

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПЛОСКИХ
ПЛЁНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
С ЗАМКНУТЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

В.Л. Дятлов

I. Введение. Постановка задач

Как хорошо известно, плёночные магнитные элементы памяти и арифметических устройств ЭВМ, в отличие от элементов с ферритовыми или пермалловыми сердечниками, можно изготавливать с незамкнутыми магнитопроводами. Однако разработка плёночных элементов с незамкнутыми магнитопроводами показала, что они не имеют существенных преимуществ перед элементами достаточно малых размеров с ферритовыми и пермалловыми сердечниками и даже уступают им по ряду основных параметров, кроме быстродействия. Во-первых, такие плёночные элементы потребляют большие токи, что, в свою очередь, снижает эффективность работы соответствующих устройств (из-за больших потерь мощности, необходимости применения мощных источников, больших индуктивных наводок и т.д.). Во-вторых, эти элементы занимают объем, сравнимый по величине с объемом обычных магнитных элементов с сердечниками достаточно малых размеров. В-третьих, в устройствах на этих элементах значительно труднее уменьшить величину эдс нежелательных индуктивных наводок до приемлемых значений по сравнению с устройствами на монолитных сердечниках, что за-

трудняет применение большого количества пленочных элементов в одном комплексе. Наконец, в-четвертых, на основе пленочных элементов с незамкнутыми магнитопроводами невозможно создать удовлетворительные нелинейные трансформаторы, что затрудняет использование магнитных пленок для создания весьма эффективных элементов ЭВМ типа феррит-диодных, феррит-транзисторных и феррит-ферритных.

Во избежание перечисленных недостатков пленочных элементов с разомкнутыми магнитопроводами были созданы элементы памяти с замкнутыми магнитопроводами на проволоках, покрытых пермаллоем [1,2], на спаренных пленках [3] и т.д. Благодаря применению этих элементов были частично устранены некоторые недостатки пленочных элементов и, прежде всего, снижены перемagnичивающие токи. Так, например, разрядные токи в устройствах памяти на проволоках, покрытых пермаллоем, были снижены по сравнению с этими токами в устройствах на пленочных пятнах на порядок (с $1000 + 300 \mu\text{а}$ до нескольких десятков $\mu\text{а}$). Однако перечисленные недостатки пленочных элементов с разомкнутыми магнитопроводами можно будет устранить, применяя пленочные плоские замкнутые магнитопроводы и (как будет показано ниже) плоские экраны.

Сравнительно большие токи в элементах с пленочными незамкнутыми магнитопроводами необходимы ввиду следующих обстоятельств. Как показано в ряде исследований [4,5], плоская магнитная пленка перемagnичивается практически только в пределах ширины перемagnичивающей шины. Таким образом, поле в перемagnичиваемом участке пленки приблизительно определяется, в зависимости от расположения и конструкции обратного провода, выражениями:

$$H \approx \frac{I}{2h} \quad \text{или} \quad H \approx \frac{I}{h},$$

где I — ток шины, h — ширина шины. Из этих выражений видно, что величина тока при заданной величине поля может быть уменьшена соответствующим изменением ширины шины. Однако уменьшение ширины шины возможно только до некоторых пределов. В большинстве пленочных элементов важно учитывать состояние перемagnичиваемого участка пленки, близкого к однодоменному, а поэтому необходимо, чтобы размагничивающее поле H_p не превышало некоторой определенной величины, что накладывает ограничения на минимальную ширину шины. Для оценки минимальной ширины шины можно предположить, что ось легкого намагничивания

пленки направлена перпендикулярно оси шины. Тогда указанное ограничение приблизительно будет определяться неравенствами:

$$|H_p| = MN_{\square} < H_c, \quad |H_p| = MN_0 < H_c,$$

первое из которых справедливо для случая, когда ширина пленки равна ширине шины, а длина пленки значительно больше ширины; второе — для круглой пленки с диаметром $D \approx h$, где величины $N_{\square} = \frac{a}{h}$, $N_0 = \frac{a}{2h}$ — размагничивающие факторы пленок;

M — величина магнитного момента пленок;

a — толщина пленок;

H_c — коэрцитивная сила.

Из этих условий видно, что уже при значениях $h \sim 10^{-1}$ см для обычно применяемых пермалловых и гиралловых пленок ($a \sim 10^{-5}$ см, $M \sim 10^4$ а/см) величины размагничивающих полей оказываются весьма близкими к обычным значениям их коэрцитивных сил (2–4 эрстеда). Ввиду этого минимальные размеры этих пленок по ширине (или по диаметру) выбираются порядка миллиметров. Для пленок состава $Ni-Fe-P$, которые имеют $H_c \sim 1$ эрстед и могут быть использованы толщиной несколько больше 200 Å, минимальные размеры могут быть порядка десятых долей миллиметра [6,7]. Если магнитная пленка охватывает шину, то уменьшение величины h оказывается вполне возможным, так как размагничивающее поле практически равно нулю и, естественно, становится возможным уменьшить ток.

Объем, занимаемый пленочным элементом с разомкнутым магнитопроводом, часто бывает не меньше объема, занимаемого элементом на монолитном сердечнике. Это определяется следующими причинами. Во-первых, известно [8,9], что для уединенных однодоменных плоских пленок магнитный поток, замыкающийся вне пленок, занимает очень большой объем по сравнению с объемом самой пленки. Во-вторых, показано [10,11], что при уменьшении объема потока вне пленки металлическими поверхностями шин и экранов в условиях быстроизменяющихся полей должны возрастать некоторые размагничивающие поля H_{pg} , а если приблизить металлические поверхности к поверхностям пленки на расстояния порядка её толщины, то эти поля при определенных условиях могут возрасти до очень больших значений.

Причины возрастания размагничивающих полей заключаются в том, что по мере ограничения объема потока магнитных полей всё большая его часть будет замыкаться в пределах пленки. Так как

весь поток остаётся неизменным (он определяется величинами магнитных поверхностных зарядов на краях плёнки, а те, в свою очередь, определяются величиной намагниченности и толщины плёнки), то в плёнке возрастают поля, действие которых аналогично действию магнитостатических размагничивающих полей. Эти размагничивающие поля для круглого пятна, расположенного по середине между двумя хорошо проводящими пластинами, согласно [11], равны (при сильном скин-эффекте):

$$|H_{pg}| = N_g M,$$

где величина $N_g = \frac{a}{2b}$ - размагничивающий фактор в условиях быстроизменяющихся полей; b - расстояние между плоскостями металлических пластин, ограничивающих поток. Отсюда, чтобы уравновесить действие размагничивающих полей, необходимо увеличивать перемагничивающие поля.

