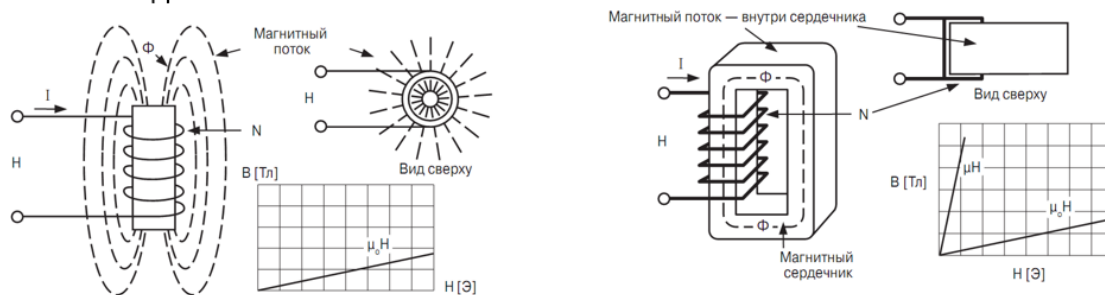


МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Магнитный сердечник

1

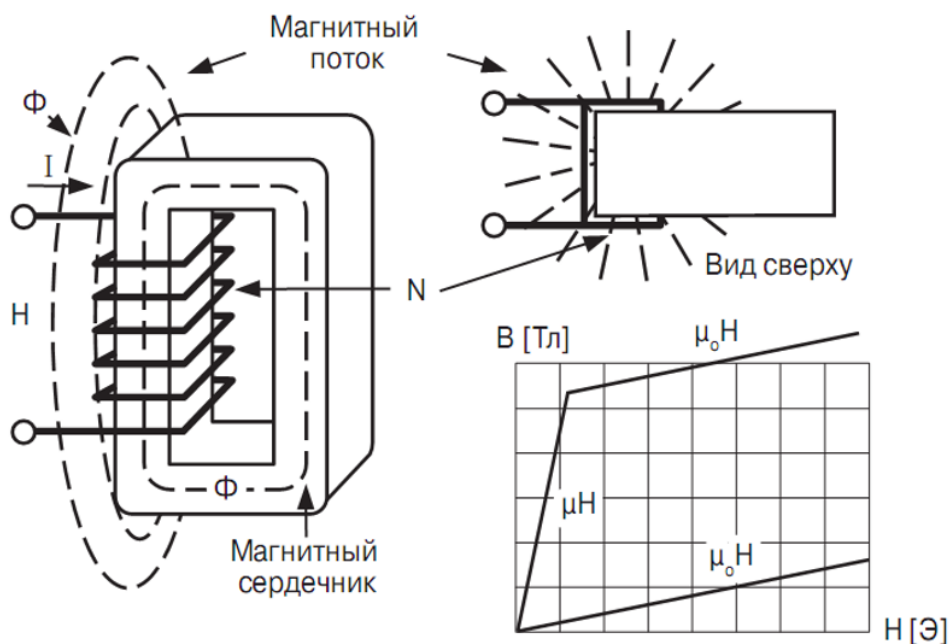
Большинство материалов — плохие проводники магнитного потока, потому что у них невысокая магнитная проницаемость. Вакуум имеет магнитную проницаемость равную 1.0, и другие немагнитные материалы, такие как воздух, бумага и медь, характеризуются проницаемостью такого же порядка. Магнитные материалы, такие как железо, никель, кобальт и их сплавы, могут иметь магнитную проницаемость величиной до сотен тысяч.



Для достижения более высоких показателей по сравнению с воздушной катушкой следует ввести в катушку магнитный сердечник. В этом случае магнитные силовые линии распространяются по пути наименьшего сопротивления и концентрируются внутри сердечника. Существует предельная возможная величина магнитного потока, который может быть создан в данном сердечнике. Эта величина определяется насыщением сердечника. После насыщения сердечник теряет свои магнитные свойства, и катушка фактически превращается в воздушную.

Катушка с насыщенным сердечником

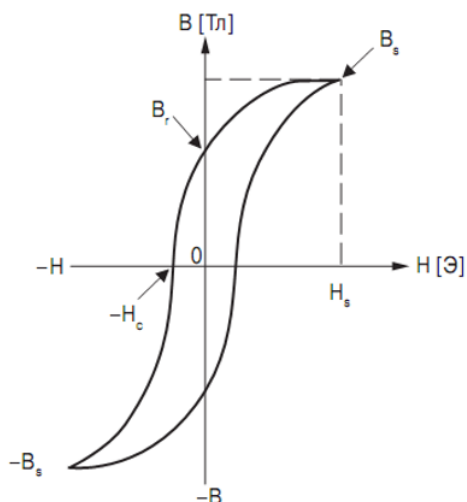
2



Насыщение

3

Максимальная намагничивающая сила (напряженность магнитного поля) H_s соответствует величине, при которой достигается индукция насыщения B_s



Типичная зависимость $B(H)$ магнитомягкого материала

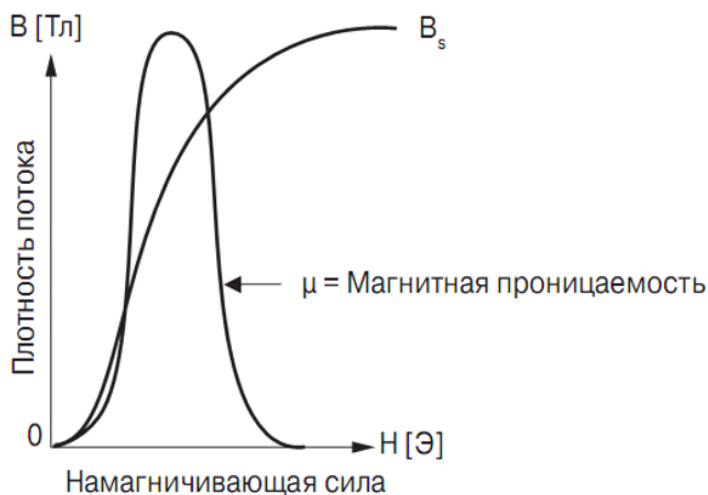
Остаточный магнитный поток – это поляризованный поток, оставшийся после снятия возбуждения. Намагничивающая сила (напряженность магнитного поля) H_c называется коэрцитивной. Это то количество намагничивающей силы, которое необходимо для сведения к нулю остаточного магнитного потока.

