

Лабораторная работа № 3.4.4
Петля гистерезиса (статический метод)

Струков О. И.
Б04-404

Цель работы: исследование кривых намагничивания ферромагнетиков с помощью баллистического гальванометра.

В работе используются: генератор токов намагничивания (ГТН), тороид, соленоид, баллистический гальванометр с осветителем и шкалой, мультиметр-амперметр, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), разделительный трансформатор, ключи, переключатели.

Теоретическая часть

Зависимость вектора магнитной индукции B ферромагнетика от вектора напряжённости магнитного поля H нелинейна. В системе СИ эта связь имеет вид

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

При этом намагниченность зависит не только от состояния вещества, а также от его предыдущих состояний, то есть зависимость $B(H)$ не является функцией состояния. График этой зависимости изображён на рис. 1.

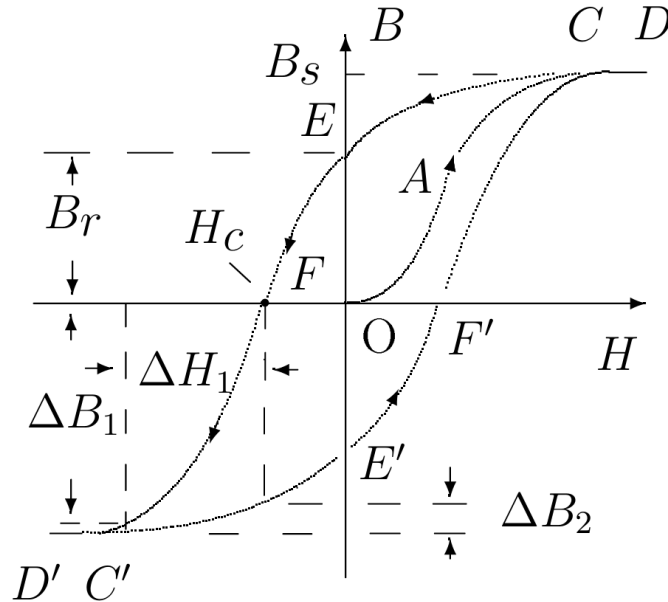


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

Измерение зависимости $B(H)$: На тороидальный сердечник (рис. 2), изготовленный из исследуемого образца, равномерно намотана намагничивающая обмотка с числом витков N , а поверх неё — измерительная обмотка с числом витков N' . При скачкообразном изменении тока в намагничивающей обмотке в измерительной обмотке возникает ЭДС индукции. Ток, вызванный этой ЭДС, регистрируется гальванометром Γ , работающим в баллистическом (импульсном) режиме: его отклонение пропорционально полному заряду Δq , протекшему через него.

Напряжённость поля H в сердечнике пропорциональна току I в первичной (намагничивающей) обмотке, а изменение магнитной индукции ΔB — заряду Δq , протекшему через вторичную (измерительную) обмотку. Таким образом, измеряя токи ΔI и суммируя отклонения Δq гальванометра Γ , можно получить зависимость $B(H)$ для материала сердечника.

Напряжённость магнитного поля в тороиде равна

$$H = \frac{N}{\pi D} I \quad (2)$$

Гальванометр измеряет протёкший через него заряд баллистическим методом, то есть

$$\Delta x = \frac{\Delta q}{b} \quad (3)$$

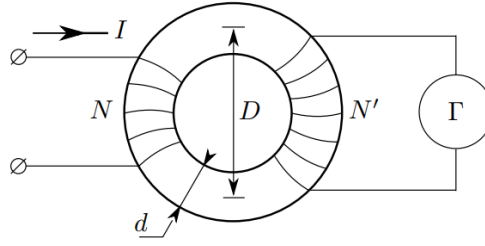


Рис. 2: Схема для измерения индукционного тока

Учитывая, что заряд возникает из-за тока электромагнитной индукции, получим

$$\Delta x = \frac{S_t N'}{b R_t} \Delta B \quad (4)$$

Здесь R_t – полное сопротивление измерительной цепи тороида, S_t – площадь поперечного сечения тороида.