Чтобы изменения перемагничивающих полей были незначительны, металлические поверхности должны приближаться к поверхностям плоской однослойной цилиндрической плёнки из пермаллоя или гираллоя толщиной порядка 1000 Å на расстояние не ближе одного миллиметра. Для плёнок состава $Ni-Fe-P$ при толщинах около 200 Å это расстояние должно быть не меньше долей миллиметра. Однако в этих условиях эффективные размеры плёночного элемента могут оказаться не меньше размеров элемента на ферритовых сердечниках с диаметром около миллиметра. При использовании плёночных сердечников с замкнутыми магнитопроводами (когда могут быть созданы условия замыкания потоков по магнитной плёнке) оказывается возможным приблизить металлические поверхности к поверхностям магнитных плёнок на расстояния порядка их толщины и тогда размеры, занимаемые соответствующими элементами, могут быть значительно уменьшены.

Большие трудности в уменьшении величин эдс индуктивных наводок по сравнению с величинами эдс полезных сигналов в устройствах на плёночных элементах с разомкнутыми магнитопроводами связаны с тем, что у них при сравнительно больших токах имеются сравнительно малые поперечные сечения магнитопроводов. Так как эдс индуктивных наводок пропорциональны величинам токов, а эдс полезных сигналов пропорциональны площадям поперечных сечений магнитопроводов, то эти трудности в устройствах на плёночных элементах еще более увеличиваются по сравнению с устройствами на монолитных сердечниках, у которых площади поперечного сечения магнитопроводов значительно больше, чем у

плёночных элементов, а токи имеют величины того же порядка.

Чтобы уменьшить эдс индуктивных наводок в устройствах на плёночных элементах необходимо: во-первых, расположить токовые шины так, чтобы можно было вычитать магнитные потоки наводок; во-вторых, уменьшить расстояния между прямыми и обратными проводниками с тем, чтобы уменьшить площади петель связи и, следовательно, уменьшить величины взаимноиндуктивностей. Для уменьшения части индуктивных наводок в элементах на плёнках также применяются обмотки со взаимно перпендикулярными осями. В целом, главным мероприятием по уменьшению индуктивных наводок является уменьшение расстояний между прямыми и обратными проводниками, что позволяет с большим эффектом применять и метод вычитания потоков наводок. Для этой цели магнитные плёнки иногда напыляются непосредственно на подложки из хорошо проводящих металлов, а шины обмоток располагаются на весьма малых расстояниях от поверхностей магнитных плёнок, благодаря чему резко уменьшаются индуктивные наводки. Так как ширина шин выбирается не больше ширины магнитных плёнок, то магнитный поток может замыкаться в свободном от металла пространстве выше шин, и в условиях динамики размагничивающее поле не возрастает до слишком больших значений. Однако, как показано в ряде работ [12, 13], перемагничивающие токи всё же необходимо увеличить почти в два раза и при этом, разумеется, увеличатся дополнительные потери мощности. Одновременно из-за демпфирующего действия вихревых токов в подложке снижается быстродействие элементов. Напротив, при применении плёночных элементов с замкнутыми магнитопроводами величины перемагничивающих токов и быстродействие элементов не должны измениться даже при очень близком расположении проводящих пластин (экранов) к поверхностям магнитных плёнок. В этом случае путем применения плоских экранов можно максимально без особых осложнений уменьшить индуктивные наводки.

Создание удовлетворительных трансформаторов с разомкнутыми плёночными магнитопроводами связано с определенными трудностями. Плёночные трансформаторы для элементов СВЧ должны обеспечить достаточно большие взаимноиндуктивности между обмотками при ненасыщенном веществе магнитопровода и достаточно большое отношение взаимноиндуктивностей обмоток при насыщенном и ненасыщенном веществе магнитопровода. Такие трансформаторы с разомкнутыми магнитопроводами можно сделать, применяя металлические подложки и достаточно приближая шины обмоток к

магнитной пленке. Однако такой трансформатор имел бы дополнительные потери мощности, что было показано ранее для аналогичных условий, а также занимал бы непропорционально большой объем из-за необходимости оставлять свободное от металлов пространство выше шин. Таким образом, плёночные трансформаторы с разомкнутыми магнитопроводами по потерям мощности и своим размерам не имеют преимуществ перед трансформаторами на обычных сердечниках, в то время как плёночные трансформаторы с замкнутыми магнитопроводами и экранами такие преимущества имеют.

Однако, наряду с указанными недостатками плёночных магнитных сердечников с незамкнутыми магнитопроводами, с их применением открылись и новые возможности, которые не могли быть реализованы при использовании обычных сердечников. Эти возможности заключаются в том, что в плёнках с одноосной анизотропией оказалось гораздо легче использовать процессы вращения магнитных моментов по сравнению с обычными монолитными сердечниками. Как известно [14 - 17], перемангничивание происходит путем смещения границ, неоднородного и однородного вращений по мере увеличения амплитуды перемангничивающего поля. Причем скорость перемангничивания непропорционально быстро возрастает в названной последовательности. Таким образом, принципиально можно при незначительном увеличении поля значительно увеличить скорость перемангничивания. Указанные закономерности являются общими как для обычных сердечников, так и для плёночных. Практически же только в плёнках можно уменьшать поля, при которых начинаются процессы вращения, за счет приложения поля под определенными углами к направлению оси легкого намагничивания. Это позволяет при относительно небольшом увеличении поля увеличить скорость перемангничивания плёночных элементов. Именно благодаря этому обстоятельству оказалось возможным создать на плёнках более быстродействующие устройства по сравнению с устройствами на ферритовых и пермалловых сердечниках. Кроме того, при процессах вращения становится возможным применение обмоток со взаимно перпендикулярными осями, что в свою очередь позволяет частично уменьшить индуктивные наводки.

Использование процессов вращения в магнитных плёнках накладывает особые условия на конструирование плоских плёночных сердечников с замкнутыми магнитопроводами. В этом случае замыкание потока по магнитной пленке необходимо осуществить не по одной оси, а по двум взаимно перпендикулярным осям. Так, например, в проволоках, покрытых пермалловой плёнкой, поток за-

мыкается по магнитной плёнке не полностью. Замыкается по магнитной плёнке только та часть потока, которая охватывает проволоку вдоль периметра её поперечного сечения. Другая часть потока, направленная вдоль оси проволоки, может замыкаться только по "воздуху". Из-за этого в матричных устройствах памяти на проволоках, покрытых пермаллом, уменьшены токи разряда, но не токи числа. Примерами плёночных элементов, в которых при процессах вращения магнитный поток замкнут по магнитным плёнкам, являются элементы памяти на спаренных плёнках и элементы "сеточной" памяти [3, 18].

