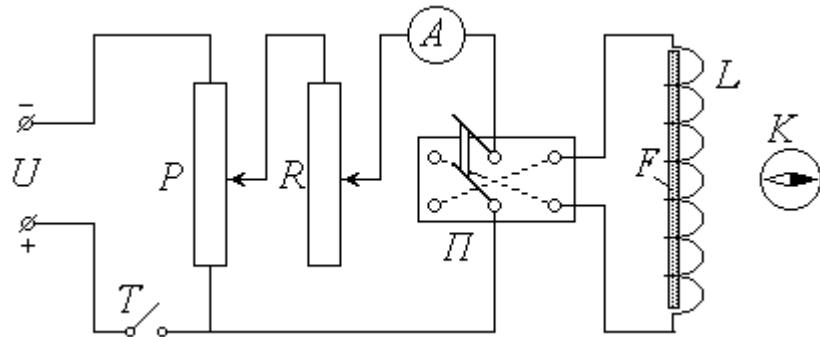


## Работа 3.4

### ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

*Цель работы:* снятие основной кривой намагничивания и петли гистерезиса ферромагнетика.

*Схема экспериментальной установки*



$U$  – источник постоянного напряжения;  $T$  – тумблер;  
 $P$  – потенциометр;  $R$  – реостат;  $A$  – амперметр;  $\Pi$  – переключатель;  
 $L$  – соленоид;  $F$  – ферромагнитный сердечник;  $K$  – компас

*Описание установки и методики измерений*

Питание лабораторной установки осуществляется источником постоянного напряжения  $U$ ; для замыкания цепи служит тумблер (выключатель)  $T$ . Потенциометром  $P$  можно регулировать подаваемое на установку напряжение, а реостатом  $R$  – силу тока в цепи. Для измерения тока в цепь включен амперметр  $A$ . С помощью переключателя  $\Pi$  можно изменять направление тока через соленоид. Соленоид  $L$  представляет собой длинную прямую катушку, в которую помещается исследуемый образец (сердечник) – стержень  $F$  из ферромагнитного сплава.

Протекание тока  $I$  по виткам соленоида создает внутри него практически однородное магнитное поле, напряженность  $\mathbf{H}$  которого равна по модулю

$$H = I \cdot n , \quad (1)$$

где  $n$  – число витков, приходящееся на единицу длины соленоида. Индукция магнитного поля  $\mathbf{B}$ , в отличие от напряженности, зависит от свойств среды:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды.

При помещении в соленоид ферромагнитного сердечника поле в нем усиливается во много раз ( $\mu \gg 1$ ); так как магнитная проницаемость ферромагнетика существенно зависит от напряженности поля, соотношение (2) становится нелинейным. Кроме того, величина магнитной индукции  $B$  зависит от предыстории материала (от значения напряженности в предыдущие моменты времени); вследствие этого изменение величины  $B$  отстает от изменения  $H$ . Это явление получило название *гистерезиса* (запаздывания). Типичная зависимость  $B(H)$  для ферромагнетика – *петля гистерезиса* – изображена на рис. 22. Пусть перед

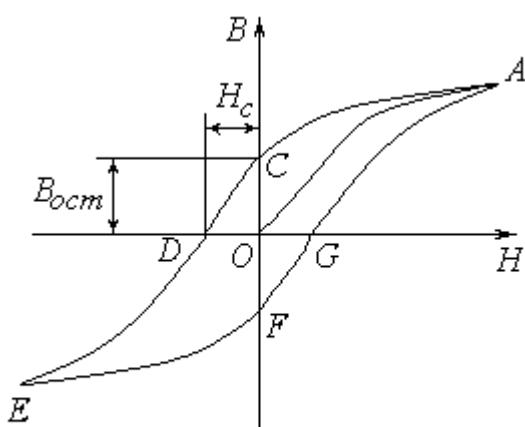


Рис. 22

началом опыта стержень размагнчен ( $B = 0$ ) и ток в цепи отсутствует ( $H = 0$ ). Начальный участок петли  $OA$ , соответствующий увеличению напряженности  $H$  от нуля до максимального значения, называется *основной кривой намагничения*. При уменьшении напряженности до нуля (участок  $AC$  петли) поле в ферромагнетике не исчезает; *остаточное намагничение* характеризуется значением магнитной индукции  $B_{ocm}$ . Для снятия намагничения необходимо

приложить внешнее магнитное поле противоположного направления (участок  $CD$ ). Соответствующее значение напряженности  $H_c$  называется *коэрцитивной силой*. Дальнейшее увеличение напряженности до максимального значения ( $DE$ ), уменьшение до нуля ( $EF$ ) и, после изменения направления внешнего поля на первоначальное, увеличение до максимума ( $FA$ ) замыкают петлю.