Магнитная проницаемость μ

4

Магнитная проницаемость магнитного материала – это мера лёгкости его намагничивания. Магнитная статическая проницаемость определяется формулой

$$\mu = \frac{B}{H}$$



Взаимосвязь между B и H нелинейная. Поэтому их отношение не постоянно. По зависимости индукции B от H можно найти B , при которой статическая магнитная проницаемость μ имеет максимум.

Зависимость магнитной проницаемости от B и H

Потери на перемагничивание (на гистерезис)

5

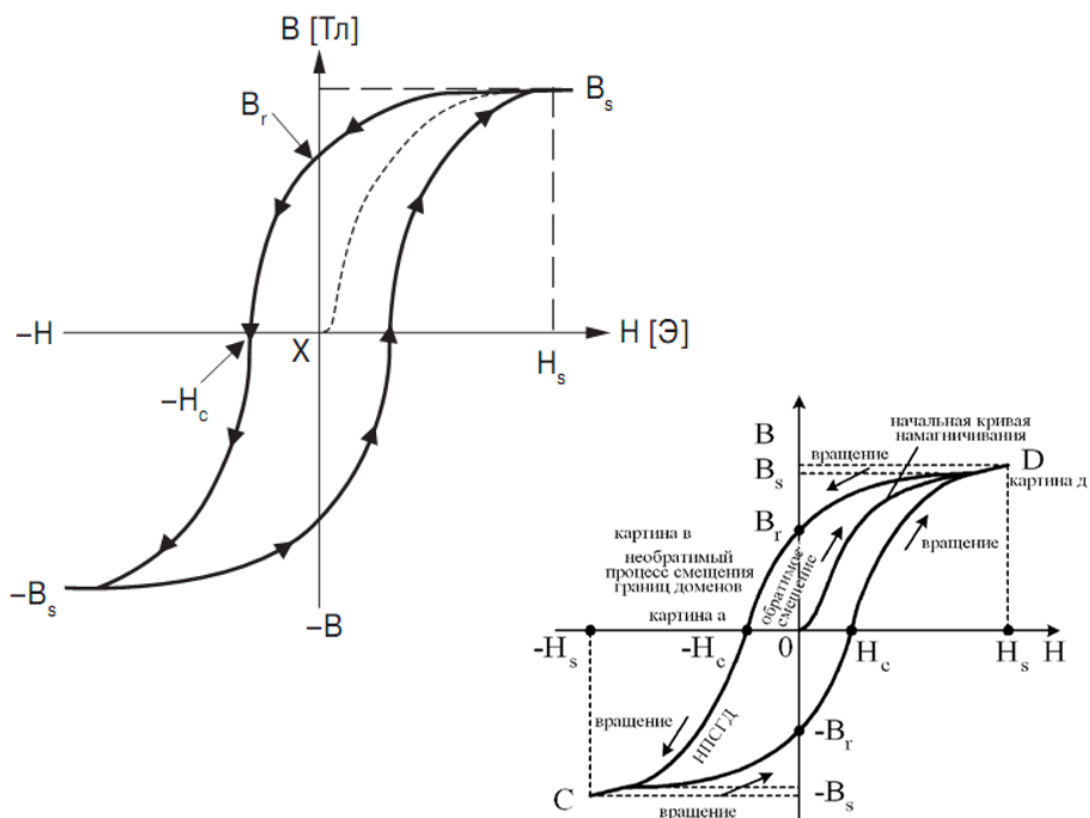
Для того, чтобы осуществить скачкообразные повороты векторов намагниченности доменов в ферромагнетике необходимо затратить некоторую энергию, которая потребляется от источника питания и выделяется в виде тепла. При перемагничивании с частотой f мощность потерь на гистерезис определяется как:

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{d\Psi}{dt} \cdot i dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{w \cdot d\Phi}{dt} \cdot i \cdot dt =$$

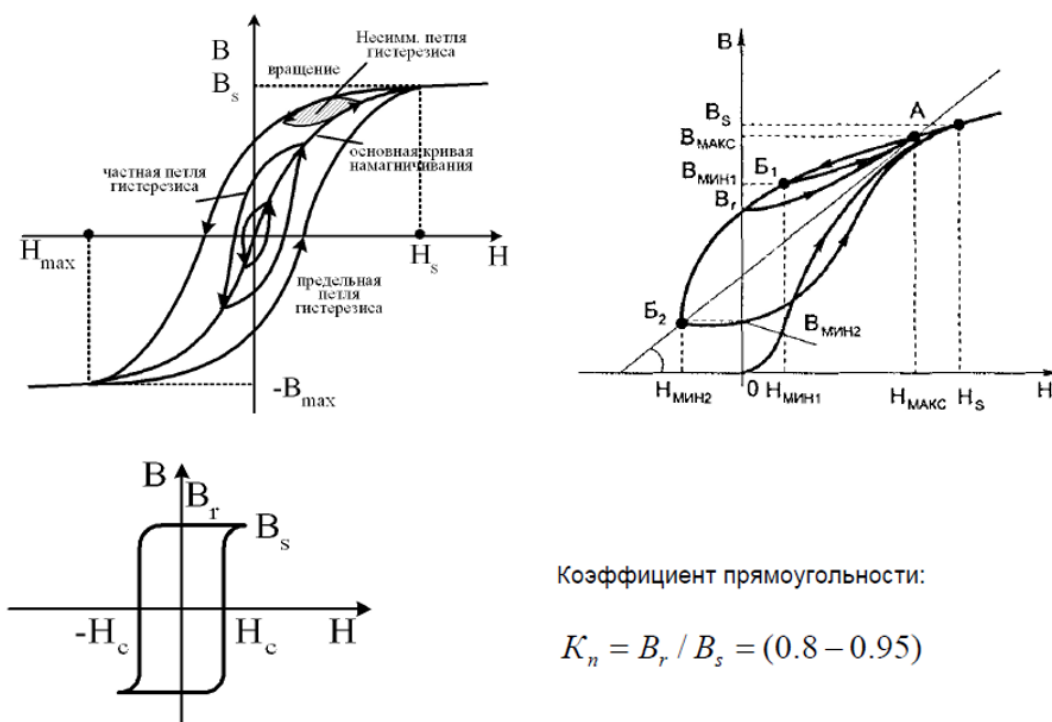
$$= f \int_0^T w s \frac{dB}{dt} \cdot \frac{H \cdot l}{w} \cdot dt = f \cdot s \cdot l \cdot \oint H dB.$$

