

# Исследование резонансных явлений в ферритовых образцах

САНДОВСКИЙ В.А.

*Приведены результаты экспериментального исследования резонансных явлений в ферритовом стержне. Выявлено семь дискретно расположенных зон в диапазоне частот от 70 до 200 кГц, в которых зависимости фазы и амплитуды колебаний от частоты проявляются непрерывно и в основном монотонно. В этом же диапазоне в промежутках между зонами выявлены участки резонансного поглощения сигнала. Результаты приведены в виде графиков на комплексной плоскости, а также в виде зависимости амплитуды сигнала от возбуждающей частоты. Резонансное поглощение объясняется на основе общей теории твердого тела и теории колебаний в резонансных системах. Описаны методика измерений и схема экспериментальной установки.*

**Ключевые слова:** ферромагнитный резонанс, резонансный контур, феррит, электромагнитное поле, поглощение сигнала, обменная энергия

Известен ряд различных магнитных резонансов (ядерный магнитный (ЯМР), электронный парамагнитный (ЭПР), ферромагнитный (ФМ), спин-волновой (СВР) и др.) [1–4], имеющих как теоретическое, так и практическое значение. Ядерный магнитный резонанс является весьма эффективным средством исследований не только в физике твердого тела, но также и в органической химии, где он используется для идентификации сложных молекул и определения их структуры. Этот резонанс характеризуется явлением резонансного поглощения энергии высокочастотного электромагнитного поля при помещении исследуемых образцов в сильное постоянное магнитное поле, напряженность которого в эксперименте плавно изменяют и таким путем снимают резонансную кривую.

Явление ФМ в области микроволновых частот в принципе аналогично ядерному спиновому резонансу. Полный магнитный момент образца прецессирует вокруг направления постоянного магнитного поля, при этом энергия внешнего переменного поля, действующего в поперечном направлении относительно направления постоянного поля, начинает сильно поглощаться, когда его частота становится равной частоте прецессии.

При ЭПР постоянное магнитное поле увеличивает подвижность электронных уровней электронов с противоположными спинами, находящимися в одном и том же орбитальном состоянии [2]. В ме-

*Results from an experimental study of resonance phenomena in a ferrite bar are presented. Seven discretely located zones in the frequency band from 70 to 200 kHz are revealed in which the dependences of oscillation phase and amplitude show a continuous and predominantly monotonic behavior. Domains characterized by resonance absorption of the signal in the gaps between zones are revealed in the same frequency band. The study results are presented in the form of graphs on a complex plane and also as a dependence of signal amplitude on the exciting frequency. Resonance absorption is explained in terms of the general theory of solid body and the theory of oscillations in resonance systems. The measurement procedure and the schematic design of the experimental installation are described.*

**Key words:** ferromagnetic resonance, resonance loop, ferrite, electromagnetic field, signal absorption, exchange energy

таллах это вызывает перераспределение электронов с различной ориентацией спинов, в результате чего возникает магнитный момент.

Для указанных выше типов магнитных резонансов характерным является использование постоянных полей с большими значениями напряженности и высокими частотами. Тем не менее при изучении свойств магнитных металлов и сплавов оказывается возможным заметить в них резонансные явления и при отсутствии постоянного магнитного поля. Однако эти явления выражены весьма слабо, так как энергия переменного поля в металлах затрачивается на создание в них вихревых токов. Поэтому возникает предположение о возможности обнаружения подобных резонансов в ферритах в более явственной форме, поскольку в этих материалах практически отсутствуют вихревые токи из-за их чрезвычайно низкой электропроводности.

Для исследований был выбран феррит марки Ф600, широко применяемый в радиотехнической аппаратуре. Цилиндрический стержень диаметром 8 мм и длиной 100 мм использовали в качестве исследуемого образца. Эксперимент был запланирован так, чтобы электромагнитное поле в образце возбуждалось в одном месте, а измерение проводилось в другом месте образца. При этом магнитное поле возбуждающей катушки в меньшей степени влияет на сигнал измерительной катушки непосредственно, а в большей мере благодаря продвижению намагниченности вдоль образца [5]. Из-за

этого сигнал измерительной катушки зависит как от магнитной проницаемости ферритового образца, так и от магнитной вязкости материала [6].

