

АНАЛИЗ ЗАПИСЫВАЮЩЕЙ И СЧИТЫВАЮЩЕЙ ЦЕПЕЙ ФЕРРИТ-ТРАНЗИСТОРНОГО ЭЛЕМЕНТА

В настоящее время известно много различных схем феррит-транзисторных элементов (ФТЭ), так как последние широко применяются в электронных устройствах, работающих на дискретном принципе обработки информации.

Разные варианты схем ФТЭ отличаются, в основном, степенью сложности их построения, которая почти всегда возрастает с увеличением требований, предъявляемых к самим схемам (увеличение температурного диапазона, повышение быстродействия и т. п.). В то же время расчет даже простой схемы ФТЭ, содержащей только транзистор и магнитный сердечник, встречает значительные трудности. Так, например, при анализе нагрузочной способности по цепям записи или считывания и выборе числа витков соответствующей обмотки трудность заключается в определении реального магнитного поля, действующего на сердечник при его перемагничивании. Из-за нелинейной зависимости индукции в сердечнике от напряженности магнитного поля и малого выходного сопротивления транзисторного усилителя этот действующий импульс поля имеет произвольную форму, не поддающуюся какой-либо достаточно точной аппроксимации.

В настоящей работе ставится задача провести обобщенный анализ записывающей и считывающей цепей ФТЭ методом, позволяющим не учитывать реальную форму действующего импульса поля. При этом рассматривается вопрос получения аналитической зависимости между числом витков перемагничивающей обмотки и количеством нагрузок, которые могут быть включены в цепь ФТЭ.

Записывающая цепь ФТЭ

Известно, что при протекании импульса тока в записывающих цепях феррит-транзисторных, ферро-диодных и других аналогичных элементов перемагничивание сердечника с прямоугольной пет-

лей гистерезиса (ППГ) происходит практически при отсутствии нагрузки в его выходных цепях, то есть при изучении процесса записи информации могут быть использованы импульсные характеристики сердечника, снятые на холостом ходу ($R_H \rightarrow \infty$).

Величина магнитного поля, переключающего сердечник по полному циклу петли гистерезиса, связана со временем его перемагничивания известным уравнением, вытекающим из понятия «импульса поля», данного В. К. Аркадьевым (1),

$$\int_0^{\tau} [H(t) - H_{ст}(t)] dt = S_w$$

или

$$\int_0^{\tau} H(t) dt = S_w + H_0 \cdot \tau, \quad (1)$$

где S_w — коэффициент переключения;
 τ — время полного перемагничивания сердечника;

$H_0 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} H_{ст}(t) dt$ — поле «старта».

Учитывая закон полного тока

$$H(t) = \frac{i(t) \cdot \omega}{l_{ср}}$$

где $l_{ср}$ — средняя длина окружности сердечника;

ω — число витков провода с током на сердечнике, выражение

(1) относительно ω можно представить в следующем виде:

$$\omega = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{ср}}{\int_0^{\tau} i(t) dt} \quad (2)$$

Это уравнение является наиболее общей зависимостью, связывающей число витков перемагничивающей обмотки с импульсными параметрами сердечника и переключающего импульса тока.

Рассмотрим режим перемагничивания сердечников $\Phi_1 \dots, \Phi_N$ (рис. 1), когда коллекторный ток транзистора ПП1 производит в них «запись» информации. При этом с целью упрощения рассуждений возьмем ФТЭ без положительной обратной связи на сердечнике Φ и проследим за изменением выражения (2) для трех случаев формы импульса коллекторного тока транзистора ПП1 (см. рис. 2).

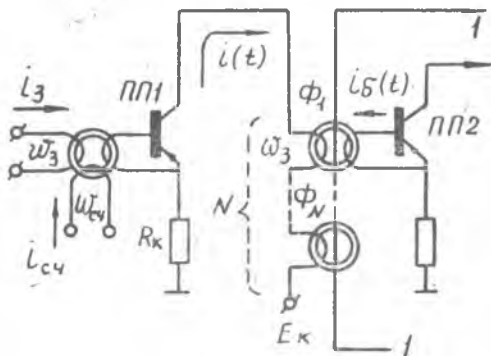


Рис. 1. Цепи записи-считывания феррит-транзисторного элемента.

