КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
Кафедра физики твердого тела

В.В. ПАРФЕНОВ, Н.В. БОЛТАКОВА

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ МАГНЕТИКОВ

Методическое пособие к лабораторной работе

Казань 2014

УДК 537.311.4
ББК В373.3

Принято на заседании кафедры физики твердого тела
Протокол № 6 от 22 ноября 2014 года

Рецензент:
канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры теоретической физики К(П)ФУ
Деминов Р.Г.

Парфенов В.В., Болтакова Н.В.
Изучение процессов намагничивания и перемагничивания магнетиков / В.В. Парфенов, Н.В. Болтакова. – Казань: Казан. ун-т, 2014. – 34 с.

Методическая разработка предназначена для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 03.03.02 «Физика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Физика магнитных материалов и полупроводников», спецпрактикум, «Физика конденсированного состояния», «Физические основы микро- и наносистемной техники».

Пособие не освобождает и не ограничивает студента от обращения к другим источникам информации, в том числе рекомендованным в данном пособии, необходимым для выполнения лабораторных заданий, для подготовки к зачету и экзамену, поскольку не охватывает материал, вынесенный на самостоятельное изучение студентом.

© Парфенов В.В., 2014
© Болтакова Н.В., 2014
© Казанский университет, 2014

Процессы намагничивания и перемагничивания магнетиков

Магнитная анизотропия

Причиной возникновения магнитных свойств в твердых телах является обменное взаимодействие между спинами атомов или ионов, составляющих кристалл, причем для ферромагнетика состояние с минимальной энергией достигается при параллельной ориентации спинов всех атомов, для ферри- и антиферромагнетиков − при антипараллельной ориентации спинов соседних атомов. Казалось бы, что при отсутствии какого-либо внешнего поля при любой температуре, меньшей температуры Кюри, ферро- и ферримагнетики должны быть намагниченными только за счет «выстраивания» спинов обменным взаимодействием. Фактически же спонтанная намагниченность большинства магнитных материалов значительно меньше или отсутствует вообще (образец размагничен) и появляется только при наложении внешнего магнитного поля H. При этом намагниченность M и индукция B нелинейно зависят от поля и при некотором значении $H = H_S$, называемом «полем насыщения», практически перестают изменяться. При уменьшении поля до нуля образец будет обладать остаточной намагниченностью M_r (остаточной индукцией B_r), т.е. зависимость $M(H)$ не только нелинейна, но и неоднозначна (рис. 1). При перемагничивании образца полем, меняющимся в пределах от H_s до $-H_s$ намагниченность будет иметь вид гистерезисной кривой − *петли гистерезиса*. Точки пресечения петли с осью H отвечают полю, которое нужно приложить, чтобы размагнитить предварительно намагниченный образец. Значение поля в этих точках называется *коэрцитивной силой* H_c, и именно оно характеризует способность магнитного материала к перемагничиванию. К *магнитомягким* относят материалы с $H_c \approx 0{,}01-10$ Э, для *магнитотвердых* соединений H_c может достигать 10^4 Э.

Если образец магнетика − монокристалл, то форма петли гистерезиса будет зависеть от направления внешнего поля относительно главных осей кристалла. При ориентации поля параллельно определенным направлениям, называемым *осями легкого намагничивания*, намагниченность будет достигать насыщения при меньших значениях внешнего поля. Эта анизотропия свойств также не может быть описана в рамках теории Вейсса, т.к. обменное взаимодействие в ней считалось

изотропным, т. е. одинаковым по всем направлениям.

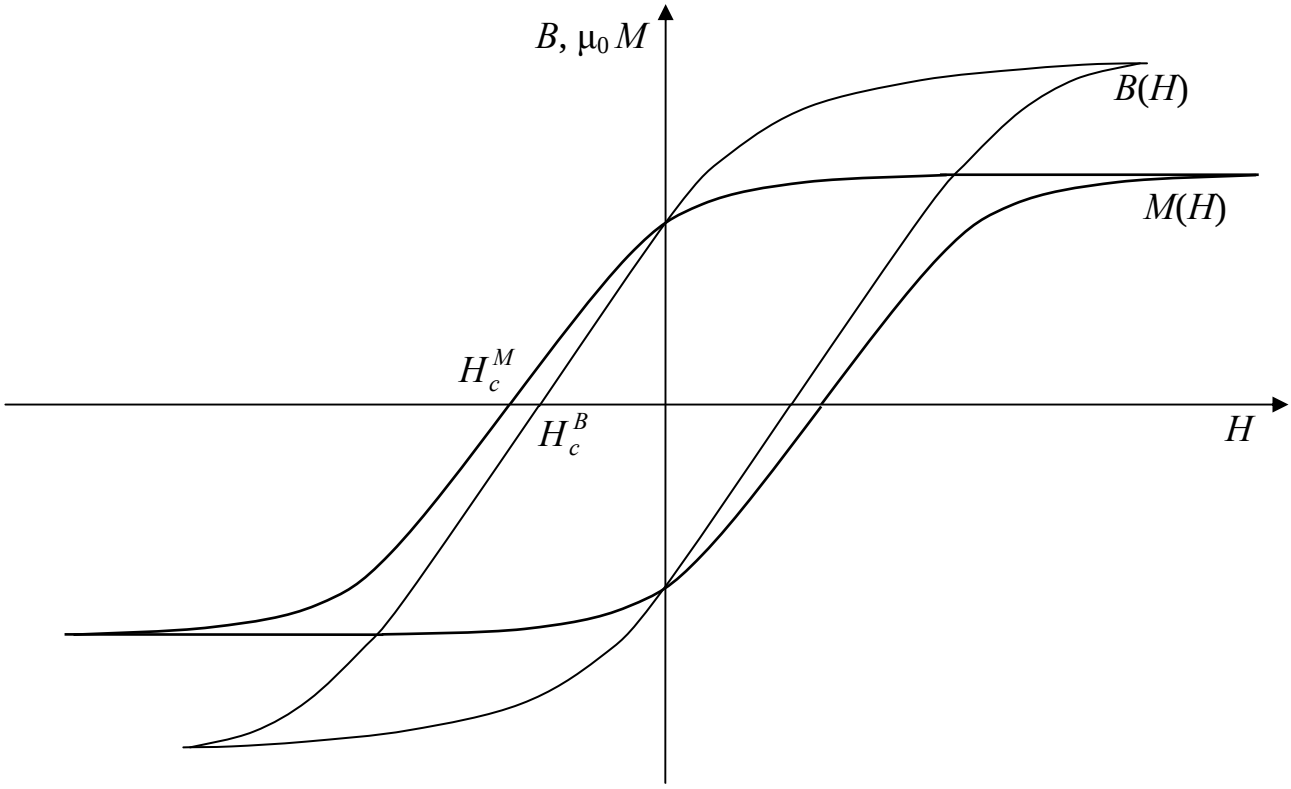


Рисунок 1. Зависимость намагниченности и индукции от поля

Виды магнитной анизотропии

Вышеперечисленные экспериментальные факты можно объяснить, если считать, что полная магнитная энергия магнетика не ограничивается только энергией обменного взаимодействия $U^{\text{обм}}$, а содержит вклады, зависящие от радиус−вектора $\vec{r}$ – так называемые анизотропные вклады. С учетом этих вкладов полную магнитную энергию тела $U^{\text{М}}$ принято записывать в виде суммы:

$$U^{\text{М}} = U^{\text{обм}} + U^{\text{мк}} + U^{\text{му}} + U^{\text{мс}}, \qquad (1)$$

где $U^{\text{мк}}$ – магнитокристаллическая, $U^{\text{му}}$ – магнитоупругая, $U^{\text{мс}}$ – магнитостатическая энергии, причем последние три вклада достаточно описать на макроскопическом уровне, не детализируя их физическую сущность.

Магнитокристаллическая энергия $U^{\text{мк}}$ обусловлена тем, что орбитальное движение электрона данного иона зависит от симметрии электронной орбиты, симметрии ближайшего окружения магнитного атома и само, в свою очередь, связано со спином посредством спин-орбитального взаимодействия

$$\mathcal{H}_{LS} = -\lambda(\vec{L}\vec{S}), \qquad (2)$$

где $\mathcal{H}_{LS}$ – оператор энергии спин-орбитального взаимодействия, λ – константа спин-орбитальной связи. Энергию $U^{мк}$ принято записывать в виде разложения по степеням направляющих косинусов вектора намагниченности на главные оси кристалла. Так, например, для кристаллов с кубической симметрией

$$U^{мк} = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2, \qquad (3)$$

где K_1, K_2 − константы магнитной анизотропии; α_1, α_2, α_3 – направляющие косинусы вектора намагниченности (относительно оси лёгкого намагничивания). Направления, в которых $U^{мк}$ имеет абсолютный минимум, и будут направлениями легкого намагничивания (осями легкого намагничивания). Отметим, что для кристаллов с кубической симметрией K_1 обычно существенно больше, чем K_2 , а для кристаллов с гексагональной симметрией – наоборот.

Магнитоупругий вклад $U^{му}$ в энергию связан с деформацией кристаллической решетки и может быть описан также как и магнитокристаллический, но с модифицированными (измененными) константами анизотропии K_1'. Для кубических кристаллов, в частности,

$$K_1' = K_1 + \Gamma,$$

$$\Gamma = \tfrac{9}{4}\left[(c_{11} - c_{12})\lambda_{100}^2 - 2c_{44}\lambda_{111}^2\right], \qquad (4)$$

где c_{11}, c_{12}, c_{44} − упругие модули кристалла; λ_{100}, λ_{111} − константы магнитострикции. Явление *магнитострикции* заключается в изменении геометрических параметров магнетика (формы, объема) при его намагничивании.