Таким образом, при оценке магнитных плоских плёночных элементов с замкнутыми магнитопроводами возникают следующие вопросы:

1. Каким образом в этих элементах может быть осуществлено замыкание потока по двум взаимно перпендикулярным осям?
2. До каких значений могут быть уменьшены токи перемангничивания?
3. До каких значений могут быть уменьшены размеры элементов?
4. Какие условия должны быть выполнены для уменьшения индуктивных наводок по сравнению с полезными сигналами?
5. Какие основные условия должны быть выполнены для создания плёночных трансформаторов с замкнутыми магнитопроводами?

В связи с тем, что плёночные элементы с замкнутыми магнитопроводами могут иметь несколько обмоток, включая и многовитковые (для создания элементов типа феррит-диодных и т.п. принципиально необходимо применение обмоток с разными числами витков [19]), в этих элементах возможен большие межобмоточные и межвитковые емкости, представляет интерес оценить емкости помехи и предельные частоты.

Самостоятельный интерес также представляет сравнительная оценка основных свойств различных возможных конструкций плоских плёночных элементов с замкнутыми магнитопроводами. Ответы на эти вопросы позволяют судить о перспективности создания указанных элементов для целей вычислительной техники.

2. Конструкции элементов. Замыкание потоков по двум взаимно перпендикулярным осям

Конструкции плоских плёночных элементов с замкнутыми магнитопроводами могут быть подразделены на две группы:

1) конструкции, в которых поток замыкается в магнитных плёнках только по одной оси и, 2) конструкции, в которых поток замыкается в магнитных плёнках по двум взаимно перпендикулярным осям.

В первой группе могут быть две конструкции. Плёночный сердечник первой конструкции может представлять собой плоский тороид, в окно которого проходят витки обмоток в виде изолированных друг от друга шин (рис. 1а, в дальнейшем конструкция 1а). Плёночный сердечник второй конструкции может выполняться в виде плоского тороида, вокруг которого в виде спирали располагаются изолированные друг от друга витки обмоток (рис. 1б, в дальнейшем конструкция 1б).

Элементы конструкций второй группы могут быть трех видов. Для всех этих элементов характерно использование сердечников в виде полых тороидов, относительно которых по-разному располагаются витки обмоток. Эти три вида конструкций изображены на рис. 2а, б и в. (в дальнейшем конструкции 2а, 2б и 2в). Как видно из рисунков, полость тороидальных сердечников заполняется плёнкой из немагнитного вещества или же в ней располагаются витки изолированных обмоток (рис. 2в в дальнейшем конструкция 2в). Во всех трех последних конструкциях принципиально возможно осуществить замыкание потоков по двум взаимно перпендикулярным осям, так как одновременно имеются два пути для замыкания потоков — вдоль оси тороидов и в плоскости каждого поперечного этой оси сечения. Некоторые вопросы замыкания потоков в подобных конструкциях рассмотрены в работах [20, 21].

Во всех конструкциях особое внимание следует уделять направлениям осей легкого намагничивания магнитных плёнок. Эти оси должны быть направлены под одинаковыми углами к осям проводников обмоток. В частности, для конструкции 1б предлагается расположить ось легкого намагничивания вдоль оси тороида [22, 23]. Указанное условие практически гораздо проще выполнить для конструкций 1а и 2а, чем для остальных конструкций, так как в первом случае необходимо создавать линейную анизотропию магнитных плёнок, а во втором случае — круговую.

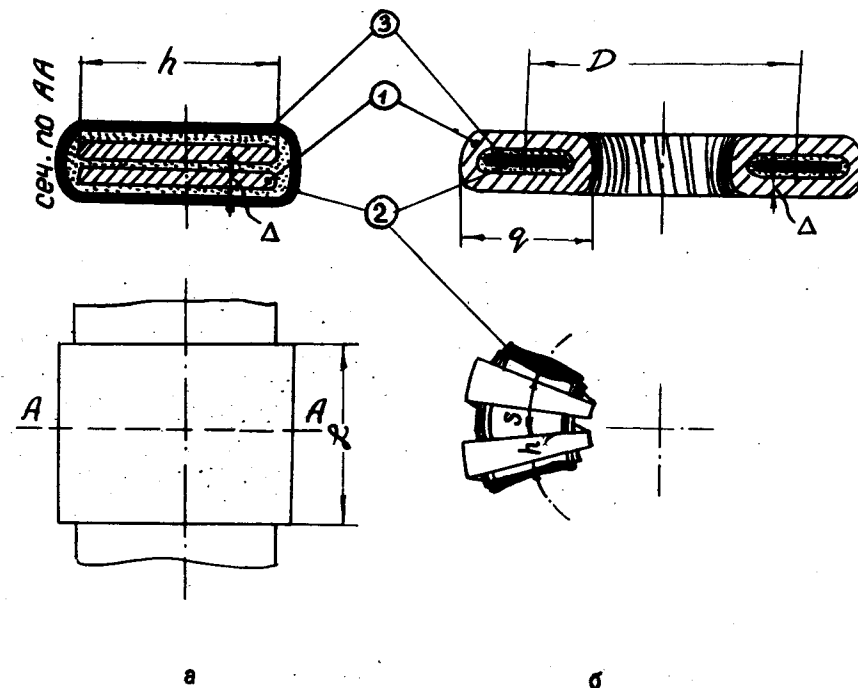


Рис. 1. Конструкции магнитных плёночных элементов с замыканием потока по одной оси: а) плоский тороид с витками в виде шин; б) плоский тороид со спиральными витками, охватывающими магнитную плёнку; 1 — шины; 2 — магнитные плёнки; 3 — изоляционные плёнки