**Описание измерительной установки.** На рис. 1 показана структурная схема установки, состоящей из генератора синусоидального напряжения 1, двух соосно расположенных катушек – намагничивающей 2 и измерительной 3, опорного резистора 5, частотомера 6 (марка ЧЗ-33), вольтметра 7 (В7-65/2) и фазометра 8 (Ф2-34). Для повышения чувствительности метода к изучаемым процессам намагничивающая и измерительная катушки размещены вдоль оси испытуемого образца. Расстояние между катушками было принято 11 мм. Цилиндрический образец 4 расположен внутри катушек, при этом поток индукции, возбуждаемый катушкой 2, создает в катушке 3 напряжение, зависящее от магнитных свойств образца 4. Заметим, что традиционно в результатах исследований используют так называемый относительный сигнал катушки 3, равный отношению сигнала этой катушки к образцу к сигналу этой же катушки без образца. Точность эксперимента при этом повышается, так как некоторая нестабильность значения исходного напряжения генератора при этом исключается и, кроме того, результаты исследований удается представить в более общем виде.

В экспериментах напряженность магнитного поля, создаваемого катушкой 2, не превышала 0,3 А/см, т.е. перемагничивание образца 4 происходило в линейной области.

Для исследований кроме ферритового использовались металлические цилиндрические образцы диаметром 8 и длиной 160 мм. Катушки 2 и 3 намотаны на жестком каркасе, так что расстояние между ними остается постоянным при всех измерениях. Обе катушки выполнены тонким проводом для уменьшения их сечения с целью математического моделирования. В электродинамическом плане анализ результатов исследований выполняется с помощью двухвитковой математической модели, состоящей из двух одинаковых соосных витков, расположенных на расстоянии  $L$  друг от друга [7]. При расчете по этой модели катушки 2 и 3 заменя-

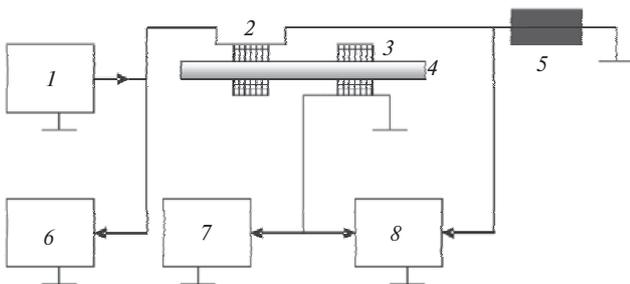


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

ются витками и используются следующие соотношения [7]:

$$V_{\text{отн}} = V_2 / V_1, \quad (1)$$

где  $V_{\text{отн}}$  – относительный сигнал измерительной катушки;  $V_1$  – сигнал измерительной катушки в отсутствие образца;  $V_2$  – составляющая сигнала измерительной катушки, вносимая измеряемым образцом.

Сигнал  $V_1$  определялся по формуле

$$V_1 = \omega m_0 I d \frac{1}{4k} [(2 - k^2)K - 3E], \quad (2)$$

где  $k = 2 \sqrt{\frac{1}{4 + x^2}}$ ;  $x = z/d$ ;  $\omega = 2\pi f$ ;  $I$  – ток в возбуж-

дающем поле витке;  $f$  – частота этого тока;  $m_0$  – магнитная постоянная;  $d$  – диаметр витков;  $D$  – диаметр образца;  $K$  и  $E$  – полные эллиптические интегралы от параметра  $k$ ;  $z = 2L/D$ ;  $d = d/D$ ;  $L$  – расстояние между витками.