Если транзистор ПП1 является «идеальным» ключом, работающим в режиме генератора тока, то $i(t) = I_m = \text{const}$ (рис. 2 а), и выражение (2) имеет следующий вид:

$$\omega_3 = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) I_{cp}}{I_m \cdot \tau} \quad (3)$$

то есть для полного перемагничивания сердечников нагрузки «идеальным» импульсом тока за время τ каждый из сердечников должен иметь число витков обмотки записи равное ω_3 (3), причем последнее не зависит от количества переключаемых сердечников.

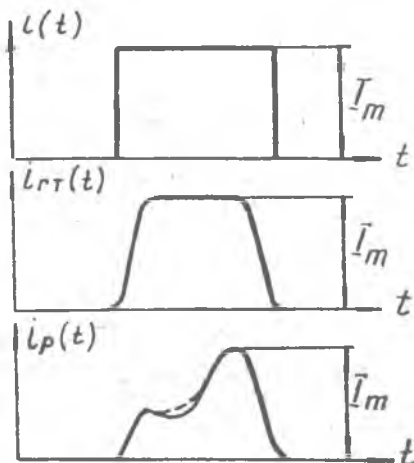


Рис. 2. Импульсы тока записи (считывания): а) «идеальный» импульс тока; б) реальный импульс тока при $N=0$; в) реальный импульс тока при наличии нагрузки $N \neq 0$

Однако практически, если еще возможно создать режим схемы близкой к режиму генератора тока, то получить «идеальное» включение транзистора ПП1 невозможно, так как выходное сопротивление транзистора, определяемое в данной схеме сопротивлением промежутка коллектор — эмиттер и сопротивлением открытого коллекторного перехода, отлично от нуля ($R_i \neq 0$), и включение транзистора также происходит за определенное время ($\tau_{\phi} \neq 0$). В этом случае (рис. 2б) выражение можно записать следующим образом:

$$\omega_3 = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) I_{cp}}{\int_0^{\tau} i_{r\tau}(t) dt} = \omega_0 \quad (4)$$

Здесь $i_{r\tau}(t) = \frac{E_k}{R_{\Sigma}(t)}$ — текущее значение амплитуды импульса тока рассматриваемой цепи для режима генератора тока, где

$$R_{\Sigma}(t) = R_k + R_i(t).$$

В реальном случае ФТЭ работает не в режиме генератора тока (рис. 2в). В связи с этим уравнение цепи записи можно выразить согласно закона Кирхгофа:

$$i_p(t) = \frac{E_k}{R_k + R_i(t)} - \frac{N \cdot u_0(t) \cdot \omega_3}{R_k + R_i(t)},$$

или

$$i_p(t) = i_{r\tau}(t) = \frac{N \cdot u_0(t) \cdot \omega_3}{R_k + R_i(t)}, \quad (5)$$

где N — количество сердечников нагрузки;

$i_p(t)$ — реальный ток в цепи записи (рис. 2в);

$u_0(t)$ — напряжение, возникающее на одном витке обмотки записи при перемагничивании сердечника.

Решая уравнение (2) для случая реального импульса тока (5) в цепи записи имеем:

$$\omega_3 = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{cp}}{\int_0^{\tau} i_{гр}(t) dt} \cdot \frac{1}{1 - N \cdot \omega_3 \frac{\int_0^{\tau} \frac{u_0(t) dt}{R_k + R_l(t)}}{\int_0^{\tau} i_{гр}(t) dt}} \quad (6)$$

Учитывая (4), можно представить предыдущее уравнение в виде:

$$\omega_3 = \frac{\omega_0}{1 - \frac{N \cdot \omega_3 \cdot \omega_0}{(S_w + H_0 \tau) l_{cp}} \cdot \int_0^{\tau} \frac{u_0(t) dt}{R_k + R_l(t)}} \quad (7)$$

Решая (7) относительно N , получаем зависимость $N = f(\omega_3)$ в явном виде:

$$N = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{cp}}{\int_0^{\tau} \frac{u_0(t) dt}{R_k + R_l(t)}} \cdot \frac{\omega_3 - \omega_0}{\omega_0 \cdot \omega_3^2} \quad (8)$$

