

305. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОБРАТИМОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТА ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

305.1. Цель работы

Экспериментальное исследование зависимости обратимой магнитной проницаемости феррита от напряженности внешнего магнитного поля.

305.2. Теоретический материал

Магнетики. Ферромагнетики, кривая намагничивания. Магнитная проницаемость.

[1. С. 165 – 166, 176 – 180].

305.3. Постановка задачи

В данной лабораторной работе необходимо измерить зависимость резонансной частоты колебаний в параллельном контуре LC от тока в обмотке подмагничивания. По полученным результатам измерений и параметрам элементов лабораторной установки рассчитать напряженность поля подмагничивания и обратимую магнитную проницаемость. Построить график зависимости обратимой магнитной проницаемости от величины напряженности поля подмагничивания.

305.4. Описание установки

На практике для определения магнитной проницаемости измеряют, как правило, индуктивность катушки, намотанной на сердечник из исследуемого магнетика. Индуктивность катушки прямо пропор-

циональна магнитной проницаемости сердечника, например, индуктивность соленоида $L = \mu_0 \mu n^2 V$, где n – число витков на единицу длины соленоида; V – объем соленоида. Магнитная проницаемость сердечника тороидальной формы практически равна магнитной проницаемости материала, из которого он изготовлен. Если через такую катушку пропустить переменный ток с амплитудой I_m , то характеристика намагничивания будет иметь вид частной петли гистерезиса, симметричной относительно начала координат, ось которой наклонена под углом α_1 к горизонтальной оси (рис. 305.1). Наклон оси этой петли определяет среднюю за период индуктивность катушки, а следовательно, и среднюю магнитную проницаемость материала сердечника при данной амплитуде тока I_m . В действительности, магнитная проницаемость сердечника и индуктивность катушки в течение периода проходящего по ней тока непрерывно меняются. Поэтому, чтобы определить начальную магнитную проницаемость материала сердечника μ_n , соответствующую $H \rightarrow 0$, необходимо применять ток как можно меньшей амплитуды.

Если кроме переменного тока через катушку пропускать постоянный ток, создающий в сердечнике постоянное магнитное поле H , то частная петля гистерезиса при той же амплитуде переменного тока будет иметь другой вид и наклон α_2 (см. рис. 305.1). Это означает, что средние значения индуктивности и магнитной проницаемости примут новые значения, пропорциональные $\text{tg} \alpha_2$. Из рис. 305.1 видно, что наклон оси малой частной петли гистерезиса α_2 не соответствует наклону основной кривой намагничивания при том же значении H , а определяется наклоном частной петли гистерезиса, симметричной относительно начала координат (пунктирные линии на рис. 305.1).

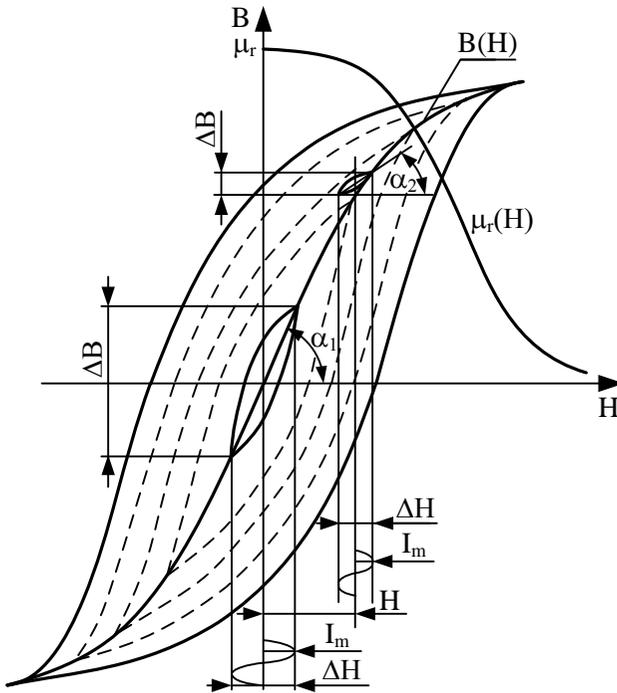


Рис. 305.1

Так как измеренное значение индуктивности катушки определяется наклоном частной петли гистерезиса, то полученное значение магнитной проницаемости также определяется этим наклоном и может быть представлено

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_H, \quad (305.1)$$

где ΔB – приращение индукции магнитного поля в сердечнике, соответствующее приращению напряженности магнитного поля за счет действия малого переменного сигнала. Измеренная таким образом магнитная проницаемость μ_r называется обратимой магнитной проницаемостью.