Магнитостатическая энергия $U^{мс}$ − это энергия магнитного момента μ в поле H. Если внешнее поле отсутствует, то $U^{мс}$ − энергия магнитного момента во внутреннем поле, создаваемом всеми остальными магнитными моментами – так называемом *размагничивающем поле* H_d:

$$U^{мс} = -\mu H_d.$$

Этот вклад в магнитную энергию анизотропен, так как анизотропно само диполь-дипольное взаимодействие магнитных моментов:

$$U_{ij} = \frac{(\vec{\mu}_i\vec{\mu}_j)}{r_{ij}^3} - \frac{3}{r_{ij}^3}\cdot\frac{(\vec{\mu}_i\vec{r}_{ij})}{r_{ij}}\cdot\frac{(\vec{\mu}_j\vec{r}_{ij})}{r_{ij}}. \qquad (5)$$

Анизотропия, предписываемая формулой 1, приводит, в частности, к тому, что для тела с резко различающимися геометрическими параметрами направления легкого намагничивания часто определяются не магнитокристаллической анизотропией, а формой образца – *анизотропией*

формы. Так, для тонкой пластинки оси легкого намагничивания лежат, как правило, в плоскости пластинки, а для длинного стержня − ось лёгкого намагничивания параллельна оси стержня.

Доменная структура магнетиков

Именно анизотропные вклады отвечают за то, что магнитоупорядоченный образец ферро- или ферримагнетика самопроизвольно разбивается на области с разнонаправленной намагниченностью – так называемые *магнитные домены*. При этом ситуации «размагниченного» образца соответствует картина, когда внутри каждого домена имеется магнитное упорядочение, а суммарная намагниченность всех доменов равна нулю (рис. 2).

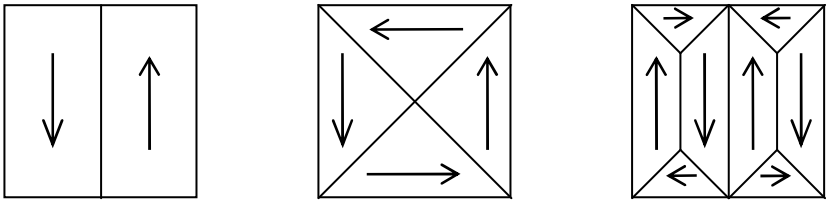


Рисунок 2. Примеры различной доменной структуры

Энергия диполь-дипольного взаимодействия $U_{\text{d-d}}$ для двух атомных магнитных моментов на несколько порядков меньше энергии обменного взаимодействия. Однако, если $U^{\text{обм}}$ существенна только для ближайших соседей, то $U_{\text{d-d}}$ убывает с расстоянием гораздо медленнее и в выражении

$$U^{\text{мс}} = \sum_{i \neq j} (U_{d-d})_{ij} \qquad (6)$$

следует учитывать все магнитные диполи кристалла.

Как следует из формулы 5, энергия $U_{\text{d-d}} < 0$ если магнитные моменты антипараллельны. В то же время, обменное взаимодействие стремится выстроить магнитные моменты соседних атомов параллельно. В результате энергетически выгодным оказывается разбиение на домены, направление намагниченности в которых для монокристаллов обычно совпадает с осью (осями) лёгкого намагничивания. Домены разделяются *доменными границами* − областями, в которых происходит поворот магнитных моментов от направления намагниченности в данном домене к направлению намагниченности в соседнем домене (рис. 3).

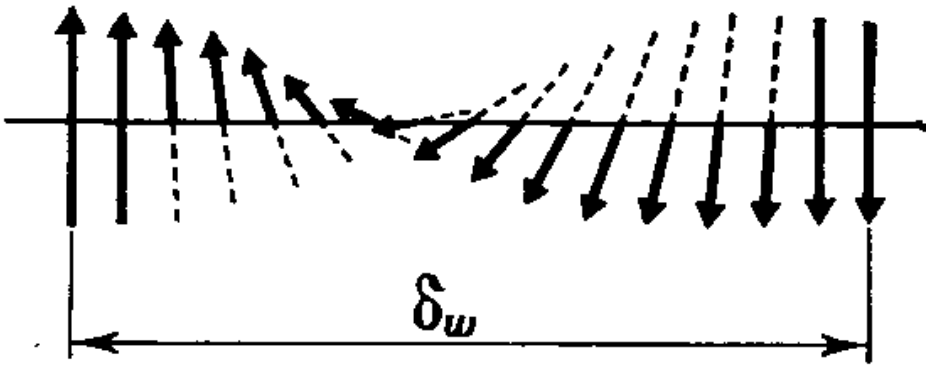


Рисунок 3. Модель 180°-ной доменной границы [1]

В области доменной границы (ДГ) обменная энергия зависит от радиуса-вектора $\vec{r}$ (от угла поворота спинов относительно друг друга φ). Для пары соседних спинов энергия обменного взаимодействия составит

$$U^{\text{îáì}} = -2JS^2\cos\varphi \approx -2JS^2(1-\frac{\varphi^2}{2}) \approx -2JS^2 + JS^2\varphi^2 \qquad (7)$$

(где J – обменный интеграл, S – спин), т.е. возрастет на $JS^2\varphi^2$ по сравнению с энергией, отвечающей коллинеарной ориентации спинов. В области доменной границы возрастет и магнитокристаллическая энергия $U^{\text{мк}}$, т. к. магнитные моменты отклоняются от оси лёгкого намагничивания. Но если для энергии обменного взаимодействия $U^{\text{обм}}$ более выгодным является уменьшение угла φ, т.е расширение доменной границы, то анизотропия стремится уменьшить толщину этой границы. В результате конкуренции сильного, но короткодействующего обменного взаимодействия и слабых, но дальнодействующих анизотропных вкладов в магнитную энергию установится равновесная толщина ДГ:

$$\delta_W = q\left(\frac{A}{K}\right)^{1/2}, \qquad (8)$$

где $A = A'\left(\frac{M}{M_0}\right)^2$, $A' = \frac{kT_{\text{Ñ}}}{a}$ − эффективная константа обменного взаимодействия, a − постоянная решетки, K − константа анизотропии, M_0 − намагниченность насыщения при T = 0, T_C − температура Кюри. Множитель q зависит от типа границы. Так, для 180°-ной ДГ в железе q = 11, для 90°-ной ДГ q = 3. Расчет по формуле 8 для 180° ДГ в железе дает величину $\delta_W = 3\cdot 10^{-5}$ см, т е. доменная граница содержит приблизительно 1 000 атомных плоскостей.

Естественно, что и сами домены не могут иметь сколь угодно малые размеры. Можно показать, что размеры доменов не могут быть меньше

$$d_{\text{крит}} = \frac{9}{2\pi} \cdot \frac{\sigma_W}{M_S^2}, \qquad (9)$$

где M_S − намагниченность насыщения, $\sigma_W = p(AK)^{1/2}$ − плотность энергии на единицу площади доменной границы. Коэффициент p равен 2 для 180° ДГ и 1 для 90° ДГ. Если размеры магнитной частицы $d < d_{\text{крит}}$, то она будет состоять из одного домена.

Намагничивание и перемагничивание

Процесс намагничивания внешним полем H предварительно размагниченного многодоменного образца проходит в несколько стадий: обратимое смещение доменных границ (I); необратимое смещение ДГ (II); обратимое вращение вектора намагниченности (III); необратимое вращение вектора намагниченности (IV); парапроцесс (V).

На зависимости $M(H)$ (рис. 4) схематически показаны диапазоны полей, в которых преимущественно реализуется одна из стадий процесса намагничивания. Рассмотрим их подробнее.

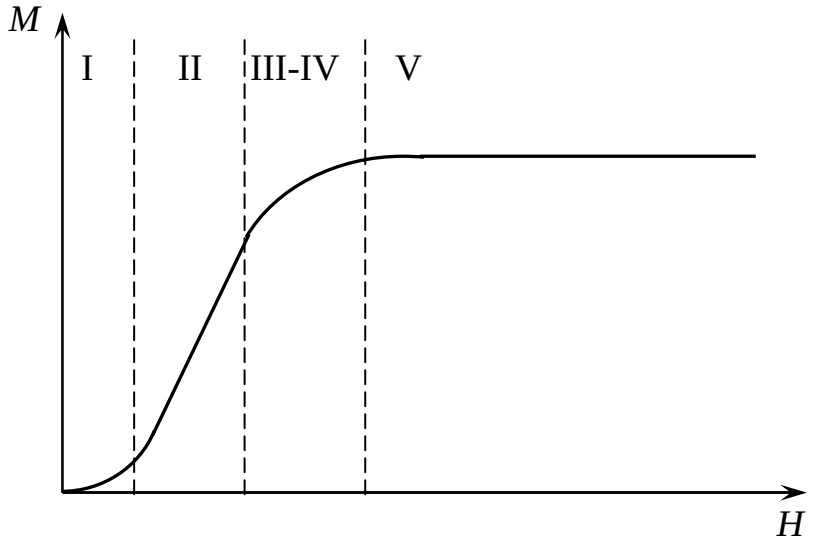


Рисунок 4. Кривая начального намагничивания типичного поликристаллического ферромагнетика

Пусть в образце имеются только два домена со 180° ДГ между ними (рис. 5). Объемы доменов равны $V_1 = V_2 = V$, т.е. в отсутствие внешнего поля образец размагничен ($M = 0$).