Итак, для снятия петли гистерезиса необходимо измерять величину напряженности поля в соленоиде  $H$  и соответствующую величину магнитной индукции в стержне  $B$ . Зная число витков на единицу длины соленоида  $n$  и измерив силу тока  $I$ , по формуле (1) можно рассчитать значение  $H$ . Для определения магнитной индукции служит компас  $K$ . Перед началом опыта установка располагается таким образом, чтобы ось соленоида была перпендикулярна магнитному меридиану. В этом случае при отсутствии тока в соленоиде и отсутствии в нем сердечника (или при полном размагничении последнего) стрелка компаса направлена в сторону горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли  $B_0$  (рис. 23). При наличии магнитного поля в стержне его индукция  $B$  направлена вдоль оси соленоида (и стержня). Силовые линии магнитного поля замкнуты (две из них показаны на рисунке). Если компас расположен против середины соленоида (стержня), то индукция  $B'$  поля, создаваемого ферромагнетиком в центре компаса, направлена параллельно  $B$  в

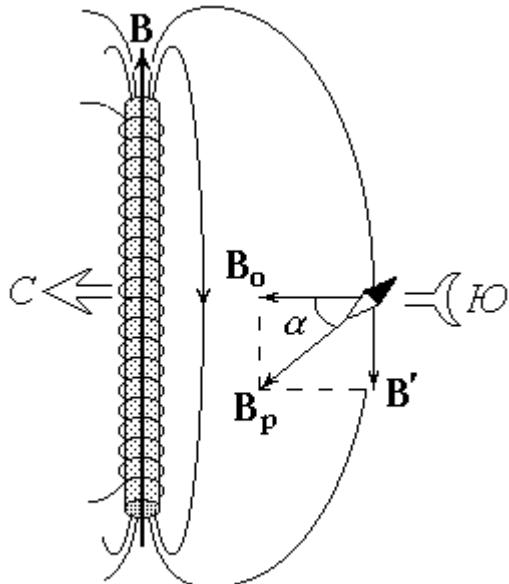


Рис. 23

противоположную ему сторону. Поле вне ферромагнетика существенно слабее, чем внутри его. Экспериментально установлено, что в месте расположения магнитной стрелки оно ослабевает в  $k$  раз:  $B' = B/k$ , откуда

$$B = k \cdot B'. \quad (3)$$

Таким образом, стрелка компаса оказывается под воздействием двух магнитных полей: поля Земли с индукцией  $B_0$  и поля ферромагнетика с индукцией  $B'$ . В этом случае стрелка будет ориентирована в направлении результирующего поля с индукцией  $B_p$ , отклонившись от магнитного меридиана на угол  $\alpha$ . Как видно из рисунка, при условии взаимной перпендикулярности

векторов  $B_0$  и  $B'$  их модули связаны соотношением

$$B' = B_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

С учетом (3) магнитная индукция в ферромагнитном сердечнике может быть рассчитана как

$$B = k \cdot B_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (4)$$

Для приведения ферромагнитного стержня в исходное размагниченное состояние используется вспомогательная установка, схема которой изображена на рис. 24. Стержень, подлежащий размагничению, также помещается в соленоид. Но, в отличие от схемы на с.73, эта установка питается через

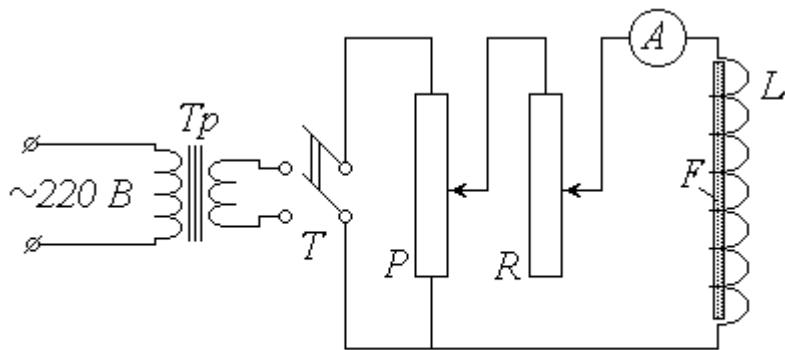


Рис. 24

сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц. После замыкания тумблера  $T$  и увеличения (с помощью потенциометра  $P$  и реостата  $R$ ) силы тока в соленоиде стержень оказывается в переменном по величине и направлению магнитном поле; при этом с периодом 0,02 с «описываются», сменяя друг друга, все новые петли гистерезиса. Уменьшение тока от максимума до нуля приводит к тому, что петли «стягиваются» в точку 0, т.е. стержень полностью размагничивается.