Баллистическую постоянную b можно определить с помощью следующей схемы (рис. 3): вместо тороида возьмём соленоид, и, воспользовавшись той же формулой, получим

$$\Delta x = \frac{S_c N'_c}{b R_c} \Delta B_c = \frac{\mu_0 S_c N'_c N_c}{b R_c l_c} \Delta I_c \quad (5)$$

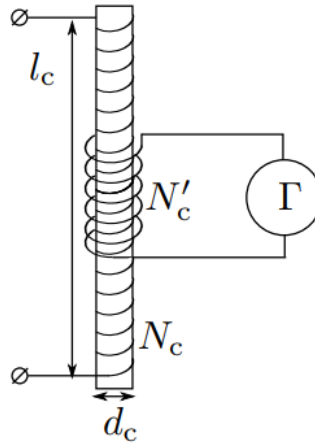


Рис. 3: Схема для калибровки гальванометра

Таким образом, можно исключить калибровочную постоянную b , учитывая, что в исследуемой схеме будут подобраны сопротивления схем с тороидом и соленоидом были равны.

$$\Delta B = \mu_0 \left(\frac{d_c}{d_t} \right)^2 \frac{N'_c}{N'} \frac{N_c}{l_c} \Delta I_c \frac{\Delta x}{\Delta x_c} \quad (6)$$

Схема для исследования петли гистерезиса представлена на рис. 4.

Чтобы получить начальную кривую намагничивания, необходимо размагнитить сердечник путём подключения к цепи переменного тока и постепенного уменьшения его амплитуды.

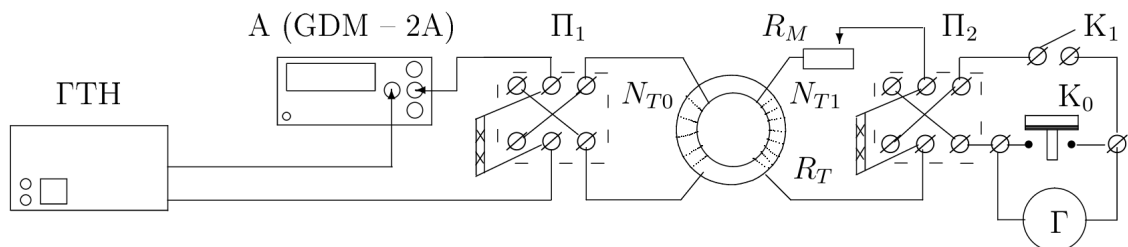


Рис. 4: Схема установки для исследования петли гистерезиса

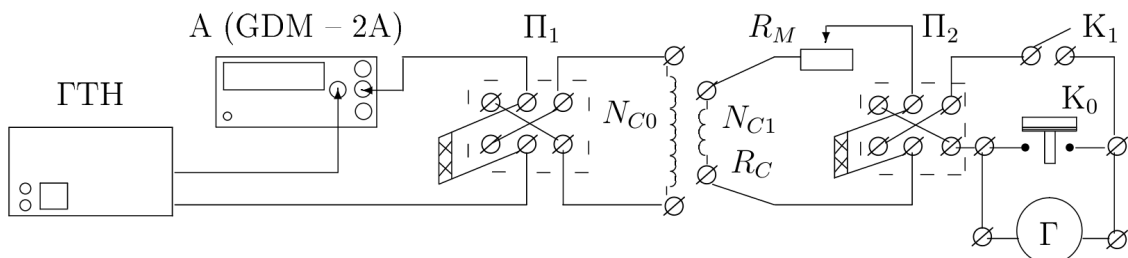


Рис. 5: Схема установки с соленоидом вместо тороида

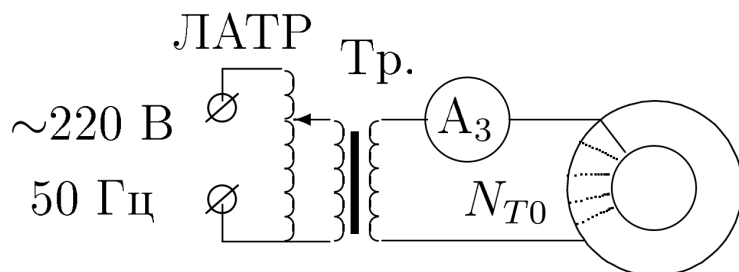


Рис. 6: Схема установки для размагничивания образца

Ход работы

1. Для подготовки к работе была собрана схема с тороидом, проверена её работоспособность, установлено начальное значение $R_M = 300$ Ом, превышающее сопротивление соленоида, включён осветитель гальванометра. Установлено, что при любых изменениях силы тока зайчик не выходит за пределы шкалы.

