

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)**

Кафедра «Электротехника, метрология и электроэнергетика»

Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДОТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

***Методические указания
к лабораторным работам***

МОСКВА – 2008

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)**

Кафедра «Электротехника, метрология
и электроэнергетика»

Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДОТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рекомендовано редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний для студентов
электротехнических специальностей

Москва – 2008

УДК 621.315.5
К-28

Касаткин Г.С., Федотов В.В. Исследование свойств магнитных материалов: Методические указания к лабораторной работе. - М.: МИИТ, 2008. – 20 с.

Приведены теоретические сведения об основных свойствах и применении магнитомягких ферромагнетиков и методике измерения их параметров с помощью феррометра. Теоретический и экспериментальный материал необходим для лучшего усвоения дисциплины «Электротехнические материалы».

© **Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), 2008**

- 20 -

Учебно – методическое издание

Касаткин Георгий Сергеевич, Федотов Виктор Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к лабораторной работе

Подписано к печати:
усл.-печ.л. 1,25
Заказ:

Формат: 60x84/16
Тираж 200 экз.
Изд. №

127994, Москва, ул.Образцова, 15
Типография МИИТа

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение и анализ основных магнитных характеристик электротехнической стали, пермаллоя и феррита.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Основные характеристики ферромагнитных материалов

Явление ферромагнетизма связано с образованием внутри некоторых материалов небольших областей (размером около 0,001-10 мкм) - магнитных доменов. В каждом из них электронные спины (вращение электронов вокруг собственных осей) ориентированы параллельно друг другу и одинаково направлены.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных доменов направлены самопроизвольно и в самых различных направлениях. Поэтому магнитный поток ферромагнитного материала во внешнем пространстве будет равен нулю.

Под влиянием внешнего магнитного поля происходит намагничивание ферромагнитного материала. При этом растут объёмы доменов, магнитные моменты которых составляют наименьший угол с направлением напряженности поля H , и магнитные моменты всех доменов ориентируются по направлению вектора H . Схема ориентации магнитных моментов доменов при намагничивании ферромагнетика показана на рис.1.

В процессе намагничивания растёт величина индукции B ферромагнетика. Примерная форма

зависимости $B = f(H)$ - кривая намагничивания, изображена пунктиром на рис.2.

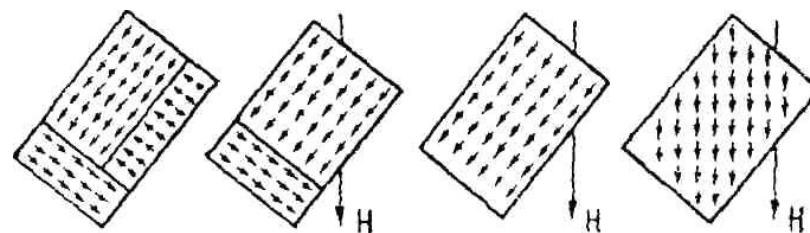


Рис.1 Схема ориентации спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика.

При определенной максимальной величине напряженности H_{max} происходит техническое насыщение материала, когда величина индукции достигает максимального значения B_{max} , дальнейший рост её крайне незначителен.

При работе ферромагнетика в переменном магнитном поле (при изменении направления и величины H) изменения индукции B имеет форму петли, изображенной сплошной линией на рис.2. Эта петля называется петлей перемагничивания. Петля, вершинами которой являются точки: (B_{max}, H_{max}) и $(-B_{max}, -H_{max})$ называется предельным гистерезисным циклом. Кроме величин B_{max} и H_{max} этот цикл характеризуется коэрцитивной силой H_c и остаточной индукцией B_r (см. рис.2).