Чтобы получить зависимость $\mu_r(H)$ в точках, необходимо на катушку с предварительно размагниченным сердечником подавать постепенно увеличивающийся постоянный ток и одновременно на другую катушку, намотанную на том же сердечнике, переменный ток, амплитуда которого должна быть значительно меньше величины постоянного тока. При этом измерение индуктивности второй катушки необходимо производить на этом переменном токе. Поскольку наклон частных петель гистерезиса (пунктирные линии на рис. 305.1) с ростом H постепенно уменьшается, то обратимая магнитная проницаемость при этом будет также постепенно уменьшаться. Максимум зависимости $\mu_r(H)$ соответствует, как правило, $H=0$ (см. рис. 305.1).

Кроме того, индуктивность катушки с ферритовым сердечником, а следовательно, и обратимая магнитная проницаемость зависят от остаточной индукции в сердечнике и от частоты тока, на котором производится измерение. Таким образом, следует измерять $\mu_r(H)$ при тех токах и частотах, при которых катушка с данным ферритовым сердечником будет работать.

Исследование обратной магнитной проницаемости осуществляется на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 305.2.

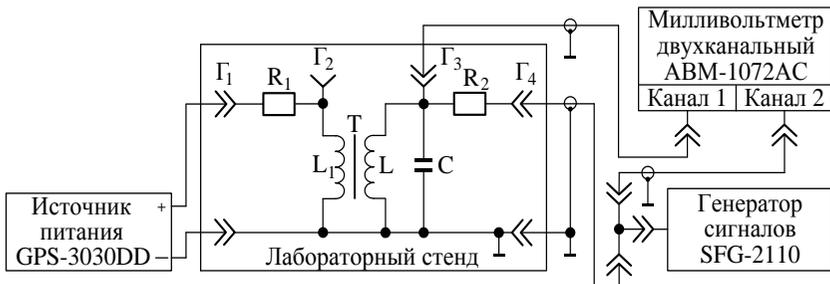


Рис. 305.2

Объектом исследований является кольцевой феррит с внешним диаметром 12 мм, помещенный в специально сделанный для него вырез второго кольцевого феррита большего диаметра (внешний диаметр 38 мм) (рис. 305.3, а).

Оба кольцевых феррита имеют одинаковую ширину a , а толщина h кольцевого феррита большего диаметра вдвое больше толщины кольцевого феррита меньшего диаметра. На кольцевом феррите меньшего диаметра сделаны плоские площадки с целью устранения воздушного зазора между кольцевыми ферритами. Марка обоих кольцевых ферритов 2000 НМ, начальная магнитная проницаемость $\mu_H = 2000_{-200}^{+400}$.

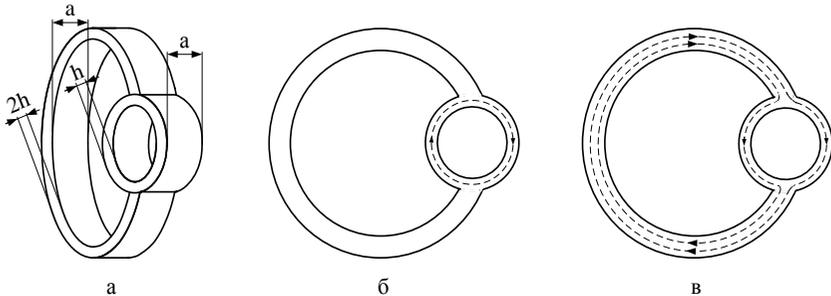


Рис. 305.3

На кольцевом феррите большего диаметра намотана обмотка подмагничивания L_1 . В эту обмотку через резистор R_1 подается регулируемый постоянный ток от источника питания GPS-3030DD. Изменяя в необходимых пределах величину тока в обмотке подмагничивания, можно изменять напряженность магнитного поля в обоих кольцевых ферритах.