Характеристики исследуемого образца

| Материал | N_{T0} | N_{T1} | D, м | d_t , м |
|----------|----------|----------|------|-----------|
| Железо | 1750 | 300 | 0,1 | 0,01 |

2. Было сделано четыре серии измерений зависимости отклонения зайчика при изменении силы тока. По формулам (2) и (6) найдены значения ΔB и H , исследуемых в эксперименте. Часть результатов представлена в таблицах:
3. Образец размагнитили, подключив к цепи переменного тока и постепенно уменьшив его амплитуду до нуля. Затем аналогичным способом получили зависимость $\Delta B(H)$ для начальной кривой намагничивания. Результаты представлены в таблице:
4. Для построения петли гистерезиса были просуммированы все скачки ΔB и получена зависимость $B(H)$. В результате была собрана полная петля, и аналогичным образом на график была добавлена Начальная кривая намагничивания:

Характеристики соленоида

| | | | | |
|------------|-----------|-----------|----------|----------|
| R_C , Ом | l_C , м | d_C , м | N_{C0} | N_{C1} |
| 60 | 0,8 | 0,07 | 825 | 435 |

Понижение силы тока

| I, мА | Δx , мм | H, А/м | ΔB , Тл |
|-------|-----------------|----------|---------------------|
| 830,9 | 0,0 | -145,360 | 0,000 |
| 325,0 | $(56 \pm 0,5)$ | -145,282 | $(0,242 \pm 0,002)$ |
| 127,4 | $(55 \pm 0,5)$ | -141,042 | $(0,238 \pm 0,002)$ |
| 102,2 | $(34 \pm 0,5)$ | -139,919 | $(0,147 \pm 0,002)$ |
| 84,0 | $(25 \pm 0,5)$ | -137,317 | $(0,108 \pm 0,002)$ |
| 66,8 | $(14 \pm 0,5)$ | -136,004 | $(0,061 \pm 0,002)$ |
| 56,0 | $(7 \pm 0,5)$ | -113,841 | $(0,030 \pm 0,002)$ |
| 44,5 | $(6 \pm 0,5)$ | -95,891 | $(0,026 \pm 0,002)$ |
| 39,1 | $(5 \pm 0,5)$ | -78,810 | $(0,022 \pm 0,002)$ |
| 28,1 | $(6 \pm 0,5)$ | -42,534 | $(0,026 \pm 0,002)$ |
| 15,4 | $(7 \pm 0,5)$ | -34,787 | $(0,030 \pm 0,002)$ |
| 0,0 | $(15 \pm 0,5)$ | 0,000 | $(0,065 \pm 0,002)$ |

Повышение силы тока

| I, мА | Δx , мм | H, А/м | ΔB , Тл |
|-------|-----------------|---------|----------------------|
| 0,0 | 0,0 | 0,000 | 0,0000 |
| 15,4 | $(-3 \pm 0,5)$ | 34,787 | $(-0,012 \pm 0,002)$ |
| 28,1 | $(-3 \pm 0,5)$ | 42,533 | $(-0,013 \pm 0,002)$ |
| 39,1 | $(-3 \pm 0,5)$ | 78,809 | $(-0,013 \pm 0,002)$ |
| 44,5 | $(-2 \pm 0,5)$ | 95,835 | $(-0,008 \pm 0,002)$ |
| 55,9 | $(-4 \pm 0,5)$ | 113,395 | $(-0,017 \pm 0,002)$ |
| 66,7 | $(-3 \pm 0,5)$ | 136,558 | $(-0,013 \pm 0,002)$ |
| 83,9 | $(-14 \pm 0,5)$ | 137,648 | $(-0,060 \pm 0,002)$ |
| 105,1 | $(-32 \pm 0,5)$ | 139,139 | $(-0,138 \pm 0,002)$ |
| 129,3 | $(-39 \pm 0,5)$ | 141,318 | $(-0,169 \pm 0,002)$ |
| 336,7 | $(-62 \pm 0,5)$ | 145,610 | $(-0,268 \pm 0,002)$ |
| 859,6 | $(-59 \pm 0,5)$ | 144,688 | $(-0,255 \pm 0,002)$ |

5. Из графика определена коэрцитивная сила железа $H_C = 144 \pm 3$ А/м, а также индукция насыщения $B_S = 1,84 \pm 0,04$ Тл.
6. По наклону графика определено значение максимальной дифференциальной магнитной проницаемости $\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = 465 \pm 5$.