### Порядок измерений и обработки результатов

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой. Запишите в тетрадь значения числа витков на единицу длины соленоида  $n$  (в  $m^{-1}$ ) и коэффициента ослабления магнитного поля  $k$ , а также величину горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли  $B_0$ .
2. Изучите шкалы амперметра и компаса; определите их цену деления и научитесь снимать показания этих приборов.
3. Поверните панель установки так, чтобы освобожденная стрелка компаса установилась на нулевом делении.
4. Поместите стержень в соленоид **установки для размагничения**. Включите установку в сеть и замкните тумблер. Пользуясь потенциометром и реостатом, увеличьте ток до максимума, а затем уменьшите до нуля. Выключив установку, извлеките стержень.
5. Поместите стержень в соленоид на лабораторной установке. Убедитесь в том, что он размагнчен (стрелка компаса не должна реагировать на его присутствие).
6. Установите движки потенциометра  $P$  и реостата  $R$  в положения, при которых снимаемое напряжение и сила тока в цепи соленоида будут минимальными.
7. Включите установку в сеть **постоянного тока**. Замкните тумблер  $T$  и установите контакт переключателя  $\Pi$  в одно из крайних положений. В дальнейшем направление тока, соответствующее выбранному положению переключателя, считайте положительным.
8. Занесите в таблицу рекомендуемые значения угла поворота магнитной стрелки  $\alpha$  или силы тока в соленоиде  $I$ .

Номер опыта	$\alpha$ , град.	$I$ , А	$\operatorname{tg}\alpha$	$B$ , Тл	$H$ , А/м
1	0	0	0	0	0
2					
...	...	...	...	...	...
21					

9. Заполните первую строку таблицы нулями, что соответствует начальной точке 0 основной кривой намагничения (см. рис. 22).
10. Медленно перемещая движки потенциометра и реостата, наблюдайте за стрелкой компаса, дожидаясь установления ее на очередном заданном делении шкалы. Соответствующее значение силы тока  $I$ , показываемое амперметром, выразите в амперах и занесите в таблицу. Начальное направление отклонения стрелки в дальнейшем считайте положительным ( $\alpha > 0$ ).

**Внимание!** При изменении силы тока старайтесь не «проскочить» следующую точку. Если это произойдет, то «вернуться» к ней нельзя из-за наличия гистерезиса. В этом случае необходимо вновь начать работу с п. 4.

11. Повторяйте п. 11 до максимального из рекомендованных значений угла отклонения стрелки (тем самым будет пройдена основная кривая намагничения  $OA$ ).

12. С помощью потенциометра и реостата начинайте уменьшать ток в цепи, **не изменяя его направления**. При установлении стрелки на заданных делениях фиксируйте значения силы тока и записывайте их в таблицу. По достижении нулевого значения тока (точка  $C$  петли) переведите контакт переключателя в противоположное состояние. После этого начинайте вновь увеличивать ток, записывая его значения в таблицу со знаком « $-$ ».

13. Продолжая действовать аналогичным образом, «пройдите» ветви  $CE$  и  $EF$  петли гистерезиса. Перед снятием замыкающей ветви  $FA$  вновь измените положение переключателя и далее записывайте значения силы тока со знаком « $+$ ».

14. По окончании измерений установите движки потенциометра и реостата в исходное положение (см. п. 7). Выключите тумблер и отключите установку от сети.

15. По формуле (1) рассчитайте значения напряженности  $H$  магнитного поля соленоида для каждого из проделанных измерений; результаты занесите в таблицу.

16. С помощью таблиц или микрокалькулятора найдите значения  $\operatorname{tg} \alpha$  и вычислите по формуле (4) значения индукции  $B$  магнитного поля в ферромагнетике. Заполните оставшиеся столбцы таблицы.

17. Постройте на миллиметровой бумаге график зависимости  $B(H)$  – петлю гистерезиса.

18. Для указанной преподавателем величины напряженности поля оцените значение относительной магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнетика.

### *Контрольные вопросы*

1. Магнитное поле в веществе. Вектор намагничения. Магнитная восприимчивость и относительная магнитная проницаемость вещества.
2. Особенности ферромагнетиков. Гистерезис. Остаточное намагничение. Коэрцитивная сила.
3. Природа ферромагнетизма. Домены. Точка Кюри.
4. Жесткие и мягкие ферромагнетики; области их практического применения.