На кольцевом феррите малого диаметра намотана измерительная катушка индуктивности L . К ней

параллельно подключен конденсатор C , который с индуктивностью L образует параллельный колебательный контур LC . На этот колебательный контур через резистор R_2 подается переменное напряжение с генератора SFG-2110. Изменяя частоту переменного напряжения генератора, можно экспериментально определить резонансную частоту колебательного контура LC . На резонансной частоте напряжение на параллельном колебательном контуре LC достигает своего максимального значения. Измерение напряжения на колебательном контуре LC осуществляется с помощью двухканального милливольтметра АВМ-1072АС, первый канал которого подключен параллельно колебательному контуру.

Если пренебречь омическим сопротивлением катушки индуктивности, то резонансная частота контура LC :

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Отсюда индуктивность катушки

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_p^2 C}. \quad (305.2)$$

С другой стороны, индуктивность измерительной катушки L с кольцевым ферритовым сердечником можно рассчитать по формуле

$$L = k\mu_0\mu_r N^2 h \frac{a}{D}, \quad (305.3)$$

где k – поправочный коэффициент;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

μ_r – обратимая магнитная проницаемость кольцевого феррита;

N – число витков измерительной катушки;

h – толщина ферритового сердечника измерительной катушки;

a – ширина кольцевого ферритового сердечника;

D – средний диаметр магнитной силовой линии измерительной катушки.

Из формул (305.2) и (305.3) находим

$$\mu_r = \frac{D}{4\pi^2 \mu_0 k N^2 h a C f_p^2}. \quad (305.4)$$

Из формулы (305.4) видно, что, зная размеры кольцевого ферритового сердечника измерительной катушки, число витков измерительной катушки, емкость конденсатора и измерив резонансную частоту, можно определить обратимую магнитную проницаемость.

При изменении силы тока подмагничивания будет меняться и μ_r о чем можно судить по изменению резонансной частоты f_p контура LC .

Измерительная обмотка L намотана на кольцевом феррите меньшего диаметра так, что ее магнитные силовые линии замыкаются только в кольцевом феррите меньшего диаметра (см. рис. 305.3, б). Магнитные силовые линии подмагничивающей обмотки L_1 замыкаются через кольцевой феррит малого диаметра (см. рис. 305.3, в). Такое разделение пути замыкания магнитных силовых линий переменного и постоянного магнитных полей необходимо для того, чтобы переменное магнитное поле измерительной катушки L не наводило ЭДС индукции в катушке L_1 (число витков в которой значительно больше, чем в катушке L), так как эта ЭДС создает индукционный ток в катушке L_1 , а он, замыкаясь через внешний источник питания, в свою очередь, создает переменное магнитное поле, стремящееся, согласно правилу Ленца, скомпенсировать изменение первичного магнитного поля измерительной катушки L .

Величину подмагничивающего поля H можно выразить с помощью теоремы о циркуляции вектора напряженности магнитного поля

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^N I_i. \quad (305.5)$$

Применительно к конфигурации магнитопровода лабораторной установки на основании (305.5) имеем

$$H_1 l_1 + Hl = IN_1, \quad (305.6)$$

где H_1 и H – напряженности магнитного поля в кольцевом феррите подмагничивающей и измерительной катушек соответственно;

l_1 – средняя длина феррита подмагничивающей катушки;

l – средняя длина силовой линии магнитного поля, создаваемого катушкой подмагничивания в феррите измерительной катушки;

I – ток в подмагничивающей катушке;

N_1 – число витков в подмагничивающей катушке.

Учитывая, что создаваемый подмагничивающей катушкой магнитный поток, замыкаясь через кольцевой феррит измерительной катушки, разветвляется в нем на два равных потока, запишем

$$B_1 S_1 = 2BS, \quad (305.7)$$

где B_1 и B – индукции магнитного поля в кольцевом феррите подмагничивающей и измерительной катушек соответственно;

S_1 и S – площади поперечного сечения кольцевого феррита подмагничивающей и измерительной катушек соответственно.

Учитывая также, что $B = \mu_0 \mu H$, соотношение (305.7) запишем следующим образом:

$$\mu_0 \mu H_1 S_1 = 2\mu_0 \mu HS. \quad (305.8)$$

Так как ширина кольцевых ферритов одинакова, а толщина кольцевого феррита подмагничивающей катушки вдвое больше толщины кольцевого феррита измерительной катушки, то $S_1=2S$, и так как оба кольцевых феррита имеют одинаковую марку, то

$$H_1 = H. \quad (305.9)$$

Подставляя (305.9) в (305.6), получим выражение для вычисления напряженности подмагничивающего поля в измерительной катушке

$$H = \frac{IN_1}{l + l_1}. \quad (305.10)$$

Необходимые для вычислений параметры приведены в табл. 305.1.