Таким образом, чем больше объем сердечника, частота перемагничивания, площадь петли гистерезиса, тем больше суммарные статические потери. Для уменьшения потерь необходимы материалы с узкой петлей.

Магнитный гистерезис



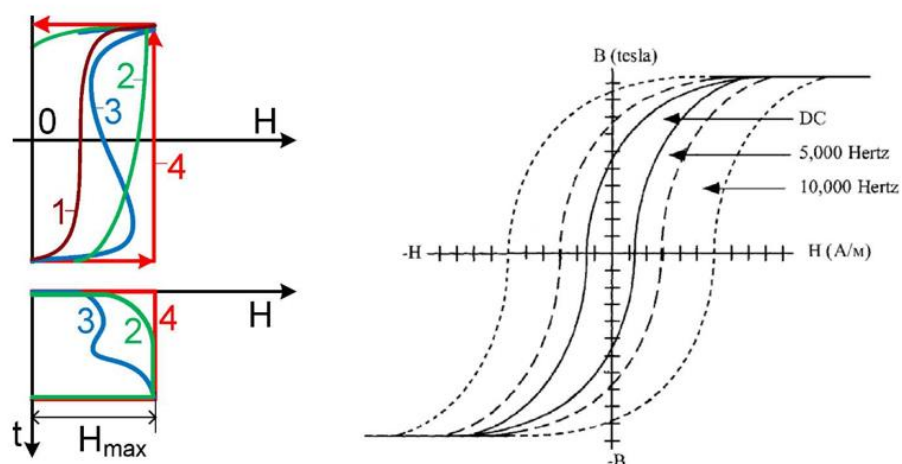
Петли гистерезиса



Коэффициент прямоугольности:

$$K_n = B_r / B_s = (0.8 - 0.95)$$

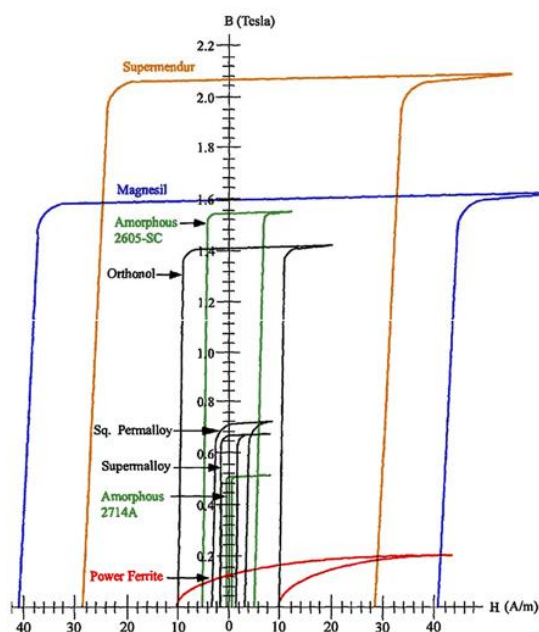
Динамические свойства ферромагнетиков



$$F\left(B, \frac{dB}{dt}, \frac{d^2B}{dt^2}, \dots, H, \frac{dH}{dt}, \frac{d^2H}{dt^2}, \dots\right) = 0$$

$$F\left(H, B, \frac{dB}{dt}\right) = 0$$

Петли гистерезиса различных ферромагнитных материалов



Магнитный материал – основной компонент при проектировании магнитного устройства.

Магнитные компоненты работают в диапазоне от низких звуковых частот до сотен мегагерц и выше (УВЧ-устройства 0.3...3 ГГц, СВЧ – устройства 3...30 ГГц).

От инженера требуется спроектировать максимально эффективные устройства с минимальными паразитными параметрами, к которым относятся **ёмкость и индуктивность рассеивания**.

Сегодня магнитные материалы – это **кремниевая сталь**, железо-никелевый сплав (**пермаллой**), железо-кобальтовый сплав (**перминдюр**), **аморфные металлические сплавы** и **ферриты**.

Основные характеристики магнитного материала:

- **индукция насыщения B_s** ;
- **магнитная проницаемость μ** ;
- **сопротивление, характеризующее потери в сердечнике p** ;
- **остаточная индукция B_r** ;
- **коэрцитивная сила H_c** .

Классификация ферромагнитных материалов

1. **Магнитотвердые ($H_c > 4000\text{А/м}$)** — в основном для изготовления постоянных магнитов.
2. **Магнитомягкие ($H_c < 4000\text{А/м}$)** — для электромагнитных устройств промышленной электроники. Хорошо намагничиваются до насыщения даже в слабых полях и имеют малые потери при перемагничивании. У них петля узкая, а $\mu_{\text{нач}}$ и $\mu_{\text{мах}}$ и B_s – велики:
 1. Технически чистое железо.
 2. Электротехнические стали (Silicon Steel).
 3. Пермаллои (Nickel Alloys).
 4. Аморфные сплавы (Amorphous, metallic Glasses).
 5. Магнитомягкие ферриты (Soft Ferrites).
 6. Магнитодиэлектрики.