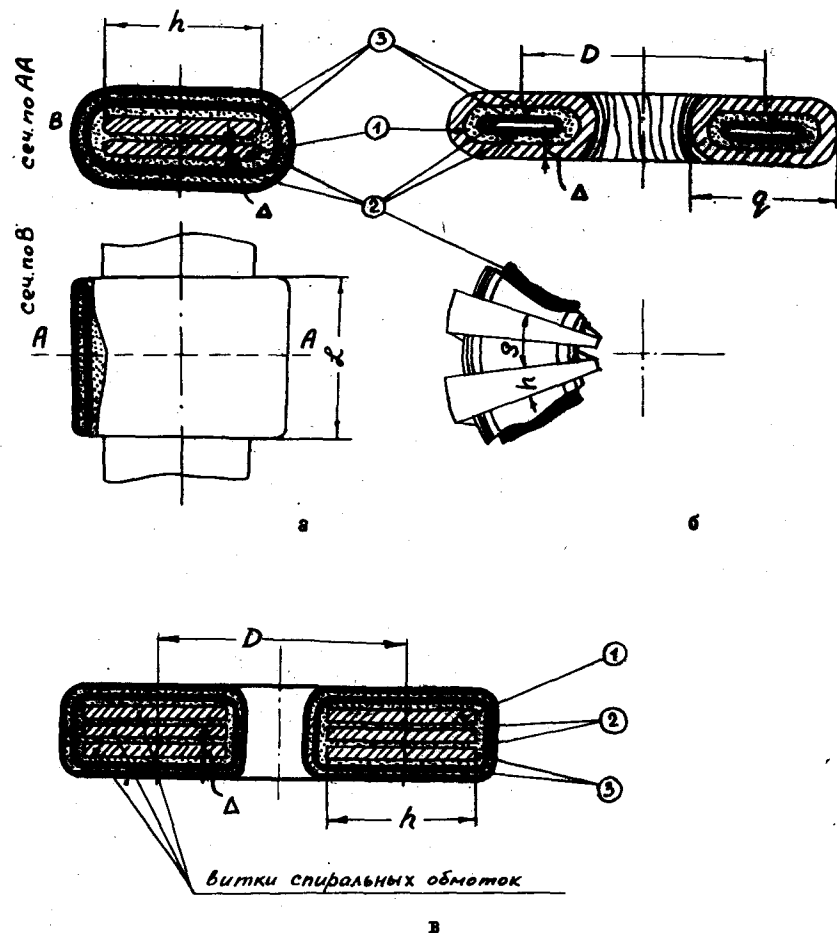


Рис. 2. Конструкции магнитных пленочных элементов с замкнутым потоком по двум взаимно перпендикулярным осям:
а) пленочный торонд с витками в виде нити; б) пленочный торонд со спиральными витками, охватывающими пленку;
в) пленочный торонд со спиральными витками, охватываемыми магнитной пленкой; 1 - нити; 2 - магнитные пленки; 3 - изоляционные пленки.

3. Токи перемагничивания. Сравнение конструкций

Величины перемагничивающих токов определяются при заданных величинах перемагничивающих полей. Для конструкций элементов 1а, 2а и 1б, 2б при $S \approx h$ перемагничивающие токи соответственно оказываются приблизительно равными:

$$I = 2Hh, \quad \bar{I} = Hh, \quad (1)$$

а для конструкции 2в:

$$\bar{I} = \frac{2Hh}{n}, \quad (2)$$

где n - число витков,

S - величина шага обмотки конструкции 1б, 2б.

Таким образом, согласно (1) и (2), для определения величины тока I необходимо определить минимальную ширину нити витка.

В рассматриваемых конструкциях ширина нити витков должна прежде всего определяться ограничениями на величины мощностей в рассеиваемых обмотках. Эти мощности можно определить при условии, что известна зависимость между величинами амплитуд гармоник поля и номеров гармоник. Соответствующие зависимости легко определяются для элементов с питанием синусоидальными или импульсными токами. Тогда для конструкций 1а и 2а рассеиваемые в обмотках мощности приблизительно равны:

$$P_1 \approx \frac{4h\omega}{\sigma} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{H_m^2}{\Delta m}, \quad (3)$$

для конструкций 1б и 2б:

$$P_2 \approx \frac{\pi D \omega}{\sigma} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{H_m^2}{\Delta m}, \quad (4)$$

для конструкции 2в:

$$P_3 \approx \frac{4\pi D h \omega}{\sigma n} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{H_m^2}{\Delta m}, \quad (5)$$

х) Выражение (1) для конструкций 1б и 2б получается из соотношений: $H\pi D = I n$, $\frac{\pi D}{n} = h$ где n - число витков, D - средний диаметр. Очевидно, должно быть $S > h$. Для того, чтобы поле в магнитных пленках было достаточно однородным, необходимо, чтобы зазор между витками был меньше расстояний от витков до магнитной пленки.

где H_m - амплитуды гармоник поля;

Δ - толщина шин;

Δ_m - эффективная толщина шины с учетом поверхностного эффекта для каждой m -ой гармоники поля;

L, D - габаритные размеры, изображенные на рис. 1а, б и 2а, б, в;

q - разность внешнего и внутреннего радиусов обмоток конструкций 1б и 2б;

σ - величина удельной проводимости материала обмоток;

n - число витков обмоток.

Из выражений (3), (4) и (5) следует, что величины мощностей будут оставаться практически неизменными, когда толщина шин обмоток больше глубины проникновения поля для первой гармоники Z_0 . В то же время, очевидно, что при величинах Δ меньших Z_0 , мощности, рассеиваемые в обмотках, начнут быстро увеличиваться. Так как нежелательно, с одной стороны, делать шины излишне толстыми, а с другой - увеличивать мощность, то выбирать толщины шин следует приблизительно равными Z_0 , а ширину шин k - равной нескольким значениям Z_0 . Теперь можно определить минимальные значения токов. Например, при частоте, равной 10 мГц, для меди $Z_0 \sim 20 \mu$ и, следовательно, принимая $k = 5Z_0$, получаем согласно (1) и (2), соответственно: $I_1 \sim 20 \text{ НмА}$, $I_2 \sim 10 \text{ НмА}$ и $I_3 = 20 \frac{\text{Н}}{\text{н}} \text{мА}$. Отсюда видно, что при значениях H , равным единицам а/см, токи в рассматриваемых элементах могут достигать значений в несколько десятков миллиампер и даже единиц миллиампер для конструкции 2в.

Результаты сопоставления рассматриваемых конструкций элементов по величинам перемагничивающих токов, величинам рассеиваемых мощностей в обмотках и величинам индуцируемых напряжений при одинаковых изменениях потоков в магнитопроводах в виде отношений соответствующих значений к этим значениям для конструкций 1а и 2а сведены в табл. 1.

В рассматриваемых конструкциях были положены равными все габаритные размеры L , D , а также величины k и Δ .

Сравнивая данные таблицы, мы видим, что лучшей будет та конструкция, у которой относительно меньшая мощность рассеивания обмоток и меньший потребляемый ток, но большее значение индуцируемого напряжения, то есть критерием сравнения может быть величина U/PI . Величины этого критерия для различных конструкций приведены в табл. 2.