Исследуя полученную функциональную зависимость на экстремум

$$\frac{\partial N}{\partial \omega_3} = \frac{\partial}{\partial \omega_3} \left[k \left(\frac{1}{\omega_0 \cdot \omega_3} - \frac{1}{\omega_3^2} \right) \right] = 0,$$

где $k = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{cp}}{\int_0^{\tau} \frac{u_0(t) dt}{R_k + R_l(t)}}$ — коэффициент пропорциональности;

имеем $\omega_3 = 2\omega_0$, (9)

$$\frac{\partial^2 N}{\partial \omega_3^2} = -\frac{1}{8\omega_0^4} < 0,$$

т. е. при $\omega_3 = 2\omega_0$ имеет место максимум функции $N(\omega_3)$.

На рис. 3 представлен вид зависимости $N=f(\omega_3)$ согласно уравнению (8). Очевидно, что отрицательные значения величины N , получающиеся при $\omega_3 < \omega_0$ (на рис. 3 изображены пунктирной линией), не имеют смысла, так как количество сердечников нагрузки является положительной величиной.

Из анализа зависимостей (4), (8) и рис. 3 видно, что нагрузочная способность ФТЭ может быть определена через параметры «холостого хода» выходного импульса тока.

Действительно, сначала необходимо определить величину ω_0 — то число витков переключающей обмотки, которое являлось бы минимально необходимым, если бы перемагничивание сердечника

по полному циклу петли гистерезиса производилось импульсом от генератора тока. Параметры последнего определяются параметрами выходного импульса данного ФТЭ на «холостом ходу» ($N=0$). Используя выражение (4) и зная импульсные характеристики (S_w, H_0) выбранного типа сердечника, можно определить величину W_0 . Максимально возможная нагрузочная способность в

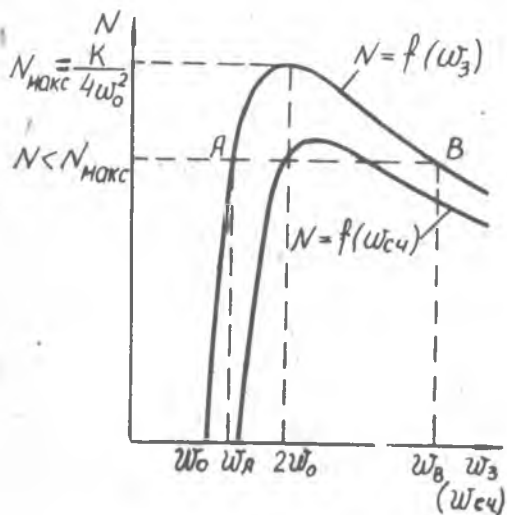


Рис. 3. Зависимость количества нагрузок в цепях записи (считывания) от числа витков соответствующих обмоток для одного и того же ФТЭ.

этом случае будет достигнута при числе витков, равном удвоенному значению ω_0 . (9). Зная температурные зависимости величин, входящих в уравнение (4), можно определить необходимое число витков обмотки записи в любом заданном диапазоне температур.

При определении числа витков перематгнчивающей обмотки, когда $N < N_{\text{макс}}$ может быть два равноценных случая, характеризующихся на кривой $N(\omega_3)$ (рис. 3) точками А и В. Соответствующие этим точкам значения ω_3 являются корнями квадратного уравнения, которое вытекает из зависимости (7).

Выбор какого-либо из двух значений ω_3 определяется, в основном, типом применяемого в ФТЭ транзистора. При больших значениях величины допустимого напряжения между коллектором и эмиттером ($V_{\text{кэ доп}}$) рационально выбирать значение ω_3 около точки В, так как в этой области кривая $N(\omega_3)$ имеет более плавный характер, и ошибка в количестве витков при намотке не приведет к значительному изменению нагрузочной способности, как это имело бы место в окрестности точки А. Однако у большинства отечественных сплавных германиевых транзисторов величина $V_{\text{кэ доп}}$ невелика, и поэтому, ввиду ограничений, накладываемых цепью записи на минимальное значение величины $V_{\text{кэ доп}}$ при считывании информации с сердечников нагрузки (2), более предпочтительным является значение ω_a .