Начальная кривая намагничивания

| I, мА | Δx , мм | H, А/м | ΔB , Тл |
|-------|-----------------|---------|---------------------|
| 0,0 | 0,0 | 0,000 | 0,0000 |
| 15,3 | $(8 \pm 0,5)$ | 1,230 | $(0,035 \pm 0,002)$ |
| 28,1 | $(17 \pm 0,5)$ | 2,534 | $(0,074 \pm 0,002)$ |
| 39,1 | $(44 \pm 0,5)$ | 3,810 | $(0,190 \pm 0,002)$ |
| 44,5 | $(22 \pm 0,5)$ | 4,891 | $(0,095 \pm 0,002)$ |
| 55,9 | $(45 \pm 0,5)$ | 5,396 | $(0,195 \pm 0,002)$ |
| 65,7 | $(27 \pm 0,5)$ | 6,558 | $(0,117 \pm 0,002)$ |
| 81,9 | $(61 \pm 0,5)$ | 9,649 | $(0,264 \pm 0,002)$ |
| 103,2 | $(71 \pm 0,5)$ | 15,696 | $(0,307 \pm 0,002)$ |
| 131,4 | $(60 \pm 0,5)$ | 24,875 | $(0,260 \pm 0,002)$ |
| 332,9 | $(79 \pm 0,5)$ | 53,725 | $(0,342 \pm 0,002)$ |
| 861,6 | $(71 \pm 0,5)$ | 146,688 | $(0,307 \pm 0,002)$ |

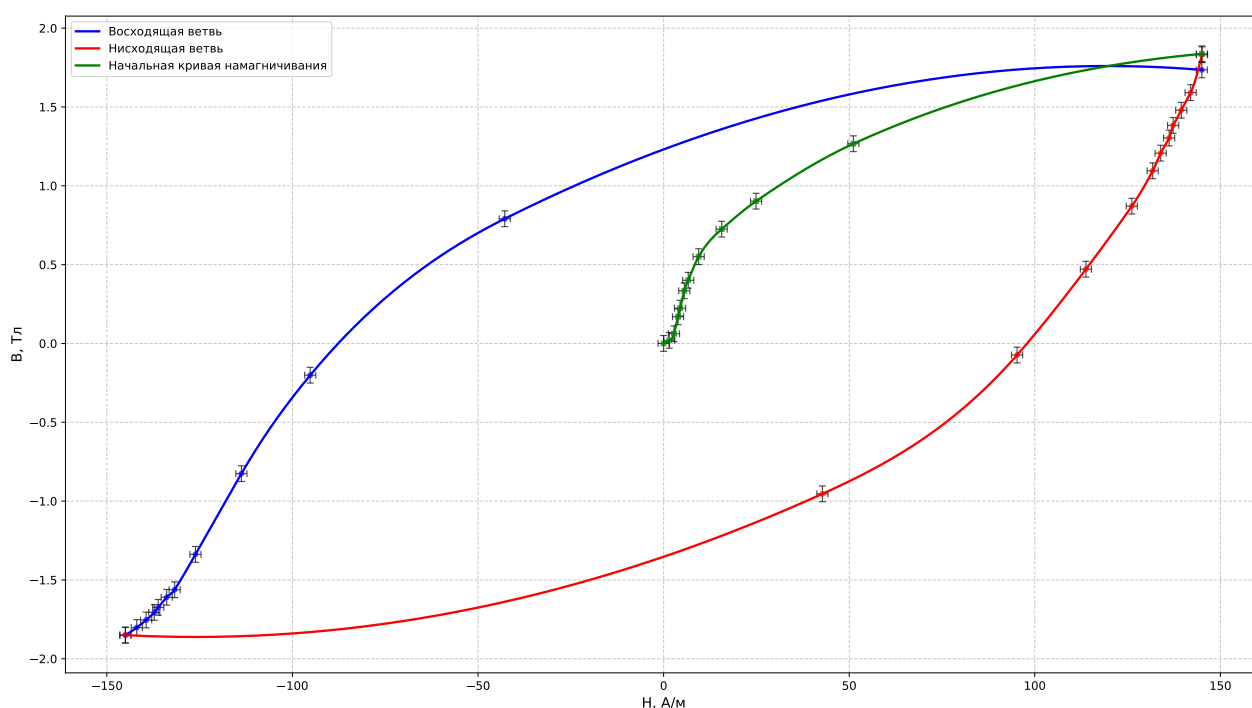


Рис. 7: График петли гистерезиса

Вывод

В результате выполнения работы были получены предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания. Затем из графика зависимости $B(H)$ были определены коэрцитивная сила, индукция насыщения и максимальная дифференциальная магнитная проницаемость. Результаты в сравнении с табличными:

| | Эксперимент | Справочное значение |
|-------------|-----------------|---------------------|
| H_C , А/м | 144 ± 3 | 70 |
| B_S , Тл | $1,84 \pm 0,04$ | 2,16 |
| μ | 465 ± 5 | 6000 |

Как видно, с табличными значениями только B_S сошлось по порядку величины. Вероятнее всего, расхождение связано с неидеальностью установки, возможностью существования примесей в исследуемом образце и ограниченностью максимально возможной силы тока – возможно,

мы не дошли до участка, где зависимость становится линейной, и можно более точно определить максимальную дифференциальную магнитную проницаемость