

### 3.4.4 (128). ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА (СТАТИЧЕСКИЙ МЕТОД)

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

30 августа 2021 г.

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

К ферромагнетикам принадлежат железо, никель, кобальт, гадолиний, их многочисленные сплавы с другими металлами. К ним примыкают ферриты — диэлектрики со структурой антиферромагнетика.

Магнитная индукция  $\mathbf{B}$  и напряжённость магнитного поля  $\mathbf{H}$  в ферромагнитном материале неоднозначно связаны между собой: индукция зависит не только от напряжённости, но и от предыстории образца. Связь между индукцией и напряжённостью поля типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 1.

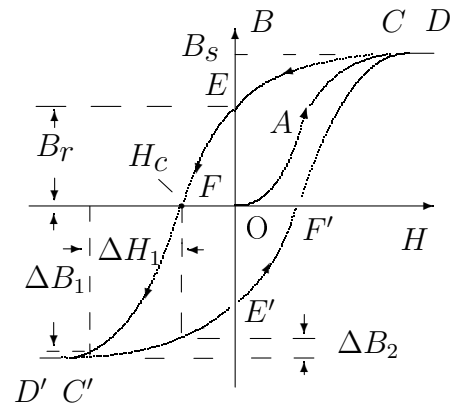


Рис. 1. Петля гистерезиса ферромагнетика

**Экспериментальная установка.** Схема для исследования петли гистерезиса представлена на рис. 4. Специальный генератор токов намагничивания (ГТН) позволяет скачками менять токи в намагничивающей обмотке тороида. При нажатии на верхнюю (+) кнопку генератора ток растёт, на нижнюю (-) – падает. Одинаковые скачки  $\Delta I$  ( $\sim \Delta H$ ) вызовут разные отклонения зайчика гальванометра  $\Delta x$  ( $\sim \Delta B$ ) на разных участках петли: на рис. 1 скачок  $\Delta H_1$  может дать и  $\Delta B_1$  на участке  $FD'$ , и  $\Delta B_2$  на участке  $D'E'$ . Поэтому генератор меняет ток неравномерно: большими скачками вблизи насыщения и малыми вблизи нуля.

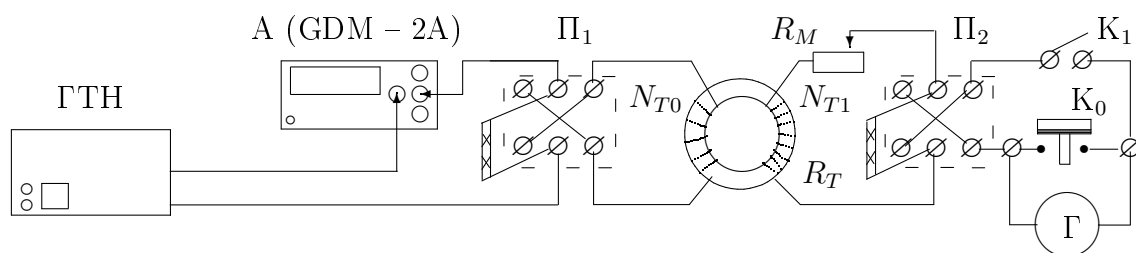


Рис. 4. Схема установки для исследования петли гистерезиса.

Ток в намагничивающей обмотке измеряется цифровым мультиметром А. Переключатель  $\Pi_1$  позволяет менять направление тока в первичной обмотке.

Чувствительность гальванометра  $\Gamma$  во вторичной цепи можно менять с помощью магазина сопротивлений  $R_M$ . Ключ  $K_1$  предохраняет гальванометр от перегрузок и замыкается только (!) на время измерения отклонений зайчика. Ключ  $K_0$  служит для мгновенной остановки зайчика (короткое замыкание гальванометра). Переключателем  $\Pi_2$  можно изменять направление тока через гальванометр.

Схема на рис. 5 отличается от схемы на рис. 4 только тем, что вместо тороида подключён калибровочный соленоид.

Сопротивления измерительных цепей тороида ( $R = R_T + R_M + R_0$ ) и соленоида ( $R_1 = R_C + R'_M + R_0$ ) должны быть одинаковы.

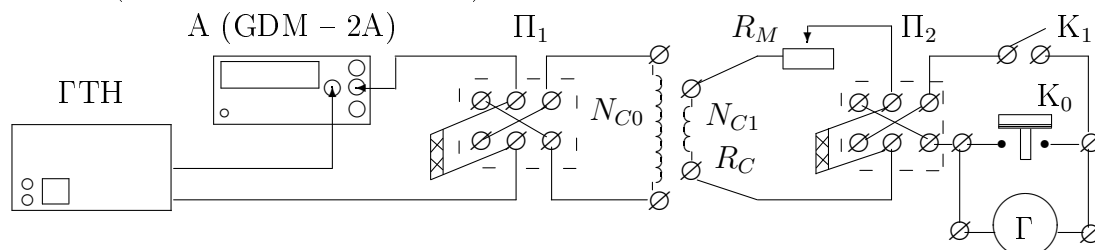


Рис. 5. Схема установки для калибровки гальванометра

Сопротивление тороида  $R_T \ll R_0$  — сопротивления гальванометра, поэтому сопротивления магазина в схеме с тороидом и соленоидом отличаются на величину сопротивления соленоида  $R_C$ :  $R'_M = R_M - R_C$ .