По величине H_c предельного гистерезисного цикла ферромагнетики делят на магнитомягкие - с малыми значениями H_c (менее 4 кА/м) и магнитотвердые - с большими значениями H_c (больше 4 кА/м). Последние используются для изготовления постоянных магнитов. Петли гистерезиса, у которых отличие B_r от B_{max} не превышает 2÷5 % (т.е. $0,9 \leq B_r / B_{max} < 1$), называют прямоуглыми. Ферромагнетики с ППГ (с

прямоугольными петлями гистерезиса) применяют в ячейках памяти электронно-вычислительных машин, магнитных усилителях и других устройствах автоматики.

Площадь петли перемагничивания в переменном магнитном поле пропорциональна потерям на перемагничивание за один цикл.

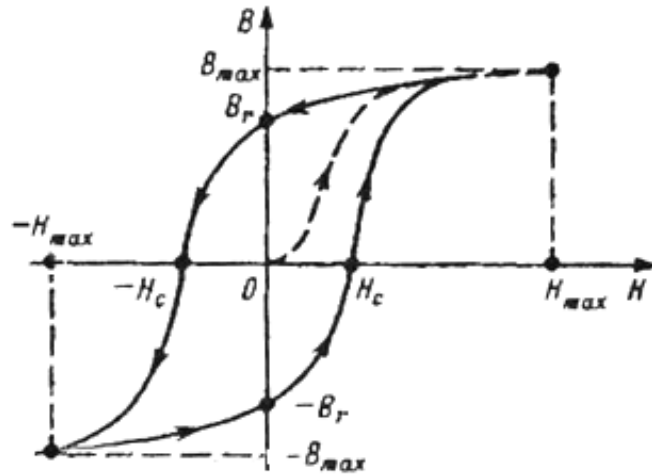


Рис.2 Петля магнитного гистерезиса

Потери на перемагничивание включают потери на гистерезис и вихревые токи. Потери на гистерезис связаны с необратимыми процессами смещения границ доменов и поворотом их магнитных моментов. Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть определена по формуле:

$$P_{Г} = K_{Г} f B_{max}^n V, \quad (1)$$

где $K_{Г}$ - коэффициент, зависящий от материала;

f - частота тока;

n - показатель степени, равный $1,6 \div 2$;

V - объём ферромагнетика.

Вихревые токи, индуцированные в ферромагнетике, вызывают потери. Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле:

$$P_{В} = K_{В} f^2 B_{max}^2 V, \quad (2)$$

где $K_{В}$ - коэффициент, зависящий от типа ферромагнетика.

Как следует из выражений (1) и (2) величина $P_{Г}$ зависит от первой степени f , а $P_{В}$ - от квадрата f . Т.е. с ростом частоты f потери $P_{В}$ резко возрастают и их приходится учитывать в первую очередь. Вихревые токи и вызываемые ими потери снижаются за счет увеличения сопротивления ферромагнетика. Поэтому ферромагнетики, предназначенные для работы на повышенных и высоких частотах, должны иметь высокое удельное сопротивление. Важным параметром магнитного материала является относительная магнитная проницаемость μ , которая определяется по основной кривой намагничивания (пунктир на рис.2) как отношение индукции B к напряженности H магнитного поля в данной точке кривой намагничивания:

$$(3)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

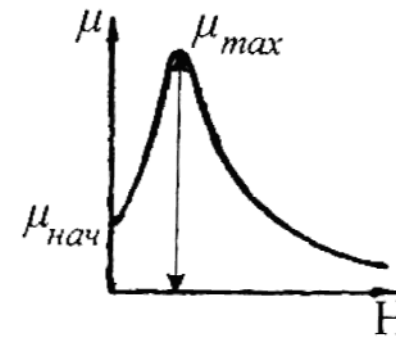


Рис.3 Зависимость $\mu=f(H)$

Различают начальную магнитную проницаемость $\mu_{нач}$ при $H \approx 0$ и максимальную проницаемость μ_{max} . Примерный вид зависимости $\mu = f(H)$ изображён на рис.3. Величины μ_{max} у ферромагнетиков значительно больше 1.

