяти сопровождалась рядом судебных споров, в частности с участием компании IBM [3, 7, 8]. Желая монополизировать рынок магнитной памяти, эта компания приобрела права на основной патент Форрестера за \$13 млн, что было тогда одной из самых дорогих патентных сделок. Тем временем и Ванг предложил купить его патент, на что IBM согласилась, понимая, что в изобретении Форрестера использован механизм записи/считывания Ванга. Однако из предложенной цены в \$500 тыс. последние \$100 тыс. выплачивались при условии, что патент Ванга никем не будет оспорен. Ванг согласился, что и позволило ему создать Wang Laboratories. Тогда-то и появился Вие с жалобой в патентное ведомство на нарушение его патентных прав. Таким образом Ванг лишился части обещанного вознаграждения, но существовало мнение, что именно IBM инициировала демарш Вие, патент которого был также приобретен компанией за \$500 тыс.

Другое судебное разбирательство возникло после протеста Райхмана, поданного на патент Форрестера, поскольку дата подачи заявки Райхмана на подобное устройство в 1950 г. была более ранней [6, 8]. Дело было улажено внесудебным порядком, при котором за Форрестером был признан приоритет на организацию памяти, а за Райхманом — на ее четырехпроводной вариант с проводом запрета.

Важным аргументом для суда была рабочая тетрадь Форрестера 1949 г., должным образом заверенная, что по американскому законодательству считается неоспоримым доказательством приоритета [3].

Почти 30 лет спустя после первого применения в компьютере Whirlwind в 1953 г. память на магнитных сердечниках была основным видом ОЗУ для коммерческих и военных компьютеров, таких как IBM 704 и 705 (1954), советских компьютеров БЭСМ, БЭСМ-2, БЭСМ-6, М-20, УМ1 так и бортового компьютера корабля «Аполлон-11», доставившего космонавтов на Луну в 1969 г. [3, 7, 8]. При этом размер памяти увеличился с 1024 до миллионов бит, время выборки снизилось с 5 мкс до доли 1 мкс, а цена — с \$1 до \$0,01 за бит. Для военного и космического применения важнейшими особенностями этой памяти стали стойкость к радиации и сохранение информации в обеспокоенном состоянии. Эти преимущества не утратили своей привлекательности и до 1970-х гг., когда начался повсеместный переход к полупроводниковой памяти. Таким

- Хотя свойства ферромагнитных материалов были давно известны, именно Вие предложил в 1947 г. конструкцию первого запоминающего трансформатора.
- Механизм записи/считывания информации запоминающего трансформатора изобрел Ванг, тогда как Форрестер и Райхман разработали матричную систему организации магнитной памяти.
- Господство магнитной памяти продолжалось около 30 лет и закончилось возвратом к электронной памяти, но уже на полупроводниковых интегральных микросхемах.

образом, магнитная память стала первой попыткой отказаться от громоздких и ненадежных электронных ОЗУ на лампах. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Микеров А. Г. Первые устройства компьютерной памяти // Control Engineering Россия. 2021. № 6 (96).
2. Микеров А. Г. Магнитные усилители — между лампами и транзисторами // Control Engineering Россия. 2020. № 4 (88).
3. Memory & Storage. www.computerhistory.org/revolution/memory-storage/8.
4. A Brief History of the Evolution of RAM Computer Memory. rhartshome.com/summer-2013/jamesralph/History_print.html.
5. Reilly E. D. Milestones in computer science and information technology. Westport: Greenwood Press. 2003.
6. Cuff T. Computer Memories, A History, Revision 2. www.researchgate.net/publication/334233647_Computer_Memories_A_History_Revision_2#fullTextFileContent.
7. www.en.wikipedia.org/wiki/Magnetic-core_memory.
8. Полунов Ю. Подари мне кольцо // PC Week/RE. 2007. № 42 (600).
9. Forrester J. W. Multicoordinate digital information storage device. PatentUS 2736880. 11.5.1951.
10. Крайзмер Л. П. Устройства хранения дискретной информации. Л.: Энергия, 1969.
11. Гальперин М. Они вдохнули жизнь в советскую микроэлектронику (к 100-летию Феликса Староса) // Control Engineering Россия. 2017. № 3 (69).
12. www.ru.wikipedia.org/wiki/Бианк.