Индукция насыщения различных магнитных материалов

Материал	B_s , Тл
Технически чистое железо	2
Карбонильное железо	2.1
Электротехническая сталь	1.4 - 2.0
Пермаллой	0.7 – 1.5
Пермендюр	2.4
Аморфные сплавы	0.5 – 1.5
Феррит	0.5
Альсифер	1.2

Электротехническая сталь — твердый раствор Si в Fe .

Достоинства — $t_{\text{Кюри}}=700-750^{\circ}\text{C}$, наиболее дешевы и имеют большие индукции насыщения B_s до 2Тл и μ до десятков тысяч.

Недостатки — свойства сильно зависят от частоты и имеют большие коэрцитивные силы до $H_c=50\text{А/м}$. Используются на частотах $50\text{Гц} - 10\text{кГц}$.

Пермаллои — железно никелевые сплавы (Fe с Ni), содержащие 45-82% никеля, обычно легированные Mo , Cr и пр.

Достоинства — высокие значения магнитной проницаемости в слабых полях и малое значение коэрцитивной силы (узкая и крутая петля гистерезиса).

Недостатки: — чувствительность магнитных свойств к механическим напряжениям, пониженное значение B_s , по сравнению со сталями и дороговизна

Пермендюры — железно кобальтовые сплавы (Fe с Co), содержащие от 30 до 50% кобальта. Они имеют максимальное B_s до 2.5Тл , и наиболее высокую температуру Кюри (до 980°C).

Пермаллои, пермендюры применяются на частотах от $5...10\text{кГц}$ до $20...30\text{кГц}$.

Аморфные магнитомягкие сплавы — электротехнические сплавы, не имеющие кристаллического строения. Достоинства:

1. Улучшенные магнитные и механические свойства
2. Высокое удельное электрическое сопротивление ($\rho=(1...1,5)\cdot 10^{-6}\text{Ом}\cdot\text{м}$), малые потери на гистерезис и вихревые токи — в среднем в 3...5 раз меньше, чем у кристаллических сплавов.
3. Высокое значение проницаемости ($\mu_{\text{нач}}$ — до 20000, μ_{max} — до 300000...600000)
4. Низкая коэрцитивная сила (H_c менее 1А/м).

Недостаток — меньшая индукция насыщения ($B_s < 1.5\text{Тл}$).

Электротехническая сталь

Электротехническая (кремниевая) сталь была одним из первых сплавов, используемых в сердечниках трансформаторов и дросселей. За прошедшие годы её характеристики были значительно улучшены и, возможно, это наиболее широко используемый материал.

Одним из недостатков этой стали в первые годы был **рост потерь** по мере старения материала.

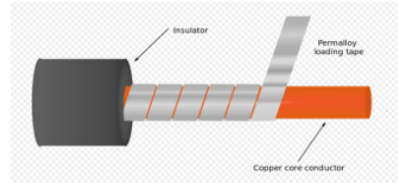
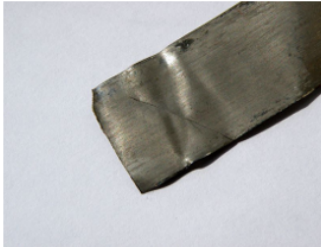
С добавлением **кремния** в сталь удалось **увеличить её удельное сопротивление**, тем самым уменьшив потери от вихревых токов, и улучшить временную стабильность характеристик (добавление кремния делает сталь хрупкой).

Кремниевая сталь обеспечивает большую индукцию насыщения, относительно большое значение магнитной проницаемости при большой плотности потока и умеренные потери в диапазоне звуковых частот.

Одно из важных усовершенствований было внесено в процесс **холодной прокатки**, связанной с ориентацией зёрен (**текстурованием**). Эта сталь имеет особо **низкие потери** и **большую магнитную проницаемость**, поэтому она используется в высокоэффективных устройствах.

Пермаллой и пермендюр

Магниторезистивные свойства **пермаллоя** используют в датчиках магнитного поля. Прокат пермаллоя применяется для экранирования от магнитного поля (например, помещений для МРТ, электронных микроскопов и некоторых других особо чувствительных приборов). Из пермаллоя изготавливают защитные кожухи для микросхем, и катушек — особо чувствительных к магнитному полю.



$$\frac{R_0}{L_0} = \frac{G_0}{C_0}$$

Первоначально, пермаллой использовался для уменьшения искажения сигнала в телекоммуникационных кабелях как компенсатор их распределённой ёмкости.

Пермендюр (англ. permendur: permeability — «проницаемость»; durable — «прочный») — сплав железа (47-50 %) с кобальтом (48-50 %), с небольшой добавкой ванадия (1.5-2 %). Сплав разработан в США в 1920-х годах. Обладает свойством насыщения магнитной проницаемости при очень высоких значениях индукции магнитного поля (2-2,4 Тл).

Удельное сопротивление меди $\rho_{\text{меди}} = 1.75 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$

Удельное сопротивление пермаллоя $\rho_{\text{пермаллоя}} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Удельное сопротивление пермендюра $\rho_{\text{пермендюра}} = 26 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Металлические сплавы с высокой магнитной проницаемостью базируются главным образом на **железо-никелевой** основе.

Хотя Хопкинсон ещё в 1889 г. исследовал железо-никелевые сплавы, они не использовались до изучения их свойств в слабых магнитных полях и эффектов, связанных с термообработкой, это было сделано Елменом в 1913 г.

Елмен назвал свой Ni-Fe сплав «**Пермаллой**». Первый патент был выдан в 1916 г. Предпочтительная композиция была – 78Ni-Fe сплав.

Вскоре Йенсен провел независимое исследование и получил 50Ni-50Fe сплав «Гиперник», который имел меньшую магнитную проницаемость и удельное сопротивление, но более высокую индукцию насыщения (1.5 Тл в сравнении с 0.75 Тл). Это определило его более высокую эффективность в силовом оборудовании.

Улучшение свойств Ni-Fe сплавов было достигнуто при использовании **высокотемпературного отжига в атмосфере водорода**, что впервые было сделано Йенсеном.