Таблица 1

конструкции	относительные величины		
	I	P	U
1а, 2а	1	1	1
1б, 2б	$1/2$	$9/4k$	$9/k$
2в	$1/n$	$1/n$	n

Таблица 2

Конструкции	1а, 2а	1б, 2б	2в
$\frac{U}{PI}$	1	8	n^3

Из табл. 2 видно, что по выбранному критерию при $n > 2$ лучшей конструкцией является 2в.

Следует заметить, что токи в элементах с замкнутыми плёночными магнитопроводами должны быть приблизительно такими же, как и у элементов на основе проволок, покрытых пермаллоем, и у элементов на основе сверхтонких плёнок малого диаметра, но значительно меньше токов в элементах на основе пермалловых и гиралловых плёнок с разомкнутыми магнитопроводами обычных размеров.

4. Размеры элементов

Размеры элементов с плёночными замкнутыми магнитопроводами должны определяться размерами шин обмоток, толщинами магнитных и диэлектрических слоев, толщинами экранов, особенностями конструкций. Однако в наибольшей степени размеры этих элементов должны определяться размерами шин и необходимыми толщинами экранов, так как следует ожидать, что толщины шин и экранов должны быть намного больше толщин магнитных и ди-

электрических плёнок. Действительно, если толщины магнитных и диэлектрических плёнок будут равны приблизительно 1000 Å, то толщины шин и экранов, как было показано, будут равны единицам и десяткам микрон. Мы видели, что оптимальные размеры шин существенно зависят от глубины проникновения поля первой гармоники тока питания Z_0 . Естественно, что и выбор толщины экранов должен зависеть от этой величины. Таким образом, размеры элементов могут быть определены числами Z_0 . Если положить толщины шин и экранов порядка Z_0 , то разумно считать размеры элементов по высоте (включая экраны) равными десяткам Z_0 (число витков в конструкции 2в из-за больших значений толщин шин трудно сделать большим нескольких единиц). Размеры же элементов в плоскости разумно считать равными сотням глубины проникновения поля для конструкций 1б, 2б и 2в и десяткам — для конструкций 1а и 2а. При частоте первой гармоники тока питания 10 мГц эти размеры могут быть оценены для конструкций 1б, 2б и 2в величинами $2 \times 2 \times 0,2 \text{ мм}^3$ и для конструкций 1а и 2а величинами $0,2 \times 0,2 \times 0,2 \text{ мм}^3$. Следовательно, можно ожидать, что размеры плёночных элементов с замкнутыми магнитопроводами будут меньше эффективных размеров обычных элементов с разомкнутыми магнитопроводами на пермаллое и гираллое, но не будут меньше эффективных размеров элементов на сверхтонких плёнках состава $Ni-Fe-P$.

5. Индуктивные наводки

ЭДС индуктивных наводок могут возникать из-за взаимной индуктивности проводников обмоток как в пределах элементов, так и вне элементов. Однако наибольшие ЭДС индуктивных наводок могут возникать в пределах элементов, так как в них проводники разных обмоток должны располагаться на наименьших расстояниях друг относительно друга и могут быть параллельными друг другу. Для примера можно провести оценку ЭДС индуктивной наводки относительно ЭДС полезного сигнала в пределах простейшего элемента при расположении его между экранами (см. рис. 3).

Полагая $h \gg \Delta \gg \delta$ и $\Delta \sim Z_0$, поток взаимной индукции шин может быть оценен величиной (на единицу длины шин):

$$\Phi_1 \approx \mu_0 H Z_0, \quad (6)$$

где H — среднее значение магнитного поля тока одной из шин.

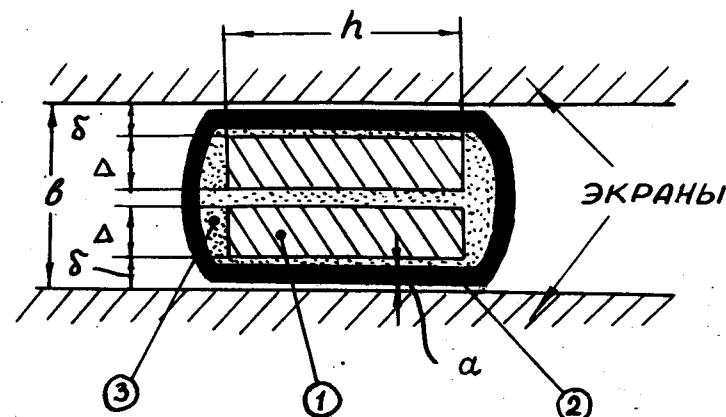


Рис.3. Расположение элемента между экранами: 1—шины; 2—магнитные пленки; 3—изоляционные пленки.

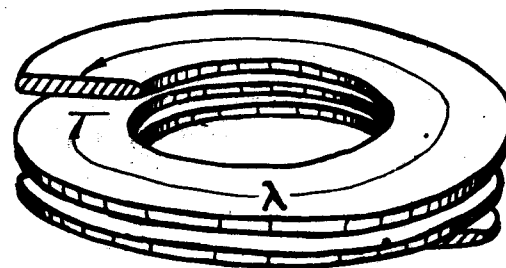


Рис.4. Спиральная обмотка.

Поток в магнитной пленке, охватывающий обе шины, может быть приближенно оценен величиной (на единицу длины шин):

$$\Phi_2 \approx \mu \mu_0 H a, \quad (7)$$

где величина μ определяется отношением M/H_K (H_K - коэрцитивная сила вращения).

Теперь отношение эдс индуктивной наводки к эдс полезного сигнала может быть выражено как Φ_1/Φ_2 , а условие малого значения этого отношения может быть, очевидно, выражено неравенством:

$$\mu a \gg z_0. \quad (8)$$

Например, при $\mu \sim 10^3$ и при частоте первой гармоники 10 МГц из (8) следует, что толщина магнитной пленки должна быть:

$$a \gg 200 \text{ \AA}.$$

Для элементов более сложных, чем элемент, изображенный на рис. 3, условие малого отношения эдс индуктивной наводки по сравнению с эдс полезного сигнала аналогично (8) и может быть представлено в виде:

$$\mu a \gg (m+1)z_0, \quad (9)$$

где величина m показывает, насколько шины обмоток удалены от ближайшего экрана в долях z_0 .

Неравенство (9) имеет смысл применительно к конструкциям Ia, 2a, 2в. Для конструкций Ib и 2б можно обойтись без экранов при достаточном заполнении окна обмоток магнитным веществом. Однако и в этом случае экраны могут быть полезными для уменьшения индуктивных наводок в подводящих шинах.