Подставляя в (8) условие максимума (9), имеем

$$N_{\text{макс}} = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) I_{\text{ср}}}{\int_0^{\tau} \frac{u_0(t) dt}{R_k + R_l(t)}} \cdot \frac{1}{4\omega_0^2} \quad (10)$$

Из уравнения (10) видно, что с ухудшением параметров «холодного хода» переключающего импульса тока (приводящего к увеличению величины ω_0) максимально возможная нагрузочная способность ФТЭ падает по параболическому закону (см. зависимость $N_{\max} = f(\omega_0)$ на рис. 4).

Таким образом, в общем случае имеет место семейство характеристик $N = f(\omega_3)$ (рис. 4), параметрами которого могут служить либо напряжение питания (E_k) и амплитуда импульсов тока (I_m), либо величина времени перемагничивания (τ), определяющая частоту работы ФТЭ, либо характеристики сердечников (S_w, H_0, I_{cp}).

При подстановке (4) в (10) получаем общее выражение для величины максимальной нагрузки

$$N_{\max} = \frac{\left[\int_0^{\tau} i_{гг}(t) dt \right]^2}{4(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{cp} \cdot \int_0^{\tau} \frac{u_0(t) dt}{R_k + R_i(t)}}. \quad (11)$$

Точное решение уравнения (11), так же, как и уравнения (6), можно получить задавшись известными аппроксимациями функций $u_0(t)$, $R_i t$ и $i_{гг}(t)$. Однако ввиду сложности аппроксимирующих выражений и самих уравнений (6) и (11) подобные вычисления можно вести лишь численными методами с использованием цифровых вычислительных машин.

Для многих практических случаев и при проведении настоящего анализа можно пренебречь значением длительности переднего фронта импульса тока на «холодном ходу» по сравнению с длительностью всего импульса и ввиду этого считать, что $R_i(t) = R_n = \text{const}$ (где R_n — сопротивление насыщения транзистора ПП1 в данном режиме) и $\int_0^{\tau} i_{гг}(t) dt = I_m \cdot \tau$.

Тогда уравнение (11) имеет вид

$$N_{\max} = \frac{I_m \cdot E_k \cdot \tau^2 \cdot \beta}{4 \cdot S \cdot l_{cp} (S_w + H_0 \cdot \tau) Br (\beta + 1)}, \quad (12)$$

I_m — амплитуда импульса тока (а);

E_k — напряжение источника питания (в);

S — площадь поперечного сечения ферритового сердечника (см^2);

B_c, B_m — соответственно, остаточная индукция и индукция насыщения ферритового сердечника (стл);

$\beta = \frac{B_c}{B_m}$ — коэффициент прямоугольности сердечника.

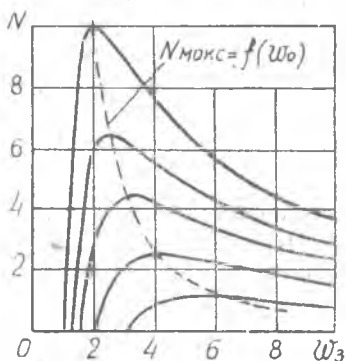


Рис. 4. Характеристики $N = f(\omega_3)$, когда параметром является функция $\omega_0 = \varphi(E_k I_m \cdot \tau)$ для одного и того ФТЭ.

Из уравнения (12) видно, что максимальная нагрузочная способность ФТЭ убывает прямо пропорционально уменьшению напряжения источника питания и амплитуды импульса тока, определяемой на «холостом ходу». Увеличение быстродействия ФТЭ значительно резче влияет на ухудшение нагрузочной способности, чем уменьшение I_m и E_k , так как $N_{\text{макс}}$ прямопропорционально квадрату величины времени перематничивания (τ), определяющей скорость работы ФТЭ.

Считывающая цепь ФТЭ

Рассмотрим режим перематничивания сердечников Φ_1, \dots, Φ_n (рис. 1), когда коллекторный ток транзистора ПП1 производит в них считывание информации, записанной по шине 1—1. При этом в настоящей работе мы не будем касаться вопроса формирования выходного импульса тока ФТЭ и определения числа витков базовой обмотки (w_6 , считая, что последние можно в первом приближении определить так же, как в литературе (3), и проведем анализ считывающей цепи по аналогии с проведенным выше анализом цепи записи.