Следующее достижение — это отжиг стали с ориентированными зёрнами (текстурованной) в **магнитном поле** и в атмосфере водорода. Эта работа была проведена на Kelsall и Vozorth. Таким образом был получен новый материал «**Супермаллой**». Он имеет более высокую магнитную проницаемость, более низкую коэрцитивную силу и примерно такой же, как у 78Ni-Fe магнитный поток насыщения.

Увеличение сопротивления магнитных материалов

Возможно, наиболее важным из всех факторов является отжиг в магнитном поле, который обеспечивает не только высокую магнитную проницаемость, но также «прямоугольность» кривой намагничивания, что важно в высокочастотных силовых преобразовательных установках.

Для получения высокого сопротивления и, следовательно, низких потерь в сердечнике при работе на высоких частотах были использованы два подхода:

1. Модификация состава металлических сплавов;
2. Усовершенствование магнитных оксидов.

Результатом явилось усовершенствование тонкой магнитной ленты и порошковых сплавов в 1920-х годах и появление тонких плёнок в 1950-х.

Развитие тонких плёнок было стимулировано требованиями авиационной силовой преобразовательной техники с середины 1960-х годов по настоящее время.

Название материала	Состав	Начальная магнитная проницаемость μ_i	Плотность потока B_s [Тл]	Температура Кюри $^{\circ}\text{C}$	Коэрцитивная сила H_c [Э]	Плотность δ [г/см ³]
Кремний	3% Si 97% Fe	1.5 К	1.5...1.8	750	0.4...0.6	7.63
Суперминдюр (отожжённый в магнитном поле) ¹⁾	49% Co 49% Fe 2% V	0.8 К	1.9...2.2	940	0.15...0.35	8.15
Ортонол	50% Ni 50% Fe	2 К	1.42...1.58	500	0.1...0.2	8.24
Пермаллой	79% Ni 17% Fe 4% Mo	12 К...100 К	0.66...0.82	460	0.02...0.04	8.73
Супермаллой	78% Ni 17% Fe 5% Mo	10 К...50 К	0.65...0.82	460	0.003...0.008	8.76

Металлическое стекло

Первый синтез металлического стекла привлек внимание учёных, занимающихся синтезом материалов, в 1960 г. Klement, Willens и Duwez сообщили, что жидкий AuSi сплав, если его быстро охладить до температуры жидкого азота, формируется как аморфное твёрдое тело.

Через двенадцать лет Chen и Polk создали металлические стёкла на основе железа, обладающие значительной ковкостью и нужной формой.

С тех пор металлические стёкла пережили переход от лабораторной диковинки к полезному изделию и находятся в фокусе интенсивного технологического и фундаментального изучения. Металлические стёкла обычно производятся путём быстрого охлаждения жидкого металла со скоростью порядка 10^5 градусов в секунду через температуру нормальной кристаллизации.

Принципиальная разница между кристаллическим и аморфным материалом заключается в атомной структуре. Несмотря на это аморфный и кристаллический материалы имеют почти одинаковую плотность.

Электрическое сопротивление металлического стекла почти в три раза больше сопротивления кристаллического материала того же состава.

Величины электрического сопротивления материала в стекловидном и жидком состояниях одинаковы. Металлические стёкла – магнитомягкий материал. Термин «мягкий» означает большой отклик на малое приложенное поле. Такая ситуация желательна в трансформаторах и дросселях.

Магнитные свойства некоторых аморфных материалов 19

Очевидными достоинствами аморфных материалов являются способность работать на высоких частотах при большой индукции, высокая магнитная проницаемость и низкие потери в сердечнике.

Наименование	Состав	Начальная магнитная проницаемость μ_i	Индукция B_s [Тл]	Температура Кюри $^{\circ}\text{C}$	Коэрцитивная сила H_c [Э]	Плотность δ [г/см ³]	Фактор веса ¹⁾
2605SC	81% Fe 13.5% B 3.5% Si	1.5 K	1.5...1.6	370	0.4...0.6	7.32	0.957
2714A	66% Co 15% Si 4% Fe	0.8 K	0.5...0.65	205	0.15...0.35	7.59	0.995
2714AF	66% Co 15% Si 4% Fe	2 K	0.5...0.65	205	0.1...0.2	7.59	0.995
Нанокристал Витроперм 500F	73.5% Fe 1% Cu 15.5% Si	30 K...80 K	1.0...1.2	460	0.02...0.04	7.73	1.013

Ферриты 20

Ферриты — неметаллические соединения из смеси окислов железа, никеля, цинка, марганца, меди и других металлов.

Поликристаллические соединения с общей формулой MeFe_2O_3 (где Me — двухвалентный металл. ион).

Для магнитопроводов МЭ наибольшее применение получили Mn-Zn, Ni-Zn ферриты, являющиеся двухкомпонентными ферритами: $\text{MnO-ZnO-Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{NiO-ZnO-Fe}_2\text{O}_3$.

Достоинства: ρ ферритов на много порядков больше, чем у металлических и аморфных ФМ; простота изготовления сердечников сложной формы.

Недостатки: B_s и μ_{max} **намного меньше, чем у металлов ($B_s < 0.5 \text{ Тл}$)**. Температура Кюри имеет невысокое значение **100–300 $^{\circ}\text{C}$** .

Марки обозначаются цифрами и буквами. Например, для ферритов общего назначения 1500НМ, 2000НН — число обозначает начальную проницаемость $\mu_{\text{нач}}$, НН — никель-цинковые, НМ — марганец-цинковые.

Используются на частотах от 10-20 кГц до 10^8 Гц.

Магнитомягкие ферриты

На заре электрической эры нужда в необходимых магнитных материалах покрывалась железом и его сплавами. Однако с развитием техники и увеличением рабочих частот стандартная техника уменьшения потерь от вихревых токов оказалась неэффективной. Это стимулировало возрождение интереса к «магнитным изоляторам», как их впервые назвал S. Hilpert в Германии в 1909 г. Было понятно, что если высокое электрическое сопротивление оксидов соединить с хорошими магнитными свойствами, то получится магнитный материал, как раз пригодный для использования на высоких частотах.