2.2. Основные магнитомягкие ферромагнетики

Для работы на постоянном и переменном токах низкой частоты широко используют электротехнические стали.

Применяют две основные разновидности магнитомягких электротехнических сталей: низкоуглеродистые стали и кремнистые стали.

Отечественная промышленность выпускает свыше 35 марок кремнистых электротехнических сталей.

Присутствие кремния в стали улучшает ее состав, поскольку кремний связывает часть растворённых в металле газов и в первую очередь кислород.

Легирование кремнием оказывает благоприятное действие на магнитные свойства стали: снижается ее магнитострикция, сталь приобретает более крупнозернистую структуру. Это приводит к увеличению магнитной проницаемости стали, снижению коэрцитивной силы и потерь при перемагничивании. Вместе с тем кремний неблагоприятно влияет на механические свойства стали, повышая ее твердость и хрупкость. При содержании кремния свыше 5% снижается индукция материала, затрудняется прокатка и штамповка стали.

Одним из путей уменьшения потерь на вихревые токи в листах низкоуглеродистой стали является повышение ее удельного электрического сопротивления. При легировании такой стали кремнием последний образует с железом твердый раствор и повышает сопротивление стали в 2 - 6 раз.

Кремнистые стали изготавливают двумя способами: *горячей* и *холодной прокаткой*. По уровню магнитных свойств, геометрической точности листа и качеству отделки холоднокатаные стали существенно превосходят горячекатаные и постепенно вытесняют последние.

Сталь маркируется четырьмя цифрами: первая означает структурное состояние и вид прокатки (1 - горячекатаная изотропная, 2 - холоднокатаная изотропная, 3 - холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой); вторая - примерное содержание кремния; третья - основные нормируемые характеристики [0 - удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$), 1 - при индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,5/50}$), 2 - при индукции 1 Тл и частоте 400 Гц ($P_{1/400}$), 6 - магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$), 7 - магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10})]. Вместе первые три цифры означают тип стали, четвертая - порядковый номер типа стали.

Электротехническая сталь выпускается в виде отдельных листов, рулонов или ленты и предназначается для изготовления магнитопроводов. Для уменьшения потерь на вихревые токи на листы стали может быть нанесен электроизоляционный лак.

Сплавы железа с никелем, называемые также *пермаллоями*, обладают при определенном соотношении компонентов высокими магнитными свойствами. Пермаллои представляют собой сплавы железа с никелем или железа с никелем и кобальтом, обычно легированные молибденом, хромом и другими элементами.

Пермаллои подразделяются на высоконикелевые (72...80% никеля) и низконикелевые (40... 50% никеля).

Магнитные свойства пермаллоев сильно зависят от химического состава и наличия примесей в сплаве. На

свойства пермаллоев отрицательно влияют примеси, которые не образуют твердых растворов со сплавом: углерод, сера и кислород. Свойства резко изменяются от режимов термообработки.

Магнитная проницаемость высоконикелевых пермаллоев выше, чем низконикелевых, и значительно превышает проницаемость электротехнических сталей, но индукция насыщения пермаллоев в 1,5...2 раза меньше; следовательно, их нецелесообразно применять в силовых трансформаторах и других устройствах, в которых используется большой магнитный поток.

Удельное электрическое сопротивление низконикелевых пермаллоев в 2 раза выше высоконикелевых, поэтому их можно использовать при более высоких частотах.

Стоимость высоконикелевых пермаллоев больше, чем низконикелевых, но они менее технологичны.

Для улучшения свойств пермаллоев их легируют различными добавками. Легирование молибденом и хромом увеличивает удельное электрическое сопротивление и начальную проницаемость, позволяет упростить технологию получения, уменьшает чувствительность к механическим напряжениям, но снижает индукцию насыщения. Медь благоприятно влияет на температурную стабильность и стабильность магнитной проницаемости при изменении напряженности внешнего поля. Кремний и марганец увеличивают удельное сопротивление.