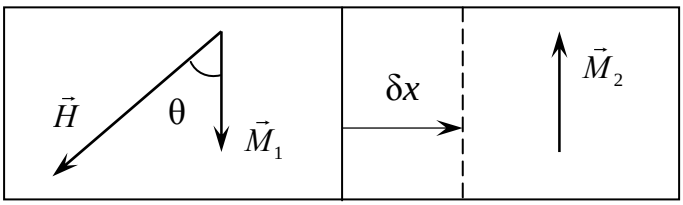


Рисунок 5. Граница, разделяющая два домена

При наложении внешнего поля H будет расти объем того домена, направление намагниченности в котором составляет с полем меньший угол, т.е. доменная граница передвинется вправо на δx. Условие устойчивости нового положения границы запишется как

$$\delta U_{\text{уст}} = \delta(U + U_H) = 0, \qquad (10)$$

где U − энергия всех внутренних магнитных взаимодействий, U_H − энергия взаимодействий магнетика с внешним полем:

$$\delta U_H = -(\vec{M}_1 - \vec{M}_2)\vec{H}S\delta x = -\left[M_S H\cos\theta - M_S H\cos(\pi-\theta)\right]S\delta x, \qquad (11)$$

M_S − намагниченность насыщения, θ – угол между векторами $\vec{M}$ и $\vec{H}$, S − площадь ДГ.

Из (10) и (11) получим:

$$\delta U = -\,\delta U_H = 2\,M_S H\,(\cos\theta)\,S\,\delta x. \qquad (12)$$

Отсюда поле $H(x)$, при котором положение доменной границы в x является равновесным:

$$H(x) = \frac{\partial U}{\partial x}\cdot\frac{1}{2M_S S\cos\theta}. \qquad (13)$$

Смещение ДГ на величину δx вызовет появление намагниченности у образца

$$\delta M = 2M_S(\cos\theta)\frac{\delta V}{V} = \frac{2M_S(\cos\theta)S\delta x}{V}. \qquad (14)$$

Из (13) и (14) получим для магнитной восприимчивости

$$\chi = \frac{\partial M}{\partial H} = \frac{(2M_S\,S\cos\theta)^2}{V\dfrac{\partial^2 U}{\partial x^2}}. \qquad (15)$$

В области <u>*обратимых смещений*</u> ДГ действует квазиупругая сила, стремящаяся вернуть границу в первоначальное положение, и зависимость $U(x)$ можно записать в виде

$$U(x) = \gamma x^2, \qquad (16)$$

где γ – константа. Тогда для <u>*начальной восприимчивости*</u> − магнитной восприимчивости в области обратимых смещений ДГ, получим

$$\chi = \frac{2(M_S\ S\cos\theta)^2}{\gamma V} \qquad (17)$$

Выражение (17) справедливо для очень малых внешних полей H или для идеального кристалла. В реальных кристаллах из-за наличия дефектов структуры, таких, как примесные атомы, пустые узлы (вакансии) кристаллической решетки, дислокации, трещины, включения другой фазы и т.п., зависимость $U(x)$ будет иметь сложный характер. Это приведет к *необратимым смещениям* ДГ.

Пусть в начальный момент при $H = 0$ доменная граница находится в точке x_0 (рис.6). Пока поле невелико, смещение границы не превышает величину x_1, и после снятия поля граница возвращается в x_0. Но если смещение превысит x_1, она скачком переместится в точку x_3, а после уменьшения поля до нуля уже не вернется в точку x_0, а окажется «закрепленной» в точке x_2. Таким образом, в области необратимых смещений доменных границ намагничивание и перемагничивание осуществляется скачками (скачки Баркгаузена). Экспериментально установлено, что среднее значение объема, перемагничиваемого за один скачок, составляет приблизительно 10^{-9} см^3. Магнитная восприимчивость на этом участке имеет максимальную величину (область II на рис. 4).

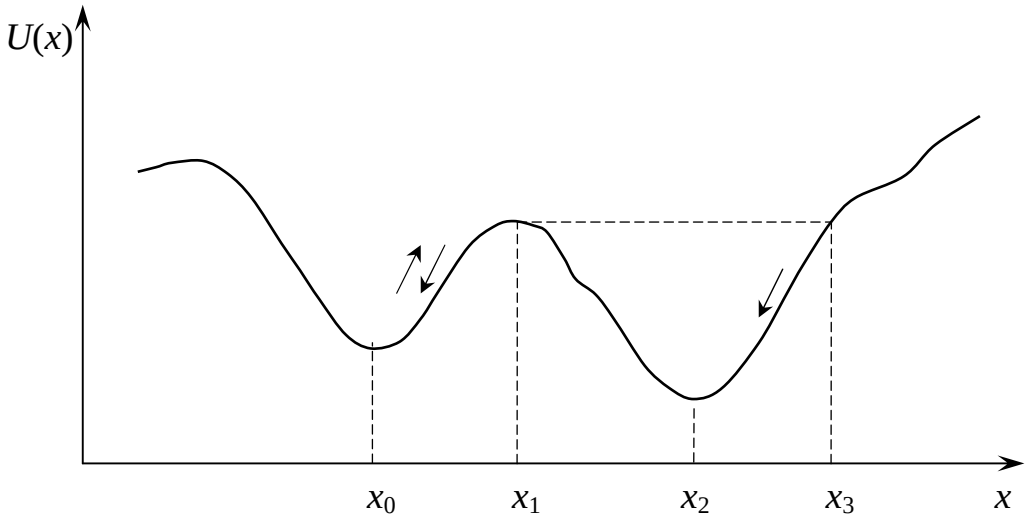


Рисунок 6. Иллюстрация обратимых смещений доменной стенки и скачков Баркгаузена

Когда все процессы смещения ДГ закончатся, образец будет представлять один домен, направление намагниченности которого совпадает с ближайшей к направлению внешнего поля осью лёгкого намагничивания. Дальнейшее намагничивание происходит путем

вращения вектора намагниченности от оси лёгкого намагничивания к направлению поля. Процессы вращения вектора намагниченности также могут быть обратимыми и необратимыми. Проиллюстрируем это на простейшем примере кристалла с одноосной анизотропией (к таким кристаллам относятся, например, гексаферриты).

Пусть угол между направлением оси лёгкого намагничивания − оси $\vec{H}_{\text{A}}$ и внешним полем равен α, а угол между $\vec{M}$ и $\vec{H}_{\text{A}}$ равен θ (рис. 7), K − константа анизотропии. Тогда полная энергия намагниченного образца будет равна

$$U = K\cos^2\theta + M_S H\cos(\alpha-\theta). \qquad (18)$$

Равновесное значение угла $\theta = \theta_0$ находится из условий

$$\frac{\partial U}{\partial\theta} = 0; \qquad \left.\frac{\partial^2 U}{\partial\theta^2}\right|_{\theta=\theta_0} > 0. \qquad (19)$$

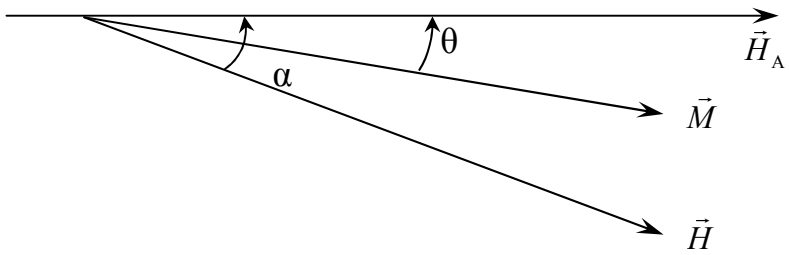


Рисунок 7. Отсчет углов относительно оси легкого намагничивания

Если α = 90°, то из (18) и (19) для равновесного угла получим

$$\sin\theta_0 = \frac{M_S H}{2K},$$

а для восприимчивости:

$$\chi = \frac{M}{\mu_0 H} = \frac{M_S \sin\theta}{\mu_0 H} = \frac{M_S^2}{2K\mu_0} = \frac{M_S}{H_{\text{A}}}, \qquad (20)$$

где введено обозначение: $H_{\text{A}} = 2K\mu_0 / M_S$ − т. н. <u>*поле анизотропии*</u>. Из (20) следует, что восприимчивость χ не зависит от внешнего поля при $H < H_{\text{A}}$. В полях $H > H_{\text{A}}$ направление намагниченности совпадает с полем (θ = α = 90°), кристалл намагничен до насыщения и значит χ = 0 (рис. 8 *а*).

При поле H, направленном против оси лёгкого намагничивания (α = 180°) существуют два устойчивых решения для θ: θ = 0 и θ = 180°. В полях $H > H_{\text{A}}$ намагниченность параллельна внешнему полю и антипараллельна полю анизотропии, а восприимчивость равна нулю. При уменьшении поля вектор $\vec{M}$ скачком поворачивается в направлении поля анизотропии, т. е. будет реализовываться зависимость $M(H)$

гистерезисного вида (рис. 8.5, *б*).