Исследования по созданию такого материала начались в лабораториях всего мира. V. Kato, T. Takei и N. Kawai в 1930-х годах в Японии и **J. Snoek в Philips' Research Laboratoies** в период 1935–1946 гг. в Нидерландах. Эти исследования заложили основы физики и технологии ферритовых материалов. В 1948 г. «Теория магнетизма» Неела (L. Neel) обеспечила теоретическое понимание этого типа магнитных материалов.

Ферриты – это керамический гомогенный материал состоящий из смеси оксидов. Окись (оксид) железа — главный компонент.

В магнитомягких ферритах можно выделить две главные категории: **марганец-цинковые и никель-цинковые**.

В каждой из этих категорий, сменяя химический состав или технологию изготовления, можно изготовить много разных Mn-Zn или Ni-Zn образцов.

Сравнение базовых свойств Mn-Zn и Ni-Zn ферритов

Два этих семейства дополняют друг друга и позволяют использовать ферриты в диапазоне от звуковых частот до нескольких сотен мегагерц.

Основные отличия этих ферритов показаны в таблице: Mn-Zn имеет более высокую магнитную проницаемость, а Ni-Zn – более высокое сопротивление, поэтому может использоваться на очень высоких частотах.

Материал	Начальная магнитная проницаемость μ_i	Максимальная индукция B_{\max} [Тл]	Температура Кюри [°C]	Коэрцитивная сила H_c [Э]	Сопротивление [Ом см]
Mn-Zn	750...15 K	0.3...0.5	100...300	0.04...0.25	10...100
Ni-Zn	15...1500	0.3...0.5	150...450	0.3...0.5	10°

Магнитодиэлектрики

Магнитодиэлектрики — смесь измельченного ферромагнетика, частицы которого электрически отделены друг от друга диэлектрической средой (полистирол, стеклоэмали, фенолформальдегидные смолы), являющейся одновременно электрической изоляцией и механической связкой всей системы.

Магнитодиэлектрики — ферромагнитная среда с беспорядочно распределенным по ее объему большим числом немагнитных зазоров.

Альсифер (6...8%Al + 9...11% Si + Fe) МД $\mu = 20...90$;

Карбонильное железо МД $\mu = 9.5...21$;

Прессперм (Мо-пермаллой) МД $\mu = 55...250$

Ферриты и магнитодиэлектрики применяют на частотах **10-20 кГц и выше.**

Сравнительная характеристика магнитных материалов

Название материала	Состав	Начальная магнитная проницаемость $\mu_{нач}$	Магнитная индукция насыщения B_s , Тесла	Температура Кюри T_C , °C	Коэрцитивная сила H_C , А/м	Плотность ρ , г/см ³
Электротехническая сталь (Magnesil)	3% Si 97% Fe	1500	1.5–1.8	750	30–50	7.3
Пермендюр (Supermendur)	49% Co 49% Fe 2% V	800	1.9-2.2	940	12–28	8.15
Низконикелевый пермаллой (Orthonol)	50% Ni 50% Fe	2000	1.42-1.58	500	8–16	8.24
Высоконикелевый пермаллой с ППГ (Sq. Perm alloy)	79% Ni 17% Fe 4% Mo	12000–100000	0.66-0.82	460	1.6–3.2	8.73
Высоконикелевый пермаллой (Supermalloy)	78% Ni 17% Fe 5% Mo	10000–50000	0.65-0.82	460	0.5–0.64	8.76
Аморфный 2605-SC	81% Fe 13.5% B 3.5% Si	3000	1.5-1.6	370	2.4–6.4	7.32
Аморфный 2714A	66% Co 15% Si 4% Fe	20000	0.5-0.58	205	0.25 –1.6	7.59
Ферриты	MnZn	750–15000	0.3-0.5	100–300	3.2–20	4.8

Чем дешевле материал магнитопровода, чем меньше его удельные потери мощности при перемагничивании и чем выше индукция насыщения, тем лучше.

Однако эти показатели противоречивы, что обусловило наличие различных по свойству и качеству ферроматериалов.

Наиболее дешевыми, с достаточно высокой индукцией насыщения ($\approx 1,6$ Тл) являются нетекстурованные электротехнические стали из листов горячей прокатки толщиной **0,2÷0,35 мм** (для стандартной частоты 50 Гц — 0,5 мм). Однако эти стали имеют большие удельные потери мощности при намагничивании, что ограничивает их применение в пределах частот до **500 Гц**.

В несколько раз меньшие потери имеют текстурованные электротехнические стали **холодной прокатки**.

Здесь высокая магнитная проницаемость обеспечивается только в направлении проката, что создает проблемы изготовления магнитопроводов.

Однако значения индукции насыщения **до 1,8 Тл** и **уменьшение магнитных потерь** обеспечивает широкое применение этих электротехнических сталей.

Потери уменьшаются с уменьшением толщины материала.

Чаще всего текстурованные стали представляют собой металлическую ленту толщиной **0,2; 0,15; 0,08 и 0,05 мм**.

Выполненные из нее магнитопроводы называют **ленточными**.

Для штампованных магнитопроводов прокатывают листы, толщиной **0,35 мм**.

Текстурованные стали дороже сталей горячей прокатки, но могут применяться в диапазоне частот **500÷5000 Гц**.

При частотах **более 5 кГц** уменьшать потери мощности на перемагничивание приходится за счет добавок в электротехнические стали компонентов из никеля, марганца или графита.

Такие ферроматериалы называют **электротехническими сплавами**.

Электротехнические сплавы имеют только ленточное исполнение с толщиной 0,15; 0,08; 0,05 и 0,02 мм.

Индукция насыщения сплавов понижается **до 1÷1,2 Тл** и ниже, они очень чувствительны к механическим воздействиям, усложняется технология изготовления из них магнитопроводов и в целом — сплавы в несколько раз дороже текстурованных электротехнических сталей.