Известно, что в рассматриваемом случае базовый ток транзистора ПП2 ФТЭ нагрузки будет оказывать воздействие на режим перематничивания сердечника Φ_1 , то есть к сердечнику Φ_1 , прикладывается реальное считывающее поле $H_{\text{сч}}^p(t)$;

$$H_{\text{сч}}^p(t) = H_{\text{сч}}^o(t) - H_6(t), \quad (13)$$

где $H_{\text{сч}}^o(t)$ — считывающее поле, которое имело бы место при отсутствии реакции цепи базы $H_6(t)$.

Иначе, используя закон полного тока, уравнение (13) можно записать

$$i_{\text{сч}}(t) \cdot w_{\text{сч}} = i_{\text{сч}}^o(t) \cdot w_{\text{сч}} - i_6(t) \cdot w_6,$$

или

$$i_{\text{сч}}^p(t) = i_{\text{сч}}^o(t) - i_6(t) \cdot \frac{w_6}{w_{\text{сч}}}. \quad (14)$$

По аналогии с уравнением (5) имеем для считывающего тока $i_{\text{сч}}^o(t)$:

$$i_{\text{сч}}^o(t) = I_{\text{ГТ}}(t) - \frac{N \cdot u_{\text{сч}}^o(t) \cdot w_{\text{сч}}}{R_k + R_l(t)}.$$

Ток, протекающий цепи базы, можно выразить как

$$i_6(t) = \frac{u_{\text{сч}}^p(t) \cdot w_6}{R_6},$$

то есть при наличии тока в цепи базы реальная э. д. с., наводимая на одном витке обмотки $w_{\text{сч}}$ равна $u_{\text{сч}}^p(t)$. В этом случае выражение

для реального считывающего тока в сердечнике (14) принимает следующий вид:

$$i_{сч}^p(t) = i_{гг}(t) - \frac{N \cdot u_{сч}^p(t) \cdot \omega_{сч}}{R_k + R_l(t)} - \frac{u_{сч}^p(t) \cdot \omega_6^2}{R_6 \cdot \omega_{сч}} \quad (15)$$

Подставляя уравнение (15) в исходное уравнение (2) имеем:

$$\omega_{сч} = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{ср}}{\int_0^{\tau} i_{гг}(t) dt - N \cdot \omega_{сч} \int_0^{\tau} \frac{u_{сч}^p(t) dt}{R_k + R_l(t)} - \frac{\omega_6^2}{R_6 \cdot \omega_{сч}} \int_0^{\tau} u_{сч}^p(t) dt}$$

или, учитывая (4)

$$\omega_{сч} = \frac{\omega_0}{1 - N \cdot \omega_0 \cdot \omega_{сч} \frac{\int_0^{\tau} \frac{u_{сч}^p(t) dt}{R_k + R_l(t)}}{(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{ср}} - \frac{\omega_6^2 \cdot \omega_0}{R_6 \cdot \omega_{сч}} \frac{\int_0^{\tau} u_{сч}^p(t) dt}{(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{ср}}} \quad (16)$$

Решая уравнение (16) относительно N , имеем зависимость $N = f(\omega_{сч})$ в явном виде:

$$N_{сч} = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{ср}}{\int_0^{\tau} \frac{u_{сч}^p(t) dt}{R_k + R_l(t)}} \left[\frac{1}{\omega_0 \cdot \omega_{сч}} - \frac{1}{\omega_{сч}^2} - \frac{\omega_6^2}{R_6 \cdot \omega_{сч}^2} \cdot \frac{\int_0^{\tau} u_{сч}^p(t) dt}{(S_w + H \cdot \tau) l_{ср}} \right] \quad (17)$$

Исследуя функцию (17) на экстремум, аналогично изложенному при анализе цепи записи, находим условие максимума:

$$\omega_{сч} = 2\omega_0 + \frac{2\omega_6^2 \cdot \int_0^{\tau} u_{сч}^p(t) dt}{R_6 \cdot \int_0^{\tau} i_{гг}(t) dt} \quad (18)$$