Так как в экранах неизбежно должны возникнуть потери мощности за счет вихревых токов H , то представляет интерес оценить их и сравнить с потерями в обмотках для каждой из рассмотренных конструкций. В табл. 3 приведены значения мощности, выделяющейся в экранах P_{Σ} и общей мощности $P_{\text{общ}}$, выделяющейся в экранах и в обмотках для каждой конструкции, в долях мощности, выделяющейся в обмотках конструкций Ia и 2a (при условиях, аналогичных условиям составления таблицы I и при

$\Delta m = \Delta_{\text{эм}}$, где $\Delta_{\text{эм}}$ - эффективная толщина экрана для каждой гармоники поля).

Таблица 3

конструкции	P_{Σ}	$P_{\text{общ}}$
Ia, 2a	1/2	3/2
Iб, 2б	$\frac{1}{8} \frac{k^4}{q^4}$	$\frac{1}{4} \frac{q}{n} + \frac{1}{8} \frac{n^3}{q^3}$
2в	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{n} + \frac{1}{2}$

Из данных табл. 3 следует, что в конструкциях Ib и 2б может быть получено наименьшее значение общей мощности потерь по сравнению с другими конструкциями. Так, если для конструкции Ia и 2a $P_{\text{общ}} = 1,5$, для конструкции 2в $1,5 > P_{\text{общ}} > 0,5$, то минимальное значение мощности потерь для конструкций Ib и 2б $P_{\text{общ}} = 0,37$ при $q/n = 1,11$.

По критерию же $\frac{U}{P_{\text{общ}} I}$, аналогичному введенному ранее, сравнение может быть и не в пользу конструкций Ib и 2б. В табл. 4 для этого критерия приведены выражения, из которых легко видеть, что при $n > 3$ лучшей конструкцией является 2в.

Таблица 4

конструкции	Ia, 2a	Iб, 2б	2в
$\frac{U}{P_{\text{общ}} I}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{8}{1 + \frac{1}{2} \frac{k^4}{q^4}}$	$\frac{n^3}{1 + \frac{1}{2} n}$

В целом же отличия конструкций Ib и 2б от конструкции 2в по выбранным показателям незначительны.

6. Трансформаторы

Для создания качественных нелинейных плёночных трансформаторов с замкнутыми магнитопроводами необходимо, чтобы, во-первых, связь между обмотками осуществлялась главным образом за счет потока в магнитных плёнках при ненасыщенном магнито-

проводе, во-вторых, чтобы петля гистерезиса магнитных плёнок обладала бы достаточной прямоугольностью. Первое условие уже было сформулировано в предыдущем пункте (см. (9)). Второе условие также может быть выполнено, так как петли гистерезиса магнитных плёнок могут обладать хорошей прямоугольностью. Однако, кроме этих условий, необходимо снизить до минимума дополнительные потери в экранах, которые могут возникать из-за частичного рассеивания полей магнитными плёнками. Наименьшее рассеивание полей магнитными плёнками будет при одинаковых внешних полях на всех участках магнитопровода. Чтобы создать по возможности одинаковые внешние поля вдоль магнитопроводов надо правильно располагать витки обмоток относительно магнитных плёнок во всех конструкциях. Например, для конструкции 2в достаточно располагать витки каждой обмотки симметрично между верхними и нижними плёнками магнитопроводов. Таким образом, витки одной обмотки должны оказаться между витками другой обмотки.

7. Емкостные наводки

В магнитных плёночных элементах с замкнутыми магнитопроводами следует ожидать больших величин емкостей между отдельными шинами витков, шинами и экранами, магнитопроводами. В связи с этим представляет интерес рассмотреть влияние этих емкостей на работу элементов и оценить предельные рабочие частоты. Этим вопросам уделяется большое внимание в обычной магнитной технике [24 - 27].

При рассмотрении частотных свойств обычных сердечников стремятся определить межобмоточные емкости и собственные емкости обмоток, таким образом, выделяются два вида нежелательных емкостных токов. Влияние этих токов должно быть подвергнуто анализу и при рассмотрении плёночных элементов. В плёночных конструкциях этими токами будут, во-первых, токи, которые ответвляются из токонесущей шины в шины витков соседних обмоток, и, во-вторых, токи, ответвляющиеся в соседние витки одной и той же обмотки.

Для оценки влияния первого фактора можно рассмотреть задачу об ответвлении тока из плоской токонесущей шины в соседнюю, когда шины расположены вблизи друг друга (рис. 3). Для

определенности рассмотрим отрезок шин длиной $\mathcal{L}$ и предположим, что в одну из шин на одном её конце втекает, а на другом конце вытекает ток $\bar{I}$. Для второй шины токи на концах можно положить равными нулю.

Пренебрегая токами, ответвляющимися в экраны и магнитные плёнки, для поставленной задачи можно составить дифференциальные уравнения (для амплитуд гармоник):

$$\left. \begin{aligned} z_{01} \bar{I}_1 - z_{02} \bar{I}_2 + \frac{dU}{dx} &= 0, \\ y_0 U + \frac{d\bar{I}_1}{dx} &= 0, \\ -y_0 U + \frac{d\bar{I}_2}{dx} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где x - координата вдоль осей шин;

$\bar{I}_1$ - ток первой шины;

$\bar{I}_2$ - ток второй шины;

U - напряжение между шинами в каждой рассматриваемой точке;

$$z_{01} = j\omega(L_{01} - M_0) + z_{01}, \quad z_{02} = j\omega(L_{02} - M_0) + z_{02};$$

L_{01}, L_{02} - индуктивности первой и второй шин на единицу длины;

z_{01}, z_{02} - сопротивления шин на единицу длины;

M_0 - взаимоиндуктивность шин;

$y_0 = j\omega C_0$, C_0 - емкость между шинами на единицу длины.

Граничные условия в соответствии с вышесказанным для рассматриваемой задачи будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} x=0, \quad \bar{I}_1 = \bar{I}, \quad \bar{I}_2 = 0; \\ x=\mathcal{L}, \quad \bar{I}_1 = \bar{I}, \quad \bar{I}_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Решение поставленной задачи следующее:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I} &= \bar{I} \left[1 - \frac{z_{01}}{z_{01} + z_{02}} \left(1 - \frac{\text{ch} \kappa (x - \mathcal{L}/2)}{\text{ch} \kappa \mathcal{L}/2} \right) \right], \\ \bar{I}_2 &= \bar{I} \frac{z_{01}}{z_{01} + z_{02}} \left(1 - \frac{\text{ch} \kappa (x - \mathcal{L}/2)}{\text{ch} \kappa \mathcal{L}/2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $\kappa = \sqrt{(z_{01} + z_{02})y_0}$.