При частотах **15÷20 кГц** потери магнитной мощности в сплавах вынуждают снижать рабочую индукцию магнитопроводов до **0,3÷0,2 Тл**, что обуславливает неэффективность применения электротехнических сплавов при частотах **более 20 кГц**.

Известны ферроматериалы, изготавливаемые из порошков, представляющих собой окислы железа (ферриты и др.).

Из этих окислов с определенными другими добавками готовится мастика, которая потом прессуется по требуемой форме магнитопровода с термическим запеканием.

Ферроматериал из порошков дешевле сплавов, в 1,5÷1,7 раз легче, имеет очень маленькие потери мощности на перемагничивание (в пределах 10÷5 Вт/кг при частоте 10 кГц, что в 10 и более раз меньше, чем у сплавов), но индукция насыщения прессованных магнитопроводов не превышает 0,35 Тл.

Поскольку на высоких частотах другие ферроматериалы не могут работать с индукциями более 0,2÷0,3 Тл (из-за потерь в стали, греющих магнитопровод), то применение ферромагнетиков из окислов (ферриты, оксиферы и др.) при частотах более 10 кГц не имеет альтернативы (за исключением магнитодиэлектриков – порошковых сердечников).

Для выбора материала магнитопроводов следует руководствоваться следующими рекомендациями относительно частоты питающего напряжения:

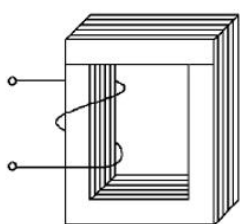
- электротехнические стали нетекстурованные — до 500 Гц;
- электротехнические стали текстурованные — 500 Гц...5 кГц;
- электротехнические сплавы — 5...15 кГц;
- прессованные ферроматериалы — 10 кГц и более.

Формы сердечников (магнитопроводов)

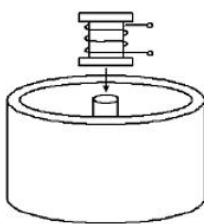
Стержневые

Б р о н е в ы е

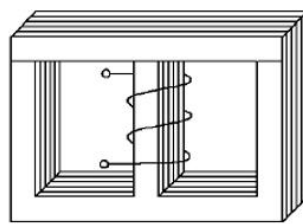
Кольцевые



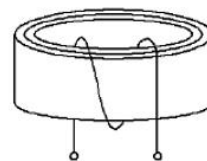
Пластинчатый
П-образный



Прессованный
из феррита



Пластинчатый
Ш-образный

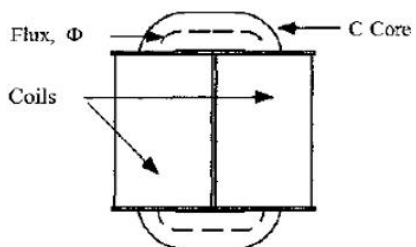


Ленточный
О-образный

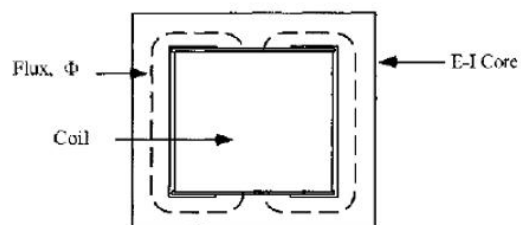
По зарубежной классификации:

Coil Surrounds the Core

Core Surrounds the Coil



стержневая



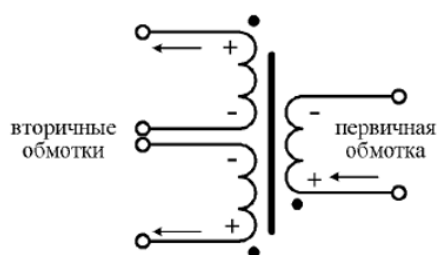
броневая

Условные графические обозначения магнитных элементов

TV — трансформатор напряжения

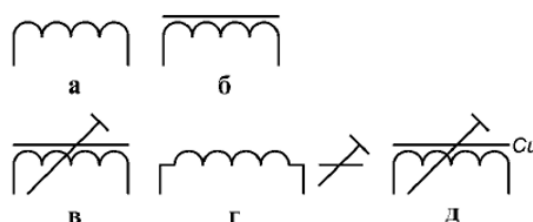
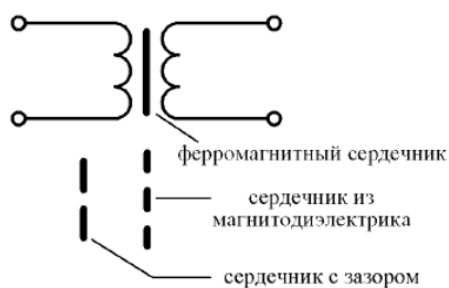
TA — трансформатор тока

Одноименными называются такие выводы трансформатора, напряжение на которых имеет один знак. Если на первичной обмотке трансформатора ток втекает в точку, то на вторичной стороне ток будет вытекать из нее, судя по появившейся полярности напряжения.