Сигнал  $V_2$  определялся как

$$V_2 = j \omega m_0 I d \frac{d^{\neq}}{2} \int_0^{\neq} K_1^2(dx) F(x) \cos(zx) dx, \quad (3)$$

$j = \sqrt{-1}$ ;  $K_1$  – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка;

$$F(x) = \frac{m x I_0(x) I_1(Y) - Y I_1(x) I_0(Y)}{m x K_0(x) I_1(Y) + Y K_1(x) I_0(Y)}; \quad (4)$$

$I_0, I_1, K_0, K_1$  – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого и первого порядков;

$$Y = \sqrt{x^2 + j b^2}; \quad b = \frac{D}{2} \sqrt{2 \rho / \mu m_0 s}; \quad (5)$$

$m$  – магнитная проницаемость и  $s$  – удельная электрическая проводимость материала образца.

Сигнал измерительной катушки определялся как сумма исходного сигнала  $V_1$  и сигнала, внесенного измеряемым образцом  $V_2$ :

$$V = V_1 + V_2, \quad (6)$$

а относительный сигнал измерительной катушки –

$$U = V / V_1 = V_2 / V_1 + 1. \quad (7)$$

**Экспериментальные измерения.** В эксперименте вначале регулированием генератора устанавливается частота синусоидальных колебаний, затем измеряется вольтметром напряжение  $V_1$  катушки 3 без образца, после чего вставляется ферритовый стержень диаметром 8 мм и измеряется напряжение  $V$  этой же катушки, а также с помощью фазометра – фазовый угол  $j$ . При этом относительный сигнал  $U$

определяется как  $U = V / V_1$ . Интерпретация результатов измерений, так же как и в случае исследований металлических образцов, наносится на комплексную плоскость (см. рис. 2). На графике по оси ординат указываются значения  $ImU = U \sin j$ , а по оси абсцисс —  $ReU = U \cos j$ .

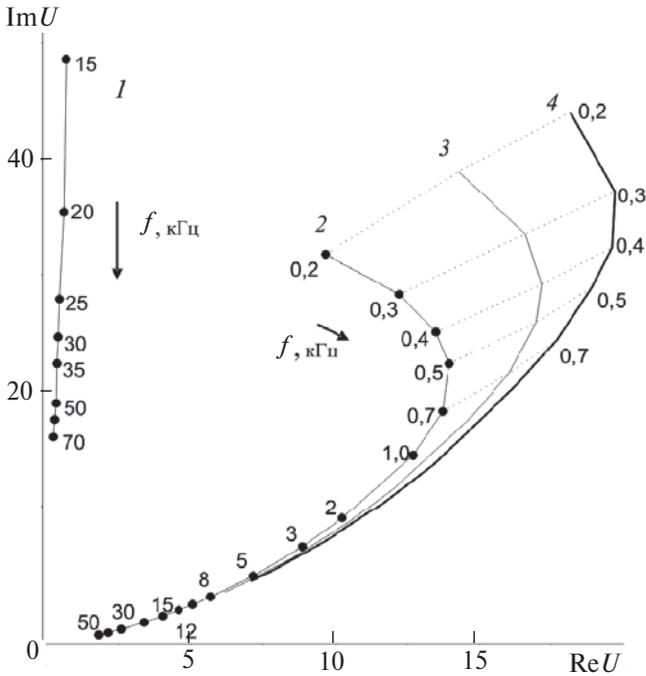


Рис. 2. Результаты измерения для экспериментального ферритового образца и расчетные зависимости для стальных образцов с удельной электрической проводимостью  $s = 4,8$  МСм/м и магнитной проницаемостью  $m = 25; 35$  и  $45$  (2, 3 и 4)

На рис. 2 на кривой 1 показаны результаты экспериментов при измерениях образца в виде ферритового стержня в диапазоне частот от 15 до 70 кГц. С увеличением частоты значение мнимой составляющей сигнала  $U$  быстро уменьшается. Для сравнения на рис. 2 приведены кривые 2, 3 и 4, рассчитанные по (1)–(7) для трех постоянных вещественных значений магнитной проницаемости: 25, 35 и 45 соответственно (образцы из стали) при  $z = 2,6$ ;  $d = 1,2$ ;  $s = 4,8$  МСм/м. Эти кривые при увеличении частоты стремятся к минимуму, который свидетельствует о достижении сильно развитого поверхностного эффекта. Кривая для феррита существенно отличается от рассчитанных кривых для стальных образцов, поскольку удельная электрическая проводимость феррита много меньше, чем у металлов. Однако анализ кривых для стальных образцов показывает, что дальнейшее увеличение частоты предполагает исследования в области предельного поверхностного эффекта.