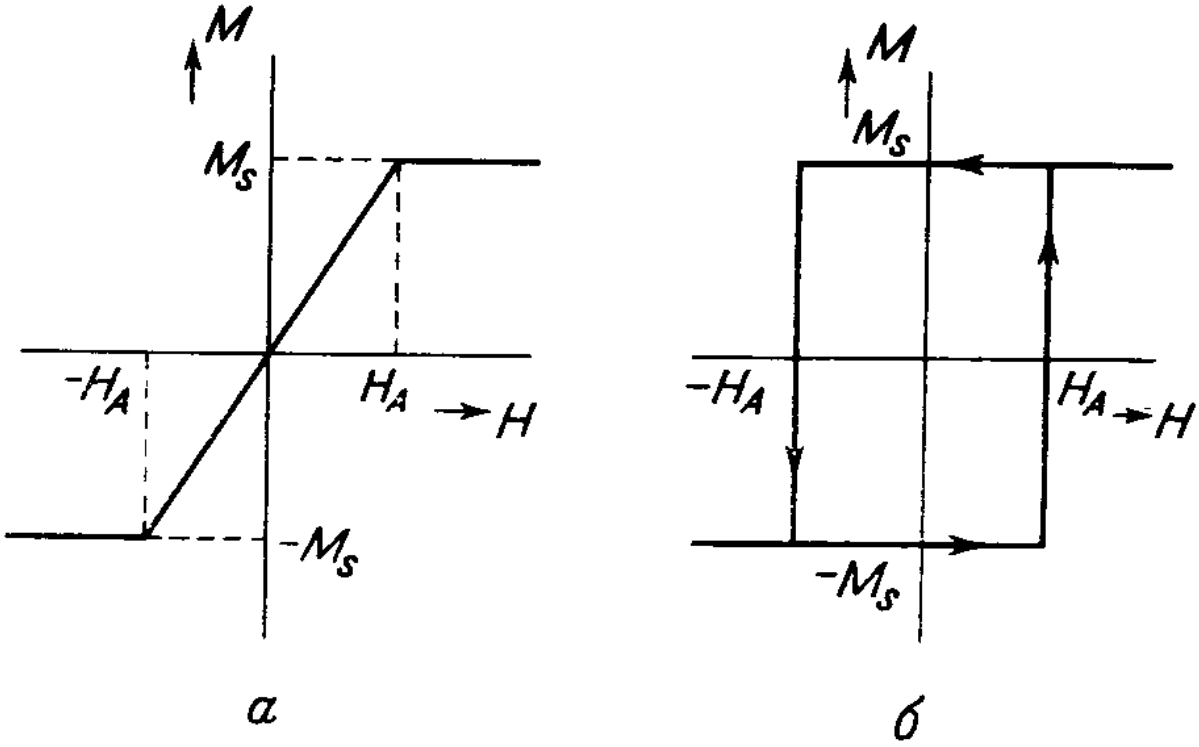


Рисунок 8. Кривые намагничивания, осуществляющегося путем вращения вектора намагниченности, для одноосного кристалла при α = 90° (*а*) и α = 180° (*б*) [1]

В реальных кристаллах, анизотропия которых отличается от одноосной и существуют локальные неоднородности поля анизотропии, процессы перемагничивания вращением не удается описать столь просто и приходится прибегать к численным расчетам.

На стадии *парапроцесса* внешнее магнитное поле, так же как в парамагнетике, конкурирует с тепловым движением атомов, стремящимся нарушить коллинеарность их магнитных моментов. Восприимчивость на этом участке кривой намагниченности на несколько порядков меньше восприимчивости на других участках зависимости $M(H)$.

Подводя итог вышесказанному, можно сформулировать несколько основных выводов:

− в отсутствие внешнего поля намагниченность ферро- и ферримагнетиков, как правило, не достигает своего предельного значения − намагниченности насыщения M_S . Это обусловлено разбиением намагниченного образца на области с разно ориентированной намагниченностью – домены;

− процесс технического намагничивания и перемагничивания осуществляется как посредством роста одних доменов за счет других, так и путем вращения вектора намагниченности;

− процессы смещения доменных границ и процессы вращения вектора намагниченности могут быть обратимыми и необратимыми. Следствием необратимости процессов является магнитный гистерезис.

Контрольные вопросы

1. Опишите процессы, происходящие в ферромагнитных материалах при их перемагничивании, в соответствии с кривыми намагничивания. Охарактеризуйте типы кривых намагничивания.
2. Назовите параметры петли гистерезиса и другие параметры, характеризующие магнитные свойства материалов?
3. Поясните различия между магнитомягкими и магнитотвердыми ферромагнитными материалами. Приведите примеры данных материалов.
4. Назовите виды потерь на перемагничивание в ферромагнитных материалах?
5. Приведите примеры областей применения ферромагнитных материалов с различными свойствами.

Описание установки

Описание устройства стенда

Аппаратная часть стенда состоит из персонального компьютера (ПК) и измерительного блока (ИБ), к которому подключаются магнитные преобразователи (МП), представляющие собой кольцевые образцы магнитомягких материалов с намагничивающей и измерительной обмотками. Измерительный блок включает в себя усилитель намагничивания (УН) и интегрирующий усилитель (ИУ), которые используются, соответственно, для формирования напряженности магнитного поля и преобразования сигнала магнитной индукции в образце, а также микропроцессорное устройство контроллера. Управление измерительным блоком и обработка измерительной информации производится персональным компьютером, подключаемым к измерительному блоку с помощью интерфейсного модуля через порт USB. Внешний вид стенда представлен на рисунке 9. Образцы исследуемых материалов подключаются к ИБ через гнезда, установленные на передней панели блока.

Рисунок 9. Внешний вид автоматизированного лабораторного стенда

Структурная схема измерений и расчетные соотношения

Структурная схема измерений представлена на рисунке 10.

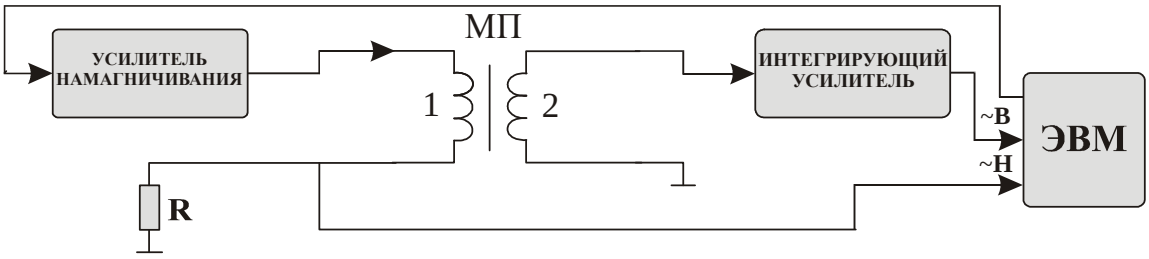


Рисунок 10. Структурная схема измерений

Согласно схеме измерений звуковой генератор вырабатывает синусоидальное напряжение в диапазоне частот 10–2000 Гц. Переменное напряжение поступает на вход УН, к выходу которого подключена намагничивающая обмотка МП. МП представляет собой образец исследуемого магнитного материала в форме кольца с намотанными на него двумя обмотками: намагничивающей обмоткой 1 и измерительной обмоткой 2.

Напряженность магнитного поля в материале определяется током I в намагничивающей обмотке по формуле:

$$H = In, \tag{21}$$

где n – плотность витков обмотки 1 (количество витков /м)

$$n = \frac{w_1}{L},$$

w_1 – количество витков обмотки 1, L – длина магнитопровода. Величина тока намагничивания определяется по значению падения напряжения U_H на измерительном резисторе R_1 (R_1 = 1,5 Ом), который включается последовательно с обмоткой 1, т. е.

$$I = \frac{U_H}{R_1}. \tag{22}$$

Напряжение с измерительного резистора подается на один из входов АЦП контроллера. Амплитуда и частота напряженности поля устанавливается программно с помощью элементов регулировки программного интерфейса.

Электродвижущая сила (ЭДС), наводимая в измерительной обмотке 2 образца (МП), пропорциональна производной от индукции магнитного поля B в исследуемом образце. Напряжение обмотки 2 интегрируется ИУ, на выходе которого напряжение измерительного сигнала пропорционально уже непосредственно B. Напряжение с выхода ИУ

подается на второй вход АЦП. Таким образом, в ПК поступает информация о напряженности H, индукции B магнитного поля в исследуемом образце и их частоте, на основании которой осуществляется построение кривых намагничивания и расчет всех магнитных параметров материалов.

Для расчета индукции по сигналу напряжения на выходе интегратора воспользуемся следующими формулами.

ЭДС, наводимая в измерительной обмотке 2:

$$\varepsilon(t) = w_2 \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt}, \tag{23}$$

где w_2 – число витков в измерительной обмотке 2, Ф – магнитный поток.

Выразив магнитный поток через индукцию, получим сигнал на выходе интегратора:

$$U_B(t) = \frac{1}{\tau}\int \varepsilon(t)dt = \frac{w_2 \cdot S}{\tau}\int \frac{dB(t)}{dt}dt = \frac{w_2 \cdot B(t) \cdot S}{\tau}, \tag{24}$$

где S – площадь сечения магнитопровода; τ – постоянная времени интегратора:

$$\tau = R_i C_i. \tag{25}$$

Следовательно, индукция будет определяться:

$$B = \frac{\tau}{w_2 \cdot S} \cdot U_B. \tag{26}$$

Описание интерфейса пользователя

Основное окно программы

Программа общения с пользователем организована как работа за классическим измерительным стендом, оснащенным различными источниками воздействия и регистрирующими измерительными приборами. Можно сказать, что эти устройства реально реализованы в измерительном блоке, но не имеют отдельных корпусов и индицирующих устройств. Последние представлены только на экране компьютера (рис. 11).