Как видно из решений, влияние емкостных токов будет незначи-

тельными при условии:

$$|\kappa| \lambda/2 \ll 1. \quad (13)$$

Можно показать, что условие (13) при $\lambda \ll 1$ см соблюдается для частот сантиметрового диапазона, если принять толщины изоляционных и магнитных плёнок порядка 1000 Å, а толщины шин порядка микрон.

Для оценки влияния токов между витками одной и той же обмотки можно рассмотреть изменение тока вдоль витков уединенной плоской спирали (рис. 4), в которую на одном её конце втекает, а на другом конце вытекает один и тот же ток $\bar{I}$. Из рассмотрения предыдущей задачи можно приближенно учесть только активные сопротивления шин витков, так как в предыдущей задаче в выражения для индуктивной части импедансов Z_0 входили разности близких величин $L_0 - M_0$, которыми можно пренебречь. Также можно учесть только емкости между соседними витками.

В этом случае система дифференциально-разностных уравнений для амплитуд тока I и падения напряжения вдоль спирали будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI}{dx} + y_0 [U_1(x+\lambda) - U_1(x)] &= 0, \\ \lambda > x > 0; \\ \frac{dI}{dx} + y_0 [U_2(x+\lambda) + U_2(x-\lambda) - 2U_2(x)] &= 0, \\ \lambda - \lambda > x > \lambda; \\ \frac{dI}{dx} + y_0 [U_3(x-\lambda) - U_3(x)] &= 0, \\ \lambda > x > \lambda - \lambda; \\ \frac{dU}{dx} &= z_0 I, \quad y_0 = j\omega c_0, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где x - координата вдоль средней линии спирали;
 λ - длина одного витка;
 $\mathcal{L}$ - общая длина средней линии спирали;
 c_0 - емкость на единицу длины между витками спирали;
 z_0 - сопротивление единицы длины витков спирали.
 Граничные условия для рассматриваемой задачи имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x = 0, \quad U = 0, \quad \bar{I} &= \bar{I}; \\ x = \lambda, \quad U_1 = U_2, \quad \frac{dU_1}{dx} &= \frac{dU_2}{dx}; \\ x = \mathcal{L} - \lambda, \quad U_2 = U_3, \quad \frac{dU_2}{dx} &= \frac{dU_3}{dx}; \\ x = \mathcal{L}, \quad U_3 = \bar{U}, \quad \bar{I} &= \bar{I}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Решение задачи может быть получено в виде аналитических функций:

$$\left. \begin{aligned} x &= 0 \div \lambda, \\ U &= -a \operatorname{ch} \kappa (x - \lambda) + a \frac{x}{\lambda} + b + a; \\ x &= \lambda \div \mathcal{L} - \lambda, \\ U &= a \frac{x}{\lambda} + b; \\ x &= \mathcal{L} - \lambda \div \mathcal{L}, \\ U &= a \operatorname{ch} \kappa (x - \mathcal{L} + \lambda) + a \frac{x}{\lambda} + b - a; \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \kappa &= \sqrt{j\omega c_0 z_0}, \\ a &= \frac{\bar{U}}{2(\operatorname{ch} \kappa \lambda - 1) + \mathcal{L} \lambda^{-1}}, \\ b &= \frac{\bar{U}(\operatorname{ch} \kappa \lambda - 1)}{2(\operatorname{ch} \kappa \lambda - 1) + \mathcal{L} \lambda^{-1}}. \end{aligned}$$

Из уравнений (14), (16) и граничных условий (15) можно получить выражение для импеданса спирали:

$$Z = \frac{\bar{U}}{\bar{I}} = z_0 \frac{2\lambda(\operatorname{ch} \kappa \lambda - 1) + \mathcal{L}}{1 + \kappa \lambda \operatorname{sh} \kappa \lambda}. \quad (17)$$

Из выражения (17) видно, что влияние емкостных токов характеризуется величиной $|\kappa| \lambda$. При $|\kappa| \lambda \ll 1$ влиянием этих токов можно пренебречь. Можно показать, что условие $|\kappa| \lambda \ll 1$ может быть выполнено при $\lambda \ll 1$ см для частот сантиметрового диапазона, если принять толщины изоляционных плёнок порядка 1000 Å, а толщины шин порядка микрон.

Таким образом, емкостные наводки в плёночных плоских элементах с замкнутыми магнитопроводами не существенны при соблюдении указанных выше неравенств.

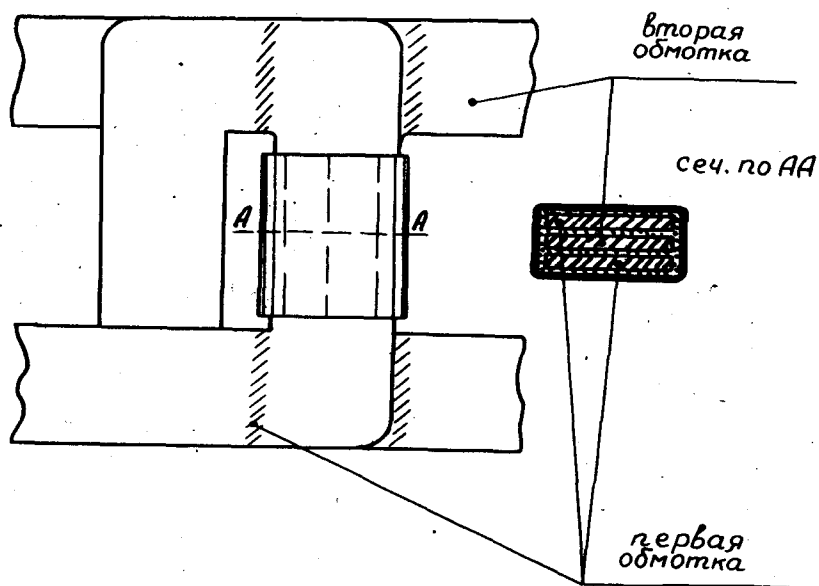


Рис. 5. Гибридная конструкция.