**Резонансы в ферритовом стержне.** Методика измерений и способ интерпретации их результатов ничем не отличаются от описанных выше, за ис-

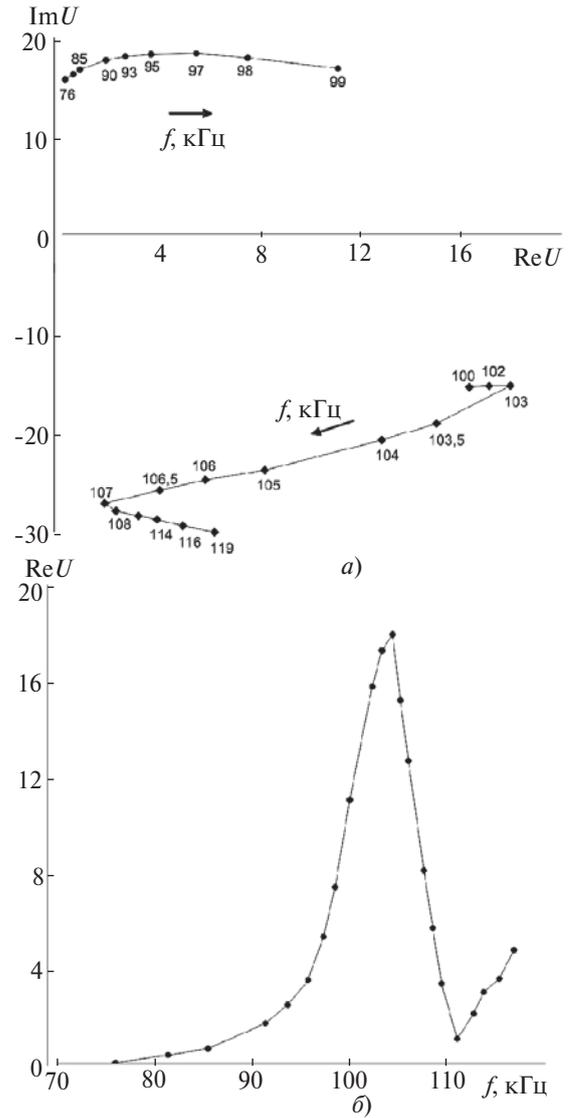


Рис. 3. Результаты измерений для ферритового образца: а – в диапазоне от 76 до 99 кГц и от 102 до 119 кГц; б – резонансная кривая для вещественной части сигнала в этих диапазонах

ключением того, что исследования выполняются в диапазоне более высоких частот, а для интерпретации результатов используется вся комплексная плоскость.

На рис. 3,а показаны кривые, снятые в диапазоне частот 76–99 и 100–119 кГц. Как видно из рисунка, при переходе от частоты 99 к 100 кГц происходит разрыв. Для того чтобы показать резонанс в более привычной форме, построен график на рис. 3,б для вещественной части измеряемого сигнала. На нем четко вырисовывается резонансная кривая. На рис. 4,а–в показаны результаты измерений на других частотах. Всего в диапазоне от 70 до 200 кГц для данного образца феррита насчитывается семь дискретно расположенных зон:

Номер зоны	1	2	3	4	5	6	7
Диапазон частот $f$ , кГц	76–99	100–119	120–130	131–137	140–152	154–172	173–200