Таблица 305.1

$D = (8,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$ м	$a = (7,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ м	$h = (3,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ м
$l = (13,3 \pm 0,7) \cdot 10^{-3}$ м	$l_1 = (88,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-3}$ м	$k = (5,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-2}$
$C = (68 \pm 4) \cdot 10^{-9}$ Ф	$N = 100 \pm 3$	$N_1 = 700 \pm 50$

305.5. Порядок выполнения работы

1. В лабораторной работе используются двухканальные милливольтметры АВМ-1072АС двух модификаций: со светодиодными указателями установленных диапазонов измерений напряжений, а также с установкой диапазонов измерений с помощью ручек, на которых имеются указатели выбранного диапазона измерений.

В случае использования милливольтметра АВМ-1072АС со светодиодными указателями необходимо:

а) установить на задней панели милливольтметра АВМ-1072АС переключатели «LOCK, UNLOCK» и «FLOAT, GND» в нижнее положение;

б) включить питание милливольтметра АВМ-1072АС, нажав кнопку «POWER» (СЕТЬ), при этом должна загореться лампочка под надписью «PWR ON»;

в) над клавишей переключателя «ASYN, SYNC» имеются два светодиода. Нажимая эту клавишу, необходимо выбрать режим «ASYN», об установке которого свидетельствует загоревшийся над этой надписью светодиод;

г) переключателями «CH1 RANGE» и «CH2 RANGE» установить диапазоны измерения напряжений первого и второго каналов «30 mV».

В случае использования милливольтметра АВМ-1072АС с установкой диапазонов измерений с помощью ручек, на которых имеются указатели выбранного диапазона измерений, установить переключателями «CH1 RANGE» и «CH2 RANGE» диапазоны измерения напряжений первого и второго каналов «30 mV».

2. Подключить к лабораторному стенду источник питания GPS-3030DD, милливольтметр двухканальный АВМ-1072АС и генератор сигналов SFG-2110 по схеме, представленной на рис. 305.2.

3. Установить минимальное выходное напряжение генератора SFG-2110. Для этого ручку «AMPL» (АМПЛИТУДА) повернуть против часовой стрелки в крайнее положение, а затем потянуть эту ручку на себя. При этом включается добавочное ослабление выходного сигнала на 20 дБ.

4. Включить питание генератора SFG-2110, нажав кнопку «POWER» (СЕТЬ). При этом цифровой дисплей отобразит частоту выходного сигнала генератора. Над

дисплеем должен светиться индикатор «-20 dB», показывающий включение аттенюатора -20 дБ.

5. Клавишей «WAVE» (ФОРМА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА) выбрать форму СИНУС, при этом над цифрами частоты дисплея должен засветиться индикатор «~».

6. Установить с помощью клавиш цифрового набора частоту сигнала 10 кГц и после набора частоты нажать клавишу «kHz», при этом на дисплее будут видны цифры 10.0000, а под ними значение единиц измерения частоты kHz.

Остальные органы управления генератора не используются в данной лабораторной работе.

7. Установить на выходе генератора SFG-2110 напряжение 15 мВ, вращая ручку «AMPL» (АМПЛИТУДА) и контролируя это напряжение милливольтметром АВМ-1072АС (красная стрелка) в диапазоне измерений второго канала 30 mV.

8. Установить диапазон измерений первого канала милливольтметра АВМ-1072АС так, чтобы черная стрелка отклонилась примерно на 1/3 шкалы.

9. Определить частоту резонанса LC-контура по максимуму показаний КАНАЛА 1 милливольтметра, изменяя частоту генератора в диапазоне от 10 до 15 кГц. При этом целесообразно вначале изменять частоту в старшей декаде (в разряде единиц кГц), а затем, чтобы точнее определить частоту резонанса, необходимо клавишами выбора перестраиваемого разряда, находящимися под ручкой установки частоты, переходить на младшие декады (десятые доли кГц).

10. Записать значение резонансной частоты при нулевом токе подмагничивания в табл. 305.2.