Из сравнения уравнений (9) и (18) видно, что оптимальное число витков $\omega_{сч}$, определяющее максимальную нагрузочную способность по считыванию больше, чем соответствующее число витков ω_3 на величину, определяемую параметрами базовой цепи (ω_6, R_6), сердечника ($\int_0^{\tau} u_{сч}^p(t) dt$) и переключающего импульса тока ($\int_0^{\tau} i_{гг}(t) dt$), то есть по сравнению с зависимостью $N(\omega^3)$ для цепи считывания функция $N(\omega_{сч})$ будет смещена в сторону больших (чем для ω^3) значений $\omega_{сч}$ (рис. 3). Если известны характеристики базовой цепи (которые определяются при рассмотрении вопроса о формировании выходного импульса тока), то, используя уравнение (18), можно определить оптимальное значение величины $\omega_{сч}$.

Аналогично получению уравнения (10) можно найти максимальное количество нагрузок, которое возможно включить в цепь считывания

$$N_{\text{макс}} = \frac{(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{\text{ср}}}{4 \cdot \omega_0^2 \int_0^{\tau} \frac{u_{\text{сч}}^p(t) dt}{R_k + R_l(t)}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\omega_6^2 \int_0^{\tau} u_{\text{сч}}^p(t) dt}{R_6 (S_w + H_0 \cdot \tau) l_{\text{ср}}}} \quad (19)$$

Для практических расчетов, делая аналогичные указанным выше допущения, можно заменить уравнения (18) и (19) на

$$\omega_{\text{сч}} = 2\omega_0 + \frac{2 \cdot \omega_6^2 \cdot B_r \cdot S(\beta + 1)}{\beta \cdot R_6 \cdot I_m \cdot \tau} \quad (20)$$

$$N_{\text{макс}} = \frac{I_m \cdot E_k \cdot \tau^2 \cdot \beta}{4B_r \cdot S(S_w + H_0 \cdot \tau) l_{\text{ср}} (\beta + 1)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\omega_6^2 \cdot B_r (\beta + 1) \cdot S}{\beta \cdot R_6 (S_w + H_0 \cdot \tau) l_{\text{ср}}}} \quad (21)$$

Наблюдается хорошее совпадение (выше 90%) значений, рассчитанных по теоретическим формулам для цепей записи и считывания, с практическими результатами по определению оптимального числа витков при максимальной нагрузке. При этом следует отметить, что при расчетах необходимо с осторожностью подходить к выбору из справочной литературы (4) или нормалей значений коэффициентов S_w , H_0 , β , так как в режимах работы ФТЭ эти коэффициенты могут быть непостоянными или не совпадать по величине со значениями, приведенными в справочнике (в основном из-за различия величин прикладываемых магнитных полей). Кроме того, время перемагничивания τ должно выбираться в соответствии с неравенством.

$$\tau \leq \tau_n - \tau_c, \quad (22)$$

где τ_n , τ_c — длительности выходного импульса и спада, определенные для режима «холостого хода» ФТЭ.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ записывающей и считывающей цепей ФТЭ показывает, что предложенная методика расчета с использованием параметров «холостого хода» перемагничивающего импульса тока позволяет:

1) определять величину максимальной нагрузочной способности и соответствующее оптимальное значение числа витков записывающей обмотки;

2) устанавливая аналитическую зависимость $N = f(\omega_3)$, определять число витков обмотки записи при величине нагрузки не равной максимальной;

3) зная характеристики базовой цепи ФТЭ, определять величины, аналогичные указанным выше, для считывающих цепей ФТЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Аркадьев. Практические проблемы электромагнетизма. Изд. АН СССР, 1939.
 2. И. Х. Ризкин. К теории элементов задержки, содержащих ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса и усилитель мощности. Сб. НИИСЧЕТМАШ, «Вопросы расчета и конструирования электронных вычислительных машин», вып. I. 1960, стр. 179.
 3. Е. И. Гурвич, Л. Б. Шукин. Ферротранзисторные элементы и их применение в цифровых автоматических устройствах. М., 1963.
 4. А. И. Пирогов, Ю. М. Шамаев. Магнитные сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса. Изд-во «Энергия», 1964.
-