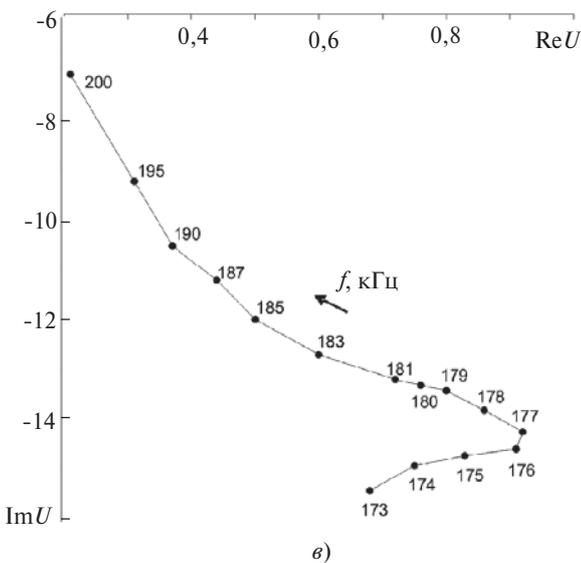
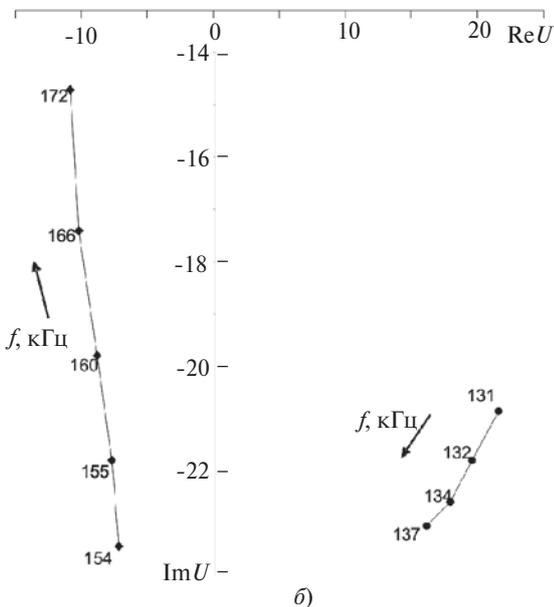
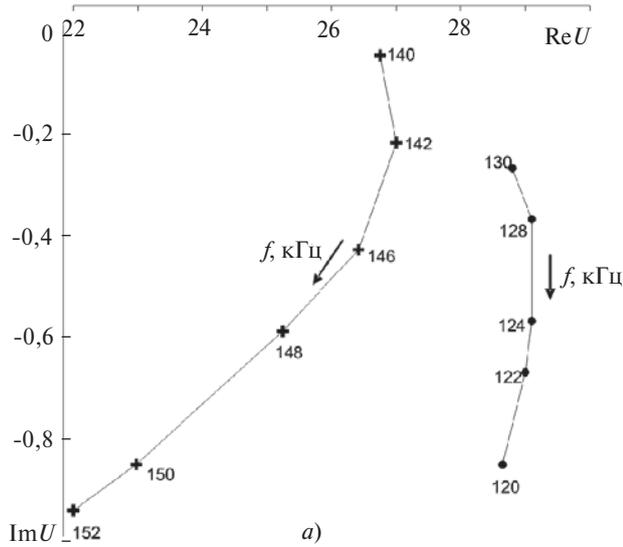


Рис. 4. Результаты измерений для ферритового образца в диапазоне: а – от 120 до 130 кГц и от 142 до 152 кГц; б – от 131 до 137 и от 154 до 172 кГц; в – от 173 до 200 кГц

Между зонами наблюдаются интервалы частот, в которых сигнал измерительной катушки практически отсутствует (как, например, в интервале от 72 до 76 кГц). Другие такие интервалы (резонансы поглощения) указаны ниже:

Номер участка	1	2	3	4	5	6
Частота начала интервала $F_H$ , кГц	72	99	119	130	137	152
Частота конца интервала $f_K$ , кГц	76	100	120	131	140	154
Ширина полосы $f$ , кГц	4	1	1	1	3	2

Здесь приводится также разность частот  $f_K$  и  $f_H$ , определяющая ширину полосы, в которой сигнал отсутствует.

Для сопоставления экспериментальных кривых в различных зонах на рис. 5 построен график амплитудных значений сигнала  $U_a = |U|$  в рассматриваемом диапазоне.

Полученная кривая оказалась также разбита на семь участков, которые прерываются из-за отсутствия сигнала при соответствующих значениях частоты. Если пренебречь разрывами, то с учетом изменения амплитуды сигнала в зависимости от частоты на графике можно увидеть общую резонансную кривую с максимумом в области частот 120–140 кГц.