3-х обмоточный трансформатор

L — дроссель, катушка индуктивности

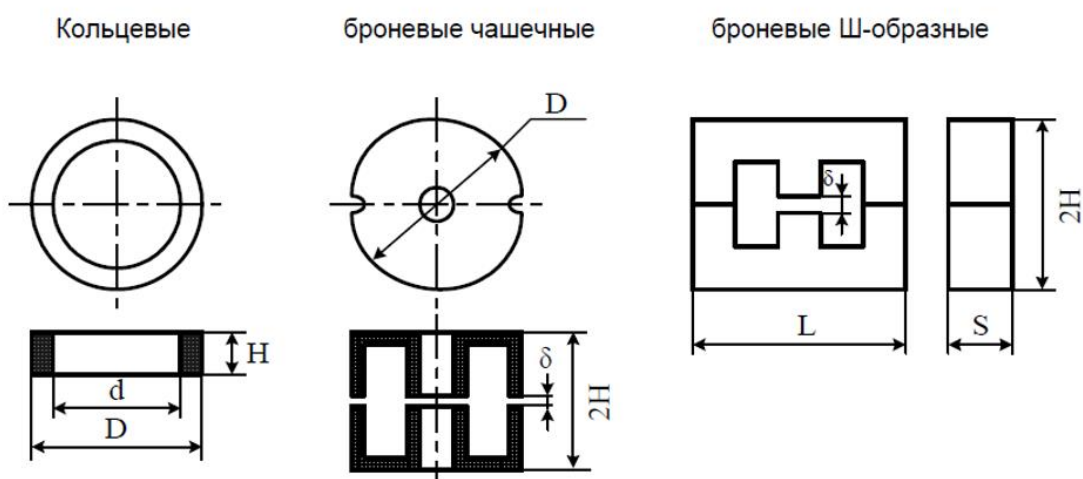


а — без сердечника; б — с ферромагнитным сердечником

в, г — подстроечной с ферритовым сердечником

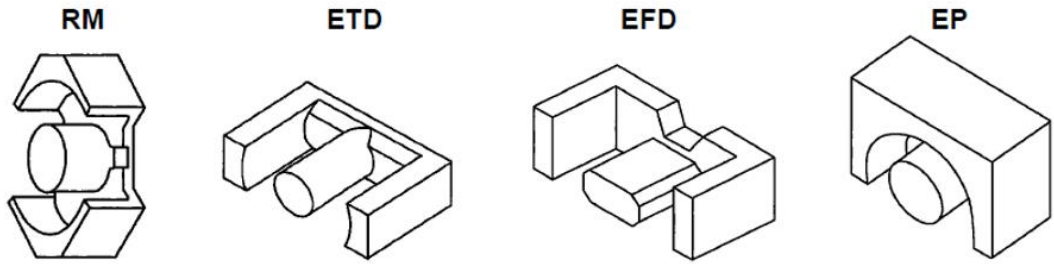
д — подстроечной с немагнитным (медным — Cu) сердечником)

Ферритовые сердечники для трансформаторов и дросселей выпускаются в трех основных видах:

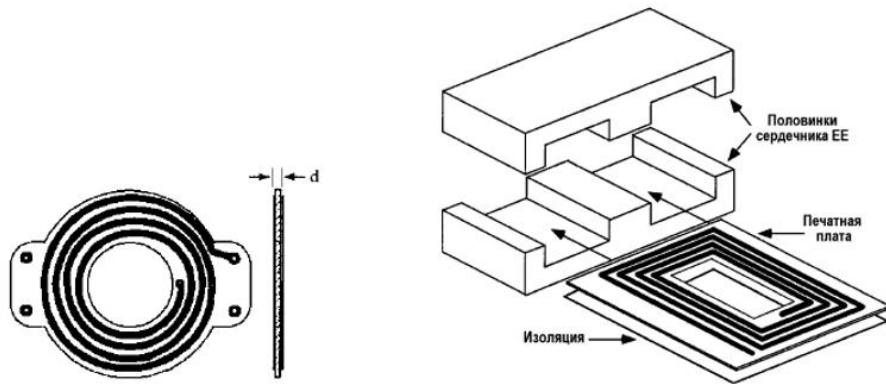


На рис. броневые сердечники показаны в собранном виде, состоящими из 2-х частей.

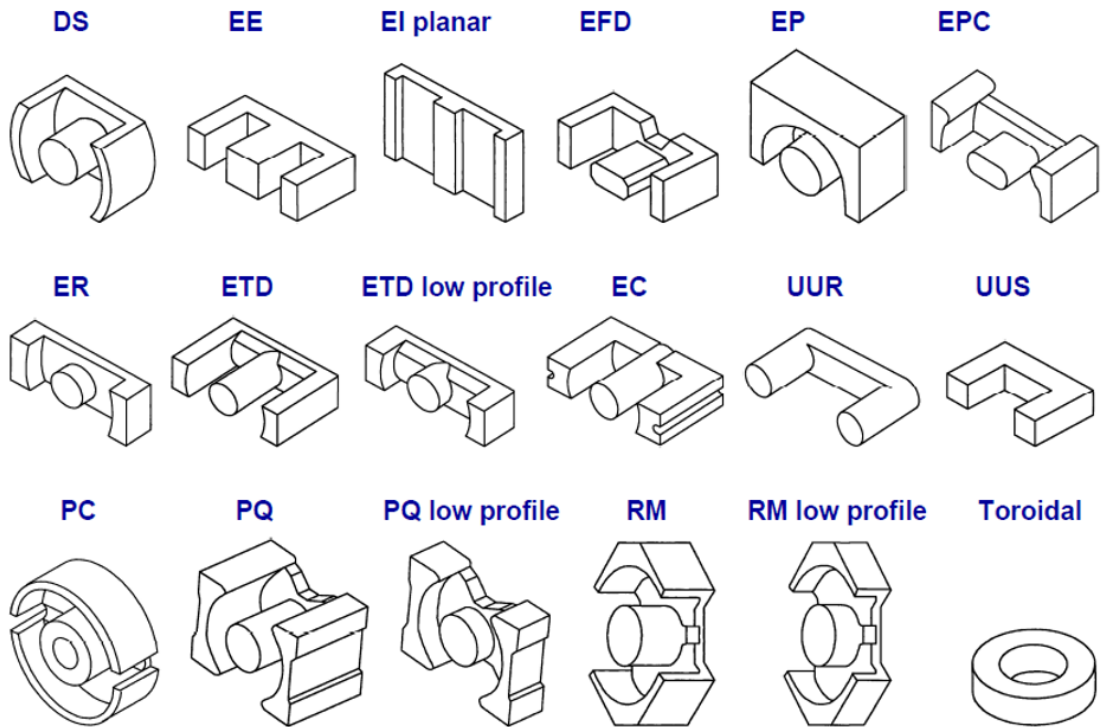
Основные виды ферритовых сердечников



Конструкция печатной обмотки



Разновидности ферритовых сердечников



Сердечники фирмы EPCOS (Германия)