Пермаллои делятся на 4 группы:

нелегированные низконикелевые пермаллои - марок 45Н и 50Н (содержание никеля 45 и 50%);

сплавы, обладающие текстурой и прямоугольной петлей гистерезиса - 50НП, 65НП, 34НКП;

низконикелевые пермаллои (50% Ni), легированные хромом и кремнием - 50НХС;

высокониелевые пермаллои, легированные соответственно молибденом, хромом и кремнием, хромом и медью - 79НМ, 80НХС, 76НХД, 79НМУ.

Все сплавы содержат в небольших количествах марганец и кремний. В марках пермаллоев буква Н означает никель, М - марганец, Х - хром, Д - медь, К - кобальт, С - кремний, П - прямоугольную петлю гистерезиса. Сплавы с улучшенными свойствами обозначают дополнительно буквой У.

Сплавы изготавливаются в виде холоднокатаных лент толщиной 0,02...2,5 мм, шириной 30...250 мм, горячекатаных листов, горячекатаных и кованых прутков.

Сплавы 45Н и 50Н обладают наиболее высокой индукцией насыщения, поэтому их применяют для сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей и деталей магнитных цепей, которые работают при повышенных индукциях без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием. Сплав 50НХС обладает повышенным сопротивлением и используется для сердечников импульсных трансформаторов, а также в устройствах связи для звуковых частот.

Высокониелевые сплавы 79 НМ, 80 НХС, 76 НХД применяются для сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов, при толщине 0,02 мм - для сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей.

Основное преимущество *пермаллоев* - высокие значения магнитной проницаемости в слабых полях и малое значение коэрцитивной силы. Недостатками пермаллоев являются большая чувствительность магнитных свойств к механическим напряжениям, пониженные значения индукции насыщения по сравнению

с электротехническими сталями и сравнительно высокая стоимость. Необходимо также учитывать, что высокие магнитные свойства у пермаллоев могут быть получены лишь в результате отжига готовых изделий в водороде или вакууме, что усложняет их изготовление.

Пермаллои находят широкое применение в магнитных элементах измерительных, автоматических и радиотехнических устройств при их работе в слабых постоянных и переменных полях с частотой до нескольких десятков кГц, а для микронного проката и до более высоких частот.

Магнитные материалы, используемые при высоких частотах (от единиц до десятков мГц) и при сверхвысоких частотах (от сотен до десятков тысяч мГц), должны иметь малую электрическую проводимость. Этому требованию отвечают ферриты.

Ферриты представляют собой магнитную керамику, получаемую спеканием смеси оксида железа Fe_2O_3 с оксидами металлов. По типу электропроводности ферриты относятся к оксидным полупроводникам и имеют удельное сопротивление $10^5 - 10^{10}$ Ом·м.

Отечественная промышленность выпускает десятки марок различных типов ферритов: магнитомягких, магнитотвердых, для СВЧ - диапазона, с прямоугольной петлей гистерезиса и др., различающихся составом, требованиями к магнитным свойствам, к их стабильности и воспроизводимости. В зависимости от этих факторов для каждой марки феррита отрабатывается свой технологический процесс изготовления. К наиболее широко используемым магнитомягким, в первую очередь, относят никель-цинковые и марганец-цинковые ферриты, представляющие собой трехкомпонентные системы $NiO-ZnO-Fe_2O_3$ и $MnO-ZnO-Fe_2O_3$.

Первые по сравнению со вторыми имеют большие по величине ρ и большую рабочую частоту (до сотен МГц). Вторые имеют большие величины μ_{max} , B_{max} и температуры Кюри, при превышении которой теряются магнитные свойства материала.