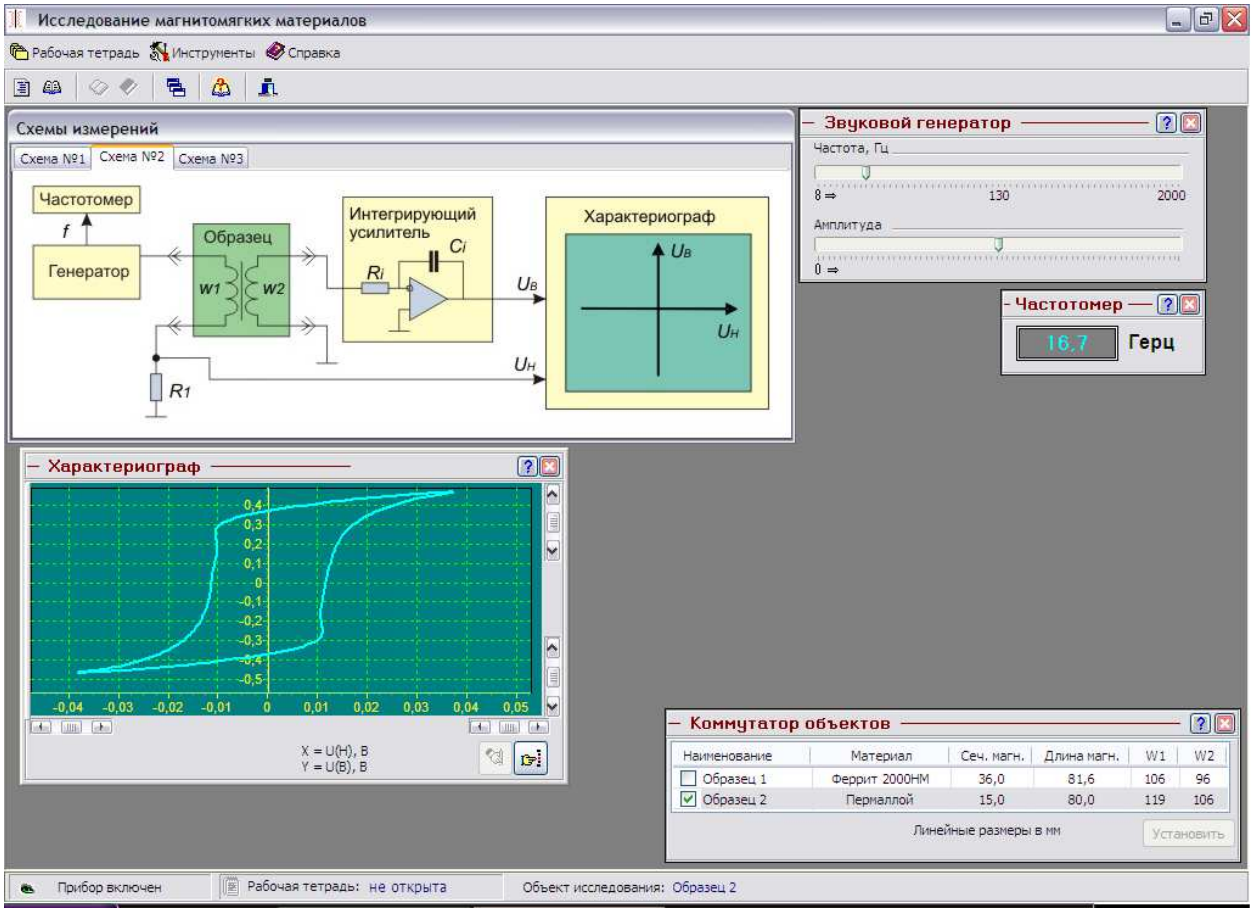


Рисунок 11. Основное окно приложения

Программное обеспечение построено по принципу многооконного интерфейса. Центральное место занимает окно с упрощенными схемами измерений, которые реализованы в реальном измерительном блоке. Таких схем может быть три.

Схемы измерений

Окно «Схемы измерений» предоставляет возможность выбора схемы измерений, которая реализована в автоматизированном стенде. Выбор осуществляется при помощи ярлычков, расположенных в верхней части окна (рис. 12). Всего схем существует три.

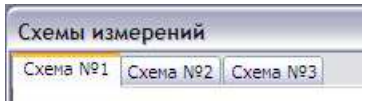


Рисунок 12. Переключение между схемами измерений

Схема измерений № 1 (рис. 13) предназначена для проведения измерений формы сигналов, пропорциональных напряженности и индукции магнитного поля. Напряжение, пропорциональное индукции, получается при помощи специального интегрирующего усилителя. Характериограф здесь двухканальный, поэтому видно сразу два сигнала. Изменить амплитуду и частоту можно с помощью звукового генератора. Обратите внимание, при изменении частоты изменяется масштаб оси времени характериографа.

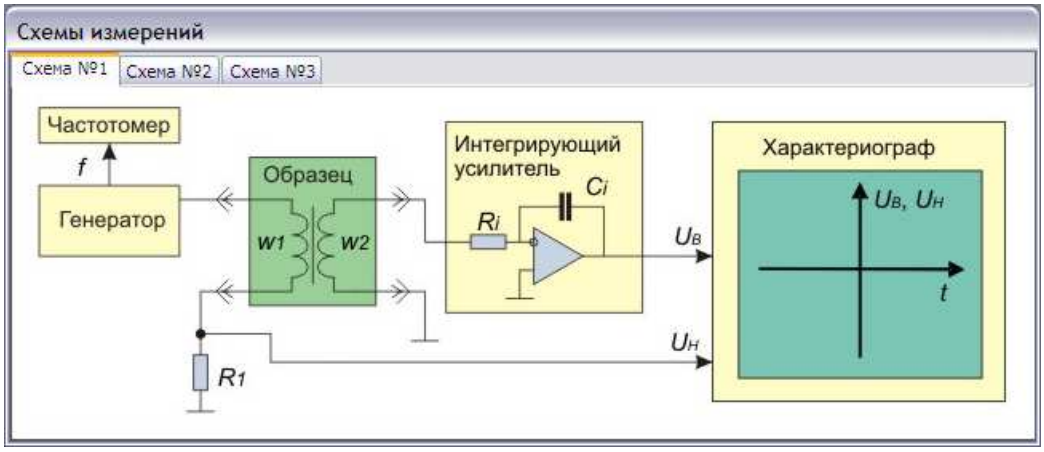


Рисунок 13. Схема измерений № 1

Назначение элементов схемы:

– звуковой генератор – формирует синусоидальное напряжение с частотой от 10 до 2000 Гц;

– образец (коммутатор объектов) – отражает информацию об объекте исследования;

– характериограф – отображает зависимость напряжений, пропорциональных напряженности и индукции магнитного поля, от времени;

– частотомер –измеряет частоту сигнала, подаваемого на образец.

При наведении курсора на элемент схемы, он меняет свое очертание со стандартной «стрелки» на «указывающую руку». Если теперь нажать на левую кнопку «мыши», соответствующий инструмент становится видимым.

Примечание. Даже если регистрирующий инструмент невидим, измерения все равно производятся и могут быть записаны в рабочую тетрадь при нажатии соответствующей кнопки в области управления рабочей тетрадью.

Схема измерений № 2 (рис. 14) предназначена для проведения измерений зависимости сигналов, пропорциональных напряженности *H* и индукции *B* магнитного поля, друг от друга. Напряжение, пропорциональное индукции, получается при помощи специального интегрирующего усилителя. На входы характериографа подается напряжение U_H, а на вертикальные – U_B, т. е. отображается петля гистерезиса. Изменить амплитуду и частоту можно с помощью звукового генератора.

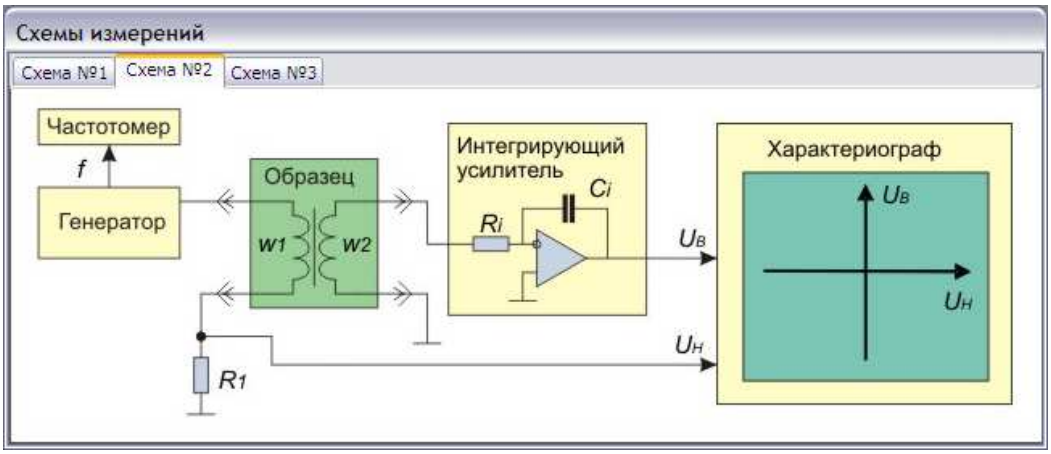


Рисунок 14. Схема измерений № 2

На схеме присутствуют те же элементы, что и в схеме 1: звуковой генератор, образец, характериограф, частотомер.

Схема измерений № 3 (рис. 15) предназначена для проведения измерений точек основной кривой намагничивания.