**Размагничивание образца.** Чтобы снять начальную кривую намагничивания, нужно размагнитить сердечник. Для этого тороид подключается к цепи переменного тока (рис. 6).

При уменьшении амплитуды тока через намагничивающую обмотку от тока насыщения до нуля характеристики сердечника **B** и **H** «пробегают» за секунду 50 петель всё меньшей площади и в итоге приходят в нулевую точку.

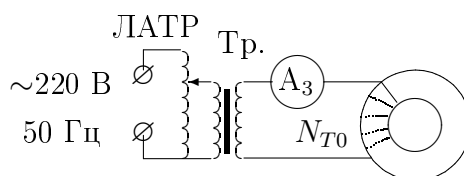


Рис. 6. Схема установки для размагничивания образца

**Исследование петли.** Измерения начинаются с максимального тока (точка  $C$  на рис. 1). Нажимая кнопку, следует фиксировать ток, соответствующий каждой позиции, и отклонение зайчика  $\Delta x$ , соответствующее каждому нажатию кнопки. Дойдя до нулевого тока (точка  $E$ ), следует поменять направление тока в обмотке  $N_{T0}$  переключателем  $\Pi_1$ , затем, увеличивая ток, пройти участок  $EC'$  до насыщения другого знака. В точке  $C'$  переключателем  $\Pi_2$  следует поменять направление тока в обмотке  $N_{T1}$ , чтобы при движении по правой ветви петли зайчик отклонялся в ту же сторону. В точке  $E'$  при нулевом токе ещё раз ключом  $\Pi_1$  изменяется направление тока в первичной обмотке, чтобы пройти участок  $E'F'C$ . Таким образом, измеряя шаг за шагом отклонения зайчика при изменениях тока, нужно пройти всю петлю гистерезиса.

30 августа 2021 г.

Нельзя при замкнутом ключе  $K_1$  менять ток сразу на несколько ступеней или отключать ключ  $\Pi_1$  при больших токах, т.к. при резком изменении тока можно повредить гальванометр.

При движении по петле ток должен меняться строго монотонно. Если случайно пропущен один отброс зайчика, нельзя вернуться назад на один шаг — это приведёт к искажению петли. Следует при разомкнутом ключе  $K_1$  вернуться к насыщению и начать обход петли сначала. При нарушении монотонности в измерении начальной кривой намагничивания образец снова надо размагничивать, а для предельной петли достаточно вернуться к насыщению. Именно поэтому измерения начинают с предельной петли.

## ЗАДАНИЕ

В работе исследуются начальная (основная) кривая намагничивания и предельная петля гистерезиса для образцов тороидальной формы, изготовленных из чистого железа или стали.

### I. Подготовка к работе

1. Соберите схему согласно рис. 4: предварительно расположите ключи так, чтобы удобно было снимать отсчёты; ключ  $\Pi_1$  — ближе к амперметру; ключи  $\Pi_2$  и  $K_1$  — ближе к ключу  $K_0$ , куда подведены концы гальванометра. При сборке схемы и наладке первичной цепи тороида ключ  $K_1$  разомкнут (!).
2. После проверки схемы преподавателем включите генератор в сеть (тумблер на задней панели ГТН). Ознакомьтесь с техническим описанием генератора ГНТ. Верхняя кнопка (+) на передней панели ГТН позволяет увеличивать, а нижняя (-) — уменьшать ток ступенями. В окне рядом высвечивается № ступени (от 00 до 15).

Ознакомьтесь с техническим описанием амперметра (GDM). Включите амперметр в сеть и установите режим работы: измерение постоянного тока — кнопка «DCA» нажата, автоматический режим — кнопка «AUTO/MAN» (при этом на дисплее внизу высвечивается надпись AUTO и DC, а справа — единицы измерения тока).

Не подключая гальванометра (ключ  $K_1$  разомкнут), проверьте, как меняется ток в первичной обмотке тороида при переключении кнопок генератора тока, и каково значение максимального тока (№ ступени — 15).

Пользуясь нижней кнопкой, вернитесь к минимальному току (00).

3. Чувствительность гальванометра, при которой зайчик не зашкаливает, можно подобрать, меняя сопротивление магазина  $R_M$ . Установите начальное значение  $R_M > R_C$  — сопротивления соленоида. Значения  $R_M$  и  $R_C$  указаны на установке.

Включите осветитель гальванометра. Шкалу можно установить так, чтобы нулевое положение зайчика было недалеко от края шкалы.

30 августа 2021 г.

## Внимательно перечитайте раздел «Исследование петли».

4. Установите максимальный ток в образце. Замкните ключ  $K_1$ . Сначала, не проводя записей, наблюдайте за отклонениями зайчика при каждом нажатии на кнопку. Изменять ток следует только после того, как зайчик вернётся к начальному положению.