Магнитомягкие ферриты маркируются следующим образом: на первом месте ставится примерное значение магнитной проницаемости, затем стоят буквы, определяющие частотный диапазон. Ферриты для частот 0,1 ...50 МГц обозначают буквой Н (низкочастотные), для диапазона 50...600 МГц высокочастотные ферриты обозначаются ВЧ. Далее в маркировке следуют буквы, означающие состав материала: М - марганец-цинковые, Н - никель-цинковые и т.д. Никель-цинковые ферриты маркируются также маркой ВЧ.

Магнитная проницаемость магнитомягких ферритов составляет $\mu_{нач}=20 - 20000$ и $\mu_{max} = 45 - 35000$. Ферриты, у которых $\mu_{нач}=400 - 20000$ в слабых полях во многих случаях эффективно заменяют листовые железоникелевые сплавы и электротехническую сталь. Однако в средних и сильных полях низкой частоты использование магнитомягких ферритов нецелесообразно, поскольку они имеют в 2 - 3,5 раза более низкую индукцию насыщения, чем металлические магнитные материалы

Ферриты с ППГ широко применяются для запоминающих устройств вычислительной техники.

Примерные параметры электротехнических сталей и пермаллоев, а также ферритов различных марок приведены в приложении в табл. П1 и П2.

2.3. Установка для исследования характеристик ферромагнетиков

Схема лабораторной установки приведена на рис. 4. Здесь 1, 2 и 3 - тороидальные сердечники из электро-технической холоднокатаной текстурованной стали, высоконикелевого пермаллоя и марганец-цинкового феррита. Первичные обмотки этих сердечников с числом витков w_1 подключается к выходу генератора синусоидальных колебаний (выход ГЗ) через резистор R , служащий для ограничения тока, и первичную обмотку катушки взаимной индукции "К". Вторичная обмотка этой катушки подключается к входу U_H феррометра с цифровым отсчетом. Вторичные обмотки сердечников w_2 оказываются при этом подключенными ко входу U_B феррометра. Для визуального наблюдения за формой кривой перемагничивания ферромагнетиков используется электронный осциллограф.

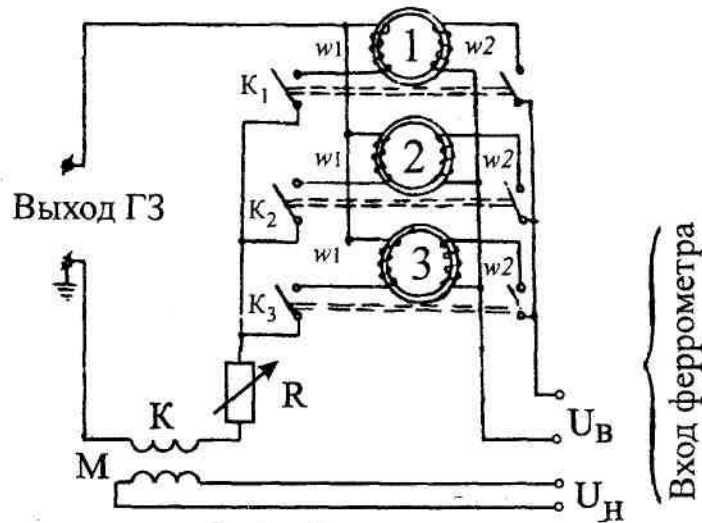


Рис.4 Схема установки

Величины напряженностей магнитного поля ферромагнетика H при различных значениях токов, протекающих по виткам его первичной обмотки, определяются по формуле:

$$H = \frac{U_H}{M} \quad (4)$$

где H - величина напряженности магнитного поля ферромагнетика, А/м;

w_1 - число витков намагничивающей (первичной) обмотки сердечника из исследуемого ферромагнетика;

R_{cp} - средний радиус тороидального сердечника, м;

f - частота перемагничивания, Гц;

U_H - показания феррометра (левое табло), В;

- постоянный коэффициент

ферромагнетика;

M - коэффициент взаимной индукции катушки "К" (рис. 4).