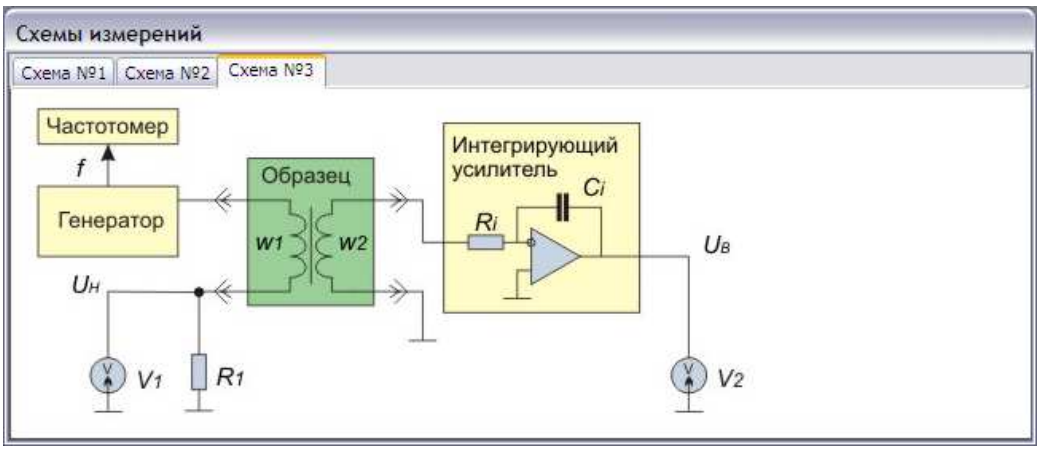


Рисунок 15. Схема измерений № 3

Вместо характериографа на схеме имеются два пиковых вольтметра: $V1$ и $V2$. Первый из них предназначен для измерения амплитудного значения напряжения, пропорционального напряженности магнитного поля в образце, второй – для измерения амплитудного значения напряжения, пропорционального индукции магнитного поля в образце.

Управляющие и регистрирующие инструменты

На каждой измерительной схеме присутствует свой набор инструментов. Их можно разделить на *управляющие* и *регистрирующие*.

Управляющие инструменты – это инструменты, связанные с источниками воздействия.

Звуковой генератор. Предназначен для формирования синусоидального напряжения с частотой от 10 до 2000 Гц (рис. 16).

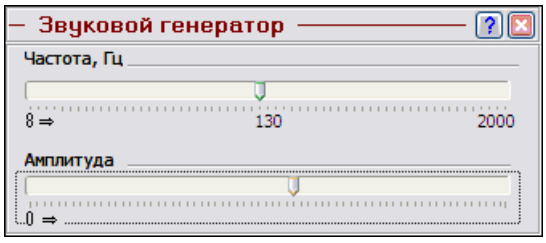


Рисунок 16. Звуковой генератор

Амплитуда и частота изменяется при помощи ползунка. Передвигать ползунок можно либо с помощью «мыши» (нажав на левую кнопку и, не отпуская кнопку, перемещая «мышь»), либо с помощью стрелок на клавиатуре.

Как амплитуда, так и частота сигнала устанавливается дискретно, поэтому выставить очень точное значение не получится. Например, вместо частоты 100 Гц можно установить либо 96,3 либо 103,9 Гц.

Образец (коммутатор объектов) предназначен для отражения информации об объекте исследования (рис. 17). Также позволяет переключить образцы в измерительном стенде (зависит от реализации измерительного блока).

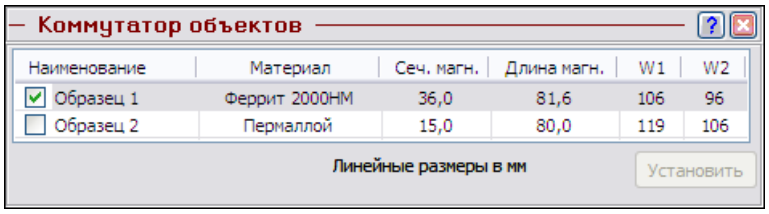


Рисунок 17. Коммутатор объектов

Регистрирующие инструменты – это измерительные приборы, которые представляют измеренные данные.

Вольтметр. Измеряет амплитудное значение переменного сигнала (рис. 18). На схеме имеются два вольтметра: $V1$ и $V2$. Первый из них предназначен для измерения амплитудного значения напряжения, пропорционального напряженности магнитного поля в образце, второй – для измерения амплитудного значения напряжения, пропорционального индукции магнитного поля в образце.

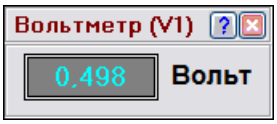


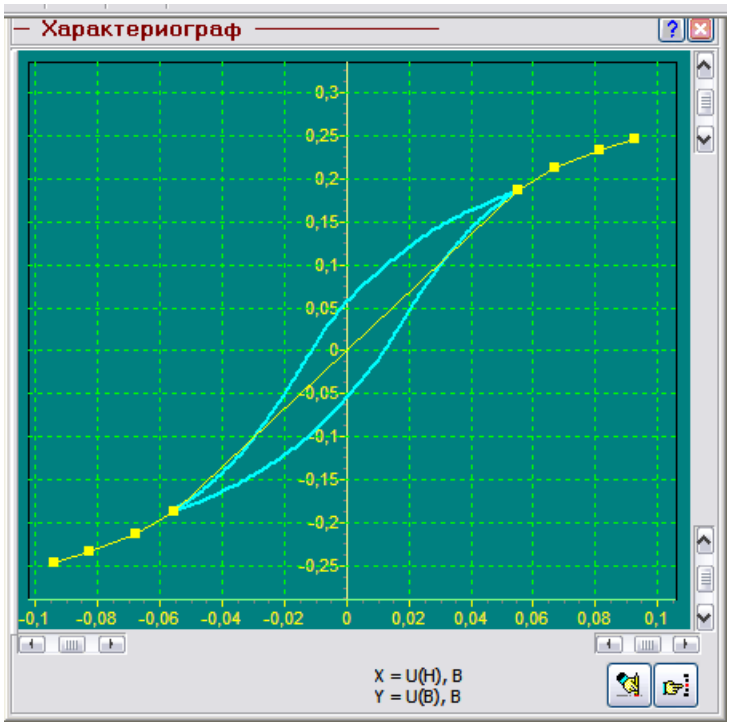
Рисунок 18. Вольтметр

Оба прибора совершенно одинаковы. Предел измерений всегда постоянный и равен 10 В.

При перегрузке прибора цвет индикатора изменяется на красный.

Характериограф. Предназначен для измерения зависимости напряжений, пропорциональных напряженности и индукции магнитного поля. В зависимости от схемы измерений, характериограф отражает либо зависимость сигналов от времени, либо зависимость сигналов друг от друга (петля гистерезиса).

Если размер экрана характериографа слишком мал, а требуется рассмотреть характеристику более внимательно, можно изменить размеры окна стандартным для *Windows* способом, т.е. подвести курсор «мыши» к любому краю окна и, когда он измениться на двухсторонние стрелки, изменить размеры (рис. 19).



а *б*

Рисунок 19. Изменение размера характериографа: *а* – изменение размера, *б* – вид характериографа

При перегрузке прибора цвет кривой изменяется на красный.

Обратите внимание, что при записи данных, в отличие от всех других регистрирующих инструментов, записываться будут сразу несколько строк значений.

В правом нижнем углу приборной панели имеются две кнопки: и ( ). Эти кнопки предназначены для того, чтобы зафиксировать на экране и (стереть) координаты вершины петли гистерезиса. Уменьшая амплитуду сигнала генератора фиксируйте предельные точки частных петель гистерезиса. Чем с меньшим шагом будете уменьшать амплитуду, тем больше будет точек, и тем более точно получается основная кривая. Зафиксируйте точку при нулевой амплитуде сигнала, чтобы кривая начиналась из начала координат.

Внимание: при записи характеристики в *рабочую тетрадь*, записывается кривая, которая строилась по точкам частных петель гистерезиса, т. е кривая желтого цвета. При стирании стираются *все* точки и построенная кривая.

Частотомер. Измеряет частоту переменного сигнала (рис. 20).

Нужно иметь в виду, что частота устанавливается дискретно, поэтому выставить очень точное значение не получится.

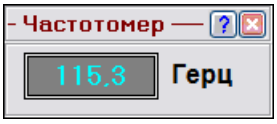


Рисунок 20. Частотомер

Рабочая тетрадь

Непременным атрибутом при работе за классическим измерительным стендом является *рабочая тетрадь*, в которую экспериментатор заносит показания приборов. В программе эта возможность также реализована. Рабочая тетрадь открывается в отдельном окне с помощью команд меню или кнопок панели управления.

Этот элемент управления предназначен для ведения текущих записей результатов измерений, расчетов, построенных на полученных результатах, и построения графиков. Рабочая тетрадь состоит из трех связанных частей:

– таблицы – в ней сосредоточены значения измеряемых величин и результаты расчетов, полученных из измеренных данных;

– формулы – здесь располагаются формулы, необходимые для расчетов; их можно добавлять, удалять и редактировать;

– графики – здесь сосредоточены графики, построенные как по измеренным данным, так и по результатам расчетов; их также можно добавлять, удалять и редактировать.

Переключаться между частями рабочей тетради можно при помощи ярлычков, расположенных в верхней части окна (рисунок 21).

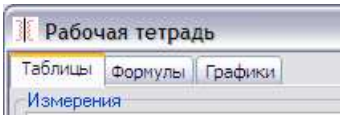


Рисунок 21. Переключение между частями рабочей тетради

Таблицы. В этой части рабочей тетради в первую очередь представлены значения измеряемых величин и расчетных величин (*H* на рис. 22), полученных на основе измеряемых. Эти значения оформлены в виде таблицы, расположенной в нижней части окна. Изменить эти данные нельзя, их можно только просматривать. Одна таблица соответствует одному *измерению*. Под *измерением* понимается один эксперимент, в котором получены одна или несколько строк с данными, позволяющими

рассчитать нужные Вам величины или построить нужные Вам зависимости.