8. Выводы

Основное преимущество магнитных плоских плёночных элементов с замкнутыми магнитопроводами по сравнению с плёночными элементами с разомкнутыми магнитопроводами заключается в том, что они, во-первых, позволяют уменьшить токи питания и мощности потерь до минимально возможных в магнитной плёночной технике и одновременно, благодаря применению экранов, значительно уменьшать индуктивные наводки. Во-вторых, используя замкнутые магнитопроводы с экранами, можно создать трансформаторы с разными числами витков обмоток, которые по своим параметрам удовлетворяют требованиям, необходимым для создания схем, аналогичных феррит-диодным, феррит-транзисторным и феррит-ферритным [28 - 32]. Указанные схемы имеют большие преимущества перед известными схемами на магнитных плёнках (схемами на плёночных параметронах, со сдвигающими регистрами на плёнках и т.д. [33 - 34]) как по параметрам системы питания, так и по гибкости выполнения различных логических функций.

Схемы на плоских плёночных элементах с замкнутыми магнитопроводами обладают большими преимуществами перед схемами на ферритовых и пермалловых сердечниках по размерам, по величинам токов и по быстродействию.

Однако недостатком плёночных элементов с замкнутыми магнитопроводами является некоторая сложность их конструкций. Из всех рассмотренных конструкций (особенно по сравнению с 1б и 2б) конструкции 1а и 2а являются наиболее простыми благодаря простоте форм и относительно небольшому количеству элементов. Лучшей же по основным параметрам (по величине тока, по мощности потерь и по индуцируемому напряжению) является конструкция 2в. Можно считать, что наиболее практичной будет конструкция - гибрид конструкций 1а (или 2а) и 2в - у которой обмотки строятся по принципу конструкции 2в (в виде прямоугольных рамок), а магнитопровод имеет вид магнитопроводов конструкций 1а или 2а. Вид сверху этой конструкции дан на рис.5.

Плоские плёночные элементы с замкнутыми магнитопроводами могут найти применение и в качестве элементов матричной памяти. Но, по-видимому, из-за сложности конструкций эти элементы для указанных целей будут менее приемлемыми, чем известные элементы на плёночных пятнах и, прежде всего, на пятнах малых толщин и размеров [6,7].

Однако проведенная оценка свойств магнитных плоских плё-

ночных элементов с замкнутыми магнитопроводами не является исчерпывающей, поскольку она не затрагивает технологии изготовления этих элементов. Тем не менее полученные результаты могут быть учтены и при рассмотрении технологических процессов.

В заключение автор выражает благодарность к.т.н. И.С.Лискеру, к.т.н. Э.В. Евреиннову, Р.М. Гарипову за полезные обсуждения и внимание к работе.

Л и т е р а т у р а

1. Comstock, Electron. Design., 1963, v. 11, N 10.
2. Japan Electr., Ind., 1963, v. 10, N 12, pp. 24-25.
3. Raffel and oth. Proc IRE, 1961, v. 49, N 1, pp. 155-164.
4. Leaver, Prutton, J.Appl. Phys., 1962, v.3-3,N3, p.1095.
5. Ю.Л. Данилевский, А.А. Селезнев. Действие статического неоднородного магнитного поля линейных проводников на ферромагнитную плёнку с одноосной анизотропией (данный сборник) стр.79-94.
6. Computer News, 1963, v. 12, N 2, p. 40.
7. Electronic Components, 1963, v. 4, N 9, p. 927.
8. Chang, Milnes, IRE Trans. Electronic Comput., 1959, v.8, N 4, pp. 458-464.
9. В.В. Кобелев. Магнитные элементы устройств вычислительной техники. М., 1961, ГИИТ и ВМ АН СССР, стр.131-146.
10. Von Martin C. Gutzwiller, Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Physik (Zamp), 1961, v.XII, S.508.
11. А.П. Сухоруков. Магнитное поле ферромагнитной пленки, помещенной между токопроводящими пластинами (данный сборник).
12. Bonyhard, J.Electron and Control, 1964, 16, N 3, pp.339-347, см. также Экспр.-инф. ВТ, 1964, № 26, реф. I09.
13. Jutzi W. Elektron. Rechenanlagen., 1964, 6, N 5, S. 228-238, см. также Экспр.-инф. ВТ, 1965, № 10, реф. 59.
14. Gyorgy, J.Appl. Phys., 1957, v. 28, N 9.
15. Kikuchi, J.Appl. Phys., 1956, v. 27, N 11.
16. О.С. Колотов, Р.В. Телеснин. Изв. АН СССР, серия физическая, 1965, том XXIX, № 4, стр. 543-545.
Р.В. Телеснин, О.С.Колосов, В.А.Погожев, там же, стр.546-547.

17. А.И.Пирогов, Ю.М. Шамаев. Магнитные сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса. М.-Л., "Энергия", 1964.
18. Howard and oth. Investigation of wovenseen memory techniques for Computing Systems, Pt.2, New-Jork-London, 1962, pp. 361-372.
19. Р.К. Ричардс. Элементы и схемы цифровых вычислительных машин. М., ИЛ, 1961.
20. Lonis, J.Appl. Phys., 1965, v.36, N 3, pp. 944-945.
21. Doughton. Chaus, J.Appl. Phys., 1965, 36, N 3, pp. 1123-1125.
22. И.С. Лискер, Ю.Л. Данилевский. Способ изготовления катушек индуктивности тороидального типа.Изобретения.Промышленные образцы. Товарные знаки. М., ЦНИИПИ, 1966, № 1, авт. св. СССР № 177472 от 22.3.1965 г., стр. 39.
23. Ю.Л. Данилевский, И.С. Лискер. Экспериментальное исследование круговой анизотропии в тонких плоских кольцевых ферромагнитных плёнках (данный сборник).
24. Ф.В. Лукин. Импульсный трансформатор. - Радиотехника, 1947, т. 2, № 4, стр. 46-61.
25. Я.С. Ицхоки. Импульсная техника. М., "Советское Радио", 1949.
26. Я.С. Ицхоки. Импульсные трансформаторы. М., 1950.
27. О.С. Потурев. Вычислительная техника, сб. статей. М., МИФИ, 1961, вып. 2, стр. 21-37.
28. Труды Московского ордена Ленина энергетического института. М., 1965, вып. LX. Цифровые магнитные элементы. Под ред. Ю.М. Шамаева. Часть I.
29. То же, часть 2.
30. То же, часть 3.
31. То же, часть 4.
32. И.П. Ионов. Основы расчёта и проектирования магнито-полупроводниковых элементов. М., МЭИ, 1965.
33. Тонкие ферромагнитные плёнки, под общей ред. Р.В.Телеснина, М., "Мир", 1964.
34. И.А. Анохин, Г.Ф. Кипаренко. Тонкие магнитные плёнки в вычислительной технике. М., "Энергия", 1964.

Поступила в редакцию

4.I.1966 г.