**Анализ результатов экспериментов.** До перехода к исследованиям резонансных явлений необходимо было рассмотреть измеряемые сигналы для испытуемых образцов в области частот, в которой действуют законы электродинамики. Переход к области более высоких частот следует после достижения предельно сильного поверхностного эффекта в металлических образцах. В феррите при этом оказалось возможным наблюдать непосредственно резонансные явления, обусловленные законами физики твердого тела.

Для объяснения полученных экспериментальных результатов понадобятся некоторые термины и понятия, используемые в учебниках физики твердого тела [1, 2]. Магнитные моменты в образцах создаются электронными спинами, которые имеют индивидуальную направленность. В ферромагнитных материалах спины располагаются в отдельных областях, называемых доменами. В соседних доменах спины могут быть направлены противоположно, а переход от одного домена к другому осуществляется за счет монотонного изменения направления в пределах узкой области, называемой границей, или доменной стенкой (стенка Блоха).

Известный электронно-спиновый резонанс [1] наблюдают при помещении испытуемого образца в сильное постоянное магнитное поле и переменное высокочастотное поле (используются поля частотой от единиц до десятков гигагерц). При этом возбуждаются спиновые волны, электронные спины

начинают прецессировать в постоянном магнитном поле, энергия переменного поля поглощается. Процесс поглощения происходит в узком интервале изменений постоянного магнитного поля (резонансное поглощение). В нашем эксперименте отсутствует постоянное магнитное поле, а частота переменного поля много меньше. Однако если предположить, что в нашем случае также возможны вышеописанные явления и роль постоянного магнитного поля выполняет переменное поле, то появляется возможность объяснить полученные нами результаты. При этом результат исследований в виде достаточно сложной картины распределения резонансов между отдельными зонами можно объяснить на основе общей теории колебательных систем. Поскольку в нашем эксперименте образец представляет собой некоторую резонансную систему, то наиболее приемлемым объяснением может служить теория колебаний в резонансном контуре [8]. В нем рассматриваются следующие параметры: собственная резонансная частота, добротность, частота и амплитуда возбуждающего сигнала. На основании анализа системы в [8] выведено дифференциальное уравнение, включающее указанные параметры. Это уравнение приводится к уравнению Матье, общее решение которого известно. Оно представляется в виде отдельных зон, распределение которых зависит от значения и сочетания вышеуказанных параметров. Некоторые из определенных таким образом зон соответствуют возбуждению в контуре колебаний, другие — различаются степенью близости к возбуждению колебаний. Режим возбуждения колебаний в контуре с учетом сделанного выше предположения может соответствовать прецессии спинов в эксперименте. Хотя частоты в нашем эксперименте много меньше, тем не менее, ряд авторов отмечают возможность возбуждения магнитных моментов и на таких частотах, называя их субгармоническими [5].

Зоны, приведенные выше, могут соответствовать зонам резонансного контура с различной способностью к возбуждению. В нашем эксперименте это зоны с различной способностью поглощать энергию переменного электромагнитного поля в зависимости от его частоты. Поглощаемая энергия преобразуется в обменную, способствующую переманиванию доменов с участием процессов смещения [1–3]. Переходя к колебаниям доменных стенок в феррите, можно назвать ряд факторов энергетического характера, которые аналогичны параметрам резонансного контура. В слабом поле, что характерно для нашего эксперимента, намагниченность образца происходит только за счет процессов смещения [1–3], но амплитуда колебаний доменных стенок (или магнитная проницаемость

феррита в данном режиме) зависит от обменной энергии доменов. Этим объясняется различие амплитуды и фазы сигнала в различных зонах (рис. 3 и 4), а также и форма резонансной кривой на рис. 5.