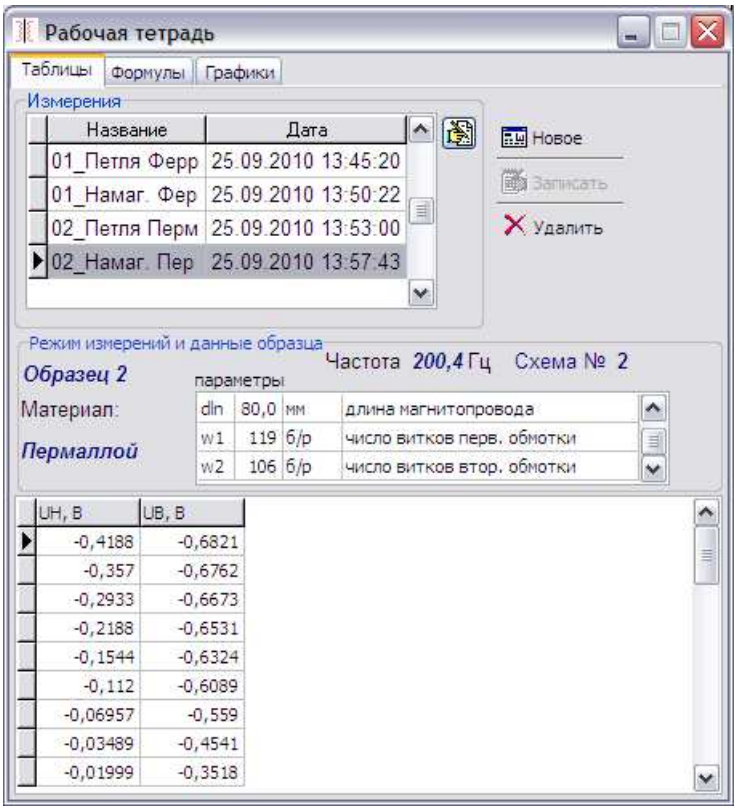


Рисунок 22. Рабочая тетрадь, вкладка «Таблицы»

Выше таблицы с результатами располагается информационная область, в которой представлены:

– номер схемы измерений, с помощью которой получены экспериментальные данные;

– частота, на которой было проведено измерение;

– название объекта исследований; материал, из которого он изготовлен;

– параметры объекта исследований.

В левой верхней части окна рабочей тетради имеется таблица с названием измерения и датой его проведения. С помощью «мыши» или стрелок клавиатуры можно перемещаться по уже имеющимся результатам. При этом в таблице результатов показываются измеренные и рассчитанные данные выбранного измерения.

Кнопка позволяет редактировать название измерения. При нажатии на нее появляется строка ввода с названием и с кнопкой (рис. 23). После исправления названия необходимо нажать кнопку и результат перепишется в таблицу, а строка ввода пропадет.

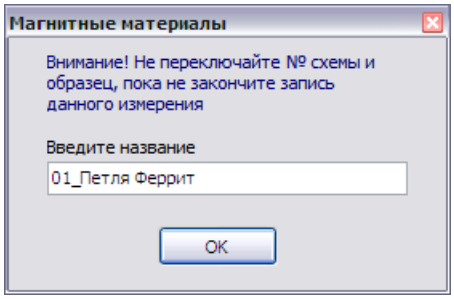


Рисунок 23. Редактирование названия измерения

В правой верхней части окна рабочей тетради находится панель управления измерениями (см. рис. 22). Кнопки панели управления реализуют следующие команды:

Новое – открывает новое измерение. В таблице появляется новая запись с названием по умолчанию и датой проведения измерения и включается режим редактирования названия – появляется строка ввода с названием, а кнопка переходит в запрещенное состояние. Обратите внимание, кнопка *Записать* доступна только при окончании редактирования названия измерений.

Записать – записывает одну (или несколько, если включен характериограф) строк данных в таблицу рабочей тетради. Можно ограничиться записью одной строки и воспользоваться построителем выражений для расчетов. При переходе к другой части рабочей тетради («Формулы» или «Графики»), заканчивается запись данных в таблицу и запрещается кнопка *Записать*. Аналогичный эффект наблюдается при перемещении на другое измерение.

Удалить – удаляет все измерение вместе со связанными с ним формулами и графиками.

Формулы. В этой части рабочей тетради в первую очередь представлены выражения, с помощью которых производятся расчеты (рис. 24). Выражения строятся на основе измеренных данных и уже существующих выражений. Список всех формул, доступных в данном *измерении*, располагается в центральной части окна рабочей тетради.

В первой колонке списка отображаются *идентификаторы*, которые могут быть использованы при построении новых выражений. Во второй колонке представлены собственно выражения, в третьей – результат расчета, в четвертой – размерность и в пятой – комментарии, позволяющие пояснить назначение данного выражения. Если

идентификатор представляет собой экспериментальное значение, вместо выражения во второй колонке стоит слово «измерение».

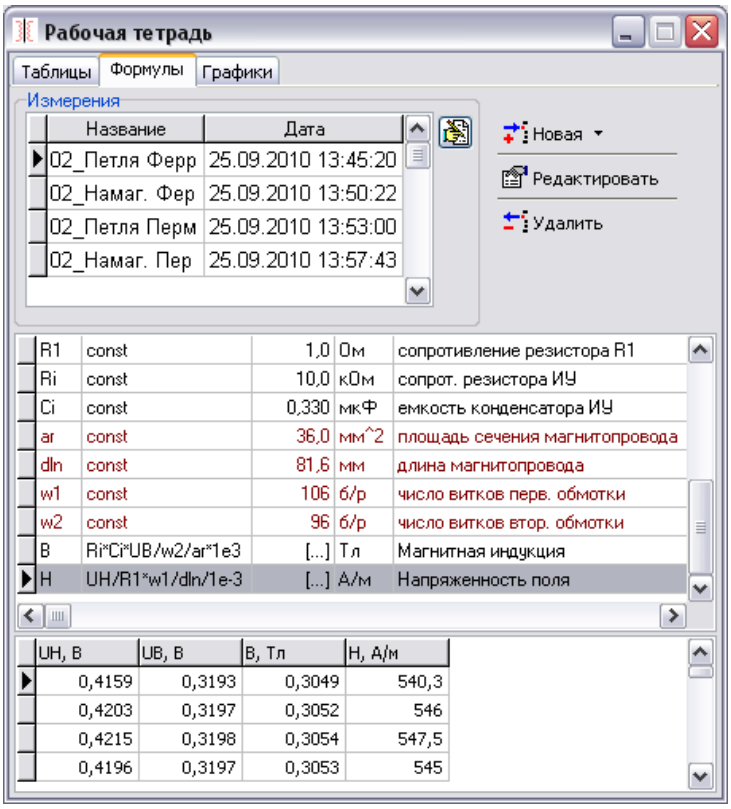


Рисунок 24. Рабочая тетрадь, вкладка «Формулы»

Зеленым цветом выделены измеренные значения, коричневым – параметры образцов. Эти выражения изменить нельзя.

Графики. В этой части рабочей тетради представлены графики, построенные как по измеренным данным, так и по результатам расчетов (рис. 26). Каждый график может быть либо одной кривой, либо семейством кривых, зависящих от параметра.

В верхней части окна расположена область управления, позволяющая просматривать, добавлять, удалять и редактировать графики. В левой части области имеется таблица с названием графика. Именно это название будет отображаться в качестве заголовка. С помощью «мыши» или стрелок клавиатуры можно перемещаться по уже имеющимся графикам. При этом они отображаются в области построения.

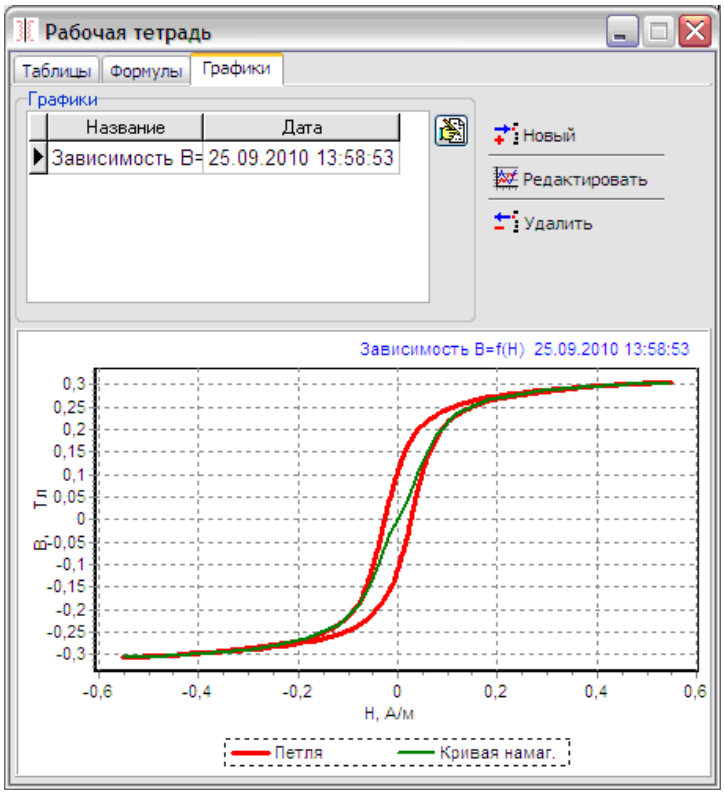


Рисунок 26. Рабочая тетрадь, вкладка «Графики»

При редактировании или построении нового графика, открывается диалоговое окно, которое показано на рисунке 27. Каждый график может быть либо одной кривой, либо семейством кривых, зависящих от параметра. В левой верхней части окна имеется таблица, где перечислены кривые графика. Здесь же можно добавить, удалить кривую или изменить ее название. Правее группы «Кривые» расположена группа управляющих элементов «Данные». В этой области окна назначаются данные для осей каждой кривой. С помощью выпадающих списков можно сопоставить каждой оси любую из колонок *таблицы* рабочей тетради. Обратите внимание – данные могут быть взяты из разных измерений. Также можно устанавливать логарифмический масштаб по любой из осей.