Аккуратно обойдите всю петлю, чтобы убедиться, что зайчик нигде не выходит за пределы шкалы. Как правило, самые большие скачки  $\Delta x$  происходят на участках  $EF$  и  $E'F'$ .

Если зайчик вышел за пределы шкалы — разомкните ключ  $K_1$  и, увеличив сопротивление  $R_M$ , начните обход петли сначала.

Если зашкаливания не произошло, и максимальное отклонение  $\Delta x$  близко к концу шкалы — приступайте к измерениям.

### II. Предельная петля гистерезиса

5. Измерение петли начните с максимального тока намагничивания. Отмечайте величину тока  $I$ , соответствующую каждой ступени ( $I$ , а не  $\Delta I$ ), и отклонения зайчика  $\Delta x$ , соответствующие каждому нажатию на кнопку.

Завершив полный замкнутый цикл, разомкните ключ  $K_1$ . Уменьшив ток до нуля, разомкните переключатель  $\Pi_1$ .

Проверьте, что суммы всех отклонений по верхней и нижней частям петли одинаковы. Если расхождение превышает 10%, пройдите цикл снова.

### III. Калибровка гальванометра

6. Соберите схему согласно рис. 5. Для этого достаточно в схеме, изображённой на рис. 4, вместо тороида подключить соленоид с измерительной катушкой.
7. Уменьшите на магазине сопротивлений значение  $R_M$  на величину  $R_C$ :  $R'_M = R_M - R_C$  — при этом в формуле (4)  $R = R_{Cю}$
8. Установите генератор на максимум тока (верхней кнопкой) и, замкнув ключ  $\Pi_1$ , запишите значение тока  $I_{\max}$ .

Подключите гальванометр (ключ  $K_1$ ). Размыкая переключатель  $\Pi_1$ , измерьте отклонение гальванометра  $\Delta x_c$ , возникшее при изменении тока  $\Delta I_c = I_{\max}$ .

Формула (4) позволяет выразить изменение магнитной индукции в образце при произвольном отклонении гальванометра  $\Delta x$  через отношение  $\Delta I_c / (\Delta x_c)$ , измеренное при калибровке.

### IV. Начальная кривая намагничивания

9. Начальную кривую намагничивания (участок  $OAC$  на рис. 1) можно снять по той же схеме (рис. 4), если предварительно размагнитить тороид в цепи переменного тока. Для этого соберите схему, изображённую на рис. 6, на отдельном столе: обмотку  $N_{T0}$  тороида подключите через амперметр переменного тока к выходу разделительного трансформатора  $Tr$ .

Включите ЛАТР в сеть и установите ток, соответствующий насыщению ( $I \simeq 3 \text{ A}$ ).

Ручкой ЛАТРа медленно (за 5-10 с) уменьшайте ток до нуля. Образец размагничен.

Отсоедините тороид и отключите ЛАТР от сети (не наоборот!).

10. Вновь подсоедините тороид к цепи, изображённой на рис. 4. Установите тумблер генератора на минимальный ток (позиция 00) и снимите начальную кривую намагничивания, скачками увеличивая ток от нуля до  $I_{\max}$ . В случае сбоя в измерениях образец надо снова размагнитить.

Дойдя до максимального тока, разомкните ключ  $K_1$ .

11. Запишите параметры установки:  $R_M$  и  $R'_M$  — для контроля; размеры тороида:  $d_T = 1 \text{ см}$ ,  $D = 10 \text{ см}$ . Количество витков тороида, сопротивление гальванометра  $R_0$  и параметры соленоида указаны на установке.

Отключите питание и разберите схему.

#### V. Обработка результатов

12. Используя формулы (1) и (4), получите зависимости

$$\mathbf{H} \text{ (А/м)} = f_1[I \text{ (А)}] \text{ и } \Delta \mathbf{B} \text{ (Тл)} = f_2[\Delta x \text{ (мм)}].$$

13. Постройте петлю гистерезиса  $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ . Для выбора масштаба просуммируйте все скачки  $\Delta B$  или  $\Delta x$  по левой части петли и все скачки по правой части.

Построение удобно начать с максимального значения  $\mathbf{H}$  (точка  $C$  или  $C'$  на рис. 1). Переход к следующему значению  $\mathbf{H}$  соответствует первому скачку  $\Delta B$  и т.д. Отложив все  $\Delta B$  по одной стороне петли и дойдя до насыщения, постройте вторую сторону таким же образом.

Найдите середину петли и проведите ось  $\mathbf{H}(I)$ .

14. Постройте начальную кривую намагничивания на том же графике.
15. Определите по графику коэрцитивную силу  $H_c$  и индукцию насыщения  $B_s$ .
16. По наклону касательной к начальной кривой намагничивания определите максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{диф}}$ :

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}.$$

17. Оцените погрешности, сведите экспериментальные результаты в таблицу и сравните их со справочными.

	Эксперим.	Справочн.
$H_c, \frac{\text{А}}{\text{м}}$		
$B_s, \text{Тл}$		
$\mu_{\text{диф}}$		

Исправлено 30-VIII-2021 г.