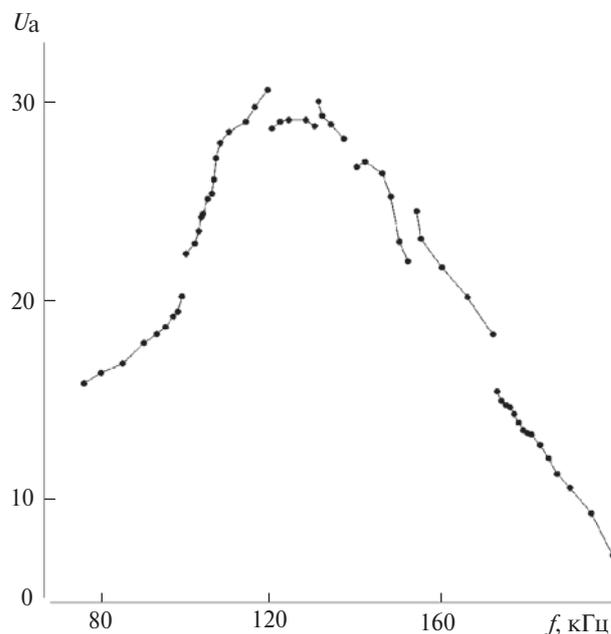


Рис. 5. Резонансная кривая при измерениях на ферритовом образце амплитуды сигнала во всех семи зонах

**Выводы.** 1. Исследования резонансных явлений в ферритовом образце, выполненные на экспериментальной установке, показали, что резонансы проявляются в диапазоне частот от 70 до 200 кГц, причем этот диапазон делится на семь дискретных зон, в каждой из которых амплитуда измеряемого сигнала изменяется непрерывно и в основном монотонно с изменением частоты. В промежутках между зонами сигнал отсутствует, что предположительно объясняется эффектом резонансного поглощения. Показано также, что различие амплитуды и фазы измеряемого сигнала в разных зонах объясняется различной степенью поглощения энергии переменного поля в зависимости от его частоты.

2. Изменение магнитных свойств феррита в зависимости от частоты является результатом перехода поглощаемой энергии переменного электромагнитного поля в обменную энергию, способствующую увеличению амплитуды колебательных движений доменных границ. Это явление объясняется на основе общей теории колебательных систем, которая предусматривает разделение на зоны результата решения дифференциального уравнения Матье, включающего параметры резонансной системы.

3. Отметим, что изучение резонансов в феррите не ограничивается только интересом к данному материалу. Некоторое влияние резонансных свойств доменов отмечено и в металлических образцах, но из-за высокой электропроводности они проявляются

весьма слабо. Об этом свидетельствуют многочисленные измерения частотной зависимости магнитной проницаемости [7] в образцах из разных марок сталей, которые из-за различного химического состава содержат составляющие с различной доменной структурой.

---

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Киттель Ч.** Введение в физику твердого тела. — М.: Наука, 1978, 792 с.
2. **Вонсовский С.В., Шур Я.С.** Ферромагнетизм. — М.; Л.: Гос. изд-во технико-технической литературы. 1948, 816 с.
3. **Займан Дж.** Принцип теории твердого тела. — М.: Мир, 1974, 472 с.
4. **Гуревич А.Г.** Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках.— Наука, 1973, 591 с.
5. **Саланский Н.М., Ерухимов М.Ш.** Физические свойства и применение магнитных пленок. — Новосибирск, Наука, 1975, 222 с.
6. **Кадочников А.И.** Теория слабого поверхностного эффекта, учитывающая магнитную вязкость с малым временем релаксации. *Физика металлов и металловедение*, 1997, вып. 83, № 1, с. 48–58.
7. **Сандовский В.А., Дякин В.В., Дударев М.С.** Исследование частотной зависимости магнитной проницаемости ферромагнитных стержней в неоднородном поле. — *Дефектоскопия*, 1999, № 4, с. 47–55.
8. **Гоноровский И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Советское Радио, 1963, 695 с.

[24.97.12]

*Автор: Сандовский Владимир Аронович в 1962 г. окончил радиотехнический факультет Уральского политехнического института им. С.М. Кирова. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию «Решение задач электродинамики в неразрушающем контроле и развитие электромагнитных методов определения механических свойств изделий». Ведущий научный сотрудник Института физики металлов РАН.*