Внимание: при выборе логарифмического масштаба значения должны быть только положительными.

В нижней части окна располагаются элементы управления внешним видом графика. При изменении этих параметров результат сразу отражается в области построения графиков рабочей тетради.

Для изменения названий осей графика следует щелкнуть «мышкой» на области ввода названия оси. При этом появляется кнопка ☑ справа от

области ввода

. После нажатия на эту кнопку, название оси отразится на графике, а кнопка пропадет.

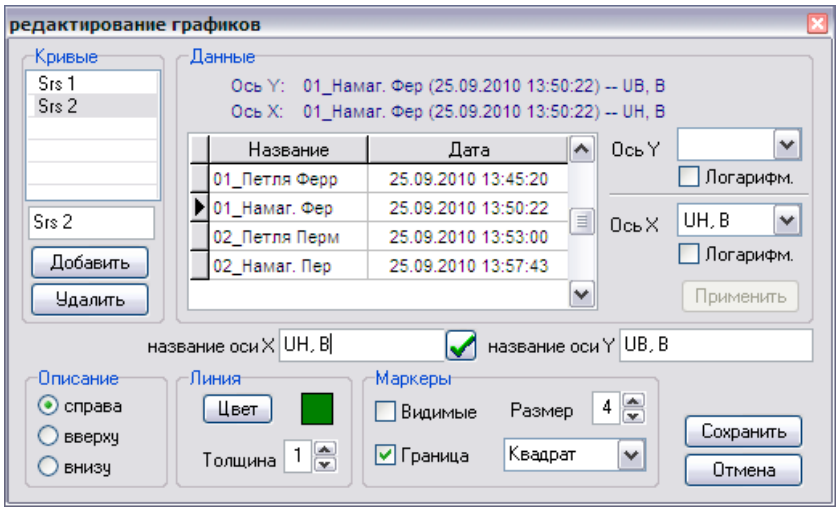
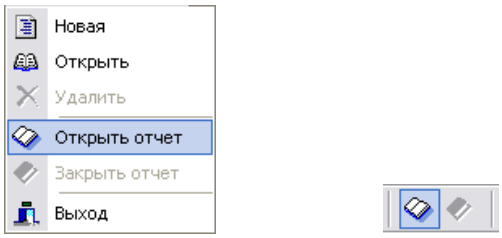


Рисунок 27. Редактирование графиков

Оформление отчета

При формировании отчета приложение интегрируется с текстовым редактором *MS WinWord*. Открыть отчет возможно только при открытой рабочей тетради, либо при помощи меню, либо при помощи кнопок на панели инструментов (рис. 28).



а *б*

Рисунок 28. Открытие отчета: *а* – меню; *б* – кнопки на панели инструментов

После выбора этой команды активизируется соответствующее приложение редактора с открытым файлом отчета, а на окнах приложения *MG_Stud.exe* появляются кнопки . Эти кнопки позволяют скопировать соответствующий элемент приложения в отчет (кнопки появляются в районе левого верхнего угла копируемого элемента (рис. 29)).

Нажатие на кнопку приводит к появлению в *отчете* соответствующего элемента. Переключение между отчетом и

приложением *MG_Stud.exe* легко осуществляется при помощи панели задач *Windows*
.

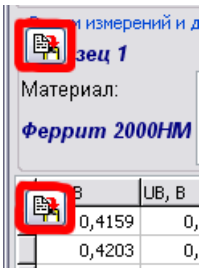


Рисунок 29. Кнопки копирования в окне рабочей тетради

При копировании графиков возможен выбор представления, в каком будут копироваться графики – в виде метафайла (*.*wmf*) или в виде растра (*.*bmp*) (рис. 30). Эта возможность реализована из главного меню *Инструменты – Параметры копирования*. Выбор представления зависит от возможностей Вашего принтера и определяется экспериментально.

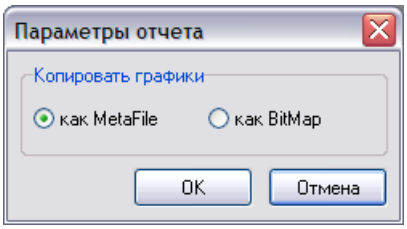


Рисунок 30. Окно выбора настроек копирования графической информации

После того, как отчет сформирован, его можно распечатать. Закрыть отчет можно с помощью команды меню или кнопки на панели инструментов (рис. 31).

а *б*

Рисунок 31. Закрытие отчета: *а* – команда в меню, *б* – кнопка на панели инструментов

После выбора этой команды закрывается соответствующее приложение редактора и пропадают кнопки на окнах лабораторной работы.

Выполнение работы

Измерение временных зависимостей напряженности поля и индукции

1. Преподаватель задает образец и частоту в интервале от 10 до 2000 Гц
2. Подключите исследуемый образец к передней панели измерительного блока.
3. Выберите схему измерения №1 и активизируйте все инструменты.
4. В окне коммутатора объектов выберите образец.
5. Установите частоту, заданную в п. 1 и максимальную амплитуду на звуковом генераторе.
6. Создайте новую рабочую тетрадь или откройте уже созданную вашу рабочую тетрадь.
7. Запишите полученные временные зависимости сигналов в рабочую тетрадь.
8. Установите минимальную амплитуду на звуковом генераторе и повторите п. 7.
9. Постройте графики полученных зависимостей и сравните их.
10. Сделать выводы о проделанной работе.

Определение намагниченности материалов

1. Преподаватель задает образец и частоту в интервале от 10 до 2000 Гц
2. Подключите исследуемый образец к передней панели измерительного блока.
3. Выберите схему измерения №2 и активизируйте все инструменты.
4. В окне коммутатора объектов выберите образец.
5. Установите частоту, заданную в п. 1, и максимальную амплитуду на звуковом генераторе.
6. Создайте новую рабочую тетрадь или откройте уже созданную вашу рабочую тетрадь.
7. Запишите полученную петлю в рабочую тетрадь.
8. Уменьшая амплитуду сигнала до нуля на звуковом генераторе фиксируйте предельные точки частных петель гистерезиса. Чем с меньшим шагом будете уменьшать амплитуду, тем больше будет точек, и тем более точно получается основная кривая. Зафиксируйте точку при

нулевой амплитуде сигнала, чтобы кривая начиналась из начала координат.

9. Запишите полученную кривую намагничивания в рабочую тетрадь.

10. Выполните перерасчет измеренных значений в магнитную индукцию и напряженность магнитного поля по формулам (26) и (21) соответственно.

11. Постройте на одном графике петлю гистерезиса и основную кривую намагничивания в координатах $B = f(H)$.

12. Определите значения параметров предельной петли гистерезиса по графику кривой.

13. Определите коэффициент прямоугольности петли

$$K_{\text{П}} = B_r/B_m. \qquad (27)$$

14. По основной кривой намагничивания рассчитайте магнитную проницаемость по формуле

$$\mu = B/(\mu_0 H) \qquad (28)$$

15. По основной кривой намагничивания рассчитайте дифференциальную магнитную проницаемость по формуле

$$\mu_{\text{диф}} = (1/\mu_0)\cdot(\mathrm{d}B/dH).$$

16. Постройте на одном графике зависимости магнитной проницаемости и дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

17. Дайте качественную характеристику магнитных свойств исследуемого материала.

18. Сделать вывод о проделанной работе.

Формирование и печать отчета

Отчет должен содержать:

– цель работы;

– задание и исходные данные;

– схему измерения;

– расчетные формулы с указанием размерности физических величин;

– графики расчетных зависимостей.

В отчете необходимо дать выводы по полученным результатам и сопоставить их со справочными данными.

Литература

1. Крупичка, С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов [Текст]: Т. 2 / С. Крупичка; пер. с немецкого под ред. А. С. Пахомова; [предисл. ред. пер.]. Т. 2. – М.: Мир, 1976.

2. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники [Текст] / В. В. Пасынков, В.С. Сорокин – М.: Лань, 2003. – 368 с.

3. Физика магнетиков: практикум по физике твердого тела [Текст] / Сост. В. В. Парфенов, В. А. Чистяков. – Казань: Казанск. гос. ун-т, 1996.

4. Преображенский, А. А. Магнитные материалы и элементы / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.

Содержание

	стр.
Процессы намагничивания и перемагничивания магнетиков ……..	3
Магнитная анизотропия ……	3
Виды магнитной анизотропии ……..	4
Доменная структура магнетиков ……..	6
Намагничивание и перемагничивание …….	8
Контрольные вопросы ……	13
Описание установки …….....	14
Описание устройства стенда …….	14
Структурная схема измерений и расчетные соотношения …….	15
Описание интерфейса пользователя ……	17
Основное окно программы ……	17
Схемы измерений ……...	18
Управляющие и регистрирующие инструменты …….	20
Рабочая тетрадь ……..	23
Оформление отчета ……	28
Выполнение работы ……...	30
Измерение временных зависимостей напряженности поля и индукции …….	30
Определение намагниченности материалов ……	30
Формирование и печать отчета …….	31
Литература ……..	32

Учебное издание

Парфенов Виктор Всеволодович,
Болтакова Наталья Викторовна

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ МАГНЕТИКОВ

Методическое пособие к лабораторным работам