11. На источнике питания GPS-3030DD нажать кнопку «AMPS» (ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ДИАПАЗОНА

ВЫХОДНОГО ТОКА) «HI/LO» (ВЕРХНИЙ / НИЖНИЙ пределы), установив его в положение «LO».

Таблица 305.2

I , мА	0	2	4	6	8	10	20	30	40
f_p , кГц									
μ_r									
H , А/м									

Окончание табл. 305.2

I , мА	50	60	70	80	90	100	120	140	160
f_p , кГц									
μ_r									
H , А/м									

12. Установить ручку «CURRENT» (ТОК) «FINE» (ТОЧНО) в крайнее положение по часовой стрелке, а ручку «CURRENT» «COARSE» (ГРУБО) в крайнее положение против часовой стрелки.

13. Установить ручки «VOLTAGE» (НАПРЯЖЕНИЕ) «FINE» (ТОЧНО) и «VOLTAGE» «COARSE» (ГРУБО) в крайние положения против часовой стрелки.

14. Включить источник питания GPS-3030DD, нажав кнопку «POWER» (СЕТЬ), при этом загорится светодиод под надписью «С.V.» (СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ).

15. Последовательно устанавливая ток в обмотке подмагничивания ручками «VOLTAGE» (НАПРЯЖЕНИЕ) в соответствии с табл. 305.2, измерить частоту резонанса LC-контура. Устанавливать заданную величину тока в обмотке подмагничивания необходимо по показаниям цифрового дисплея источника питания. Токи до 30 мА удобно устанавливать ручкой «VOLTAGE» «FINE» (ТОЧНО), при этом ручка «VOLTAGE» «COARSE» (ГРУБО) должна находиться в крайнем положении против часовой стрелки. Токи больше 30 мА необходимо уста-

навливать с помощью обеих ручек «VOLTAGE» «FINE» и «VOLTAGE» «COARSE».

16. Записать измеренные значения резонансных частот при заданных токах в обмотке подмагничивания в табл. 305.2.

17. Выключить приборы.

305.6. Обработка результатов

1. Для каждого значения тока I в обмотке подмагничивания по формуле (305.4) рассчитать обратимую магнитную проницаемость μ_r .

2. Для каждого значения тока I в обмотке подмагничивания по формуле (305.10) рассчитать напряженность поля подмагничивания H .

3. Полученные значения μ_r и H при соответствующих токах I в обмотке подмагничивания занести в табл. 305.2.

4. Построить график зависимости обратимой магнитной проницаемости μ_r от напряженности H поля подмагничивания.

5. Оценить погрешность измерения μ_r и H (при токе I в обмотке подмагничивания 10 мА).

Контрольные вопросы

1. Какова природа ферромагнетизма?
2. Что представляют собой ферриты?
3. В чем состоят особенности намагничивания ферромагнетиков?
4. Дайте определение относительной магнитной проницаемости. Каков ее физический смысл?
5. Дайте определение дифференциальной магнитной проницаемости μ_d и обратимой магнитной проницаемости μ_r . От чего они зависят?

6. Объясните нелинейную зависимость $\mu_r(H)$.
7. Чему равны предельные значения относительной, обратимой и дифференциальной магнитных проницаемостей при $H = 0$ и при $H = H_s$.
8. Что представляет собой индукция магнитного поля в ферромагнетике?
9. Объясните сущность резонансного метода определения обратимой магнитной проницаемости.
10. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора напряженности магнитного поля.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. – М.: Наука, 1988. – 496 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990. – 478 с.

**Пасичный Юрий Павлович
Нестюрина Елена Евгеньевна
Набоков Геннадий Михайлович
Доценко Игорь Борисович
Филиппева Наталья Николаевна
Сластен Михаил Иванович
Какурина Наталья Андреевна
Фатеева Валентина Афанасьевна
Комарова Екатерина Михайловна
Какурин Юрий Борисович**

**Практикум по дисциплине
ФИЗИКА
раздел ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Ответственный за выпуск Какурин Ю.Б.
Редактор Селезнева Н.И.
Корректор Селезнева Н.И.

ЛР № 020565 от 27.06.97 г. Подписано к печати
Формат 60x841/16. Бумага офсетная. Офсетная печать.
Усл. п. л. – 5,5. Уч–изд. л.– 5,0.
Заказ № . Тираж 100 экз.

«С»

Издательство Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44
Типография Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1