Величины индукции B ферромагнетика для соответствующих значений напряженности H могут быть рассчитаны по формуле:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (5)$$

где B - величина индукции ферромагнетика, Тл;

S_c - сечение сердечника ферромагнетика, м²;

w_2 - число витков измерительной (вторичной) обмотки сердечника из исследуемого ферромагнетика;

U_B - показания феррометра (правое табло), В;

- постоянный коэффициент ферромаг-

нетика.

Величины относительной магнитной проницаемости μ ферромагнетика определяются по формуле:

$$\mu = \frac{B}{H \cdot \mu_0} \quad (6)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

3. Экспериментальная часть работы

3.1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки и включить тумблеры "сеть" измерительного генератора (ГЗ), феррометра и электронного осциллографа. Рукоятка "выход" генератора должна быть установлена в крайнее левое положение, а рукоятка регулировки частоты в положение, соответствующее 50 Гц.

3.2. Замкнуть ключ "К₁" на панели, где расположены образцы исследуемых ферромагнетиков. Ключи "К₂" и "К₃" должны быть разомкнуты. При этом к генератору подключается сердечник из электротехнической стали.

3.3. Плавно поворачивая вправо рукоятку "выход" генератора, получить на экране электронного осциллографа предельную петлю перемагничивания и записать показания феррометра U_H и U_B в табл.1.

3.4. Плавно поворачивая влево рукоятку "выход" генератора, записать в ту же таблицу показания U_H и U_B феррометра для десяти измеренных величин напряженности магнитного поля H .

3.5. По измеренным величинам U_H и U_B , рассчитать по формулам (4), (5) и (6) значения H , B и μ для частоты $f=50$ Гц. Коэффициенты K_H и K_B даны непосредственно в табл.1.

3.6. Поочередно замыкая ключ "К₂" (при разомкнутых ключах "К₁" и "К₃"), а затем ключ "К₃" (при разомкнутых ключах "К₁" и "К₂"), повторить измерения согласно пунктам 3.3 и 3.4. Записать показания феррометра U_H и U_B в таблицы 2 и 3 при подключении к генератору сердечников из пермаллоя и феррита

3.7. По измеренным величинам U_H и U_B рассчитать значения H , B и μ для частоты $f=50$ Гц. Коэффициенты K_H и K_B для сердечников из пермаллоя и феррита даны непосредственно в таблицах 2 и 3.

3.8. По данным таблиц построить зависимости $B=f(H)$ и $\mu=f(H)$ для каждого из исследуемых ферромагнетиков и сделать заключение об областях их применения.

Таблица 1

Данные измерений и расчетов магнитных характеристик $B=f(H)$ и $\mu=f(H)$ электротехнической холоднокатаной текстурованной стали при частоте намагничивающего тока $f=50$ Гц

Показания феррометра		Из расчета		
U_H , В	U_B , В	$B = 9,0 \cdot U_B / f = 0,18 \cdot U_B$, Тл	$H = 148 \cdot 10^2 \cdot U_H / f = 296 \cdot U_H$, А/м	$\mu = B / (H \cdot \mu_0) = 4,8 \cdot 10^2 (U_B / U_H)$

Таблица 2

Данные измерений и расчетов магнитных характеристик $B=f(H)$ и $\mu=f(H)$ высоконикелевого пермаллоя при частоте намагничивающего тока $f=50$ Гц

Показания феррометра		Из расчета		
U_H , В	U_B , В	$B = 1,4 \cdot 10^2 \cdot U_B / f = 2,8 \cdot U_B$, Тл	$H = 51,7 \cdot 10^2 \cdot U_H / f = 103 \cdot U_H$, А/м	$\mu = B / (H \cdot \mu_0) = 2,2 \cdot 10^4 (U_B / U_H)$

Таблица 3

Данные измерений и расчетов магнитных характеристик $B=f(H)$ и $\mu=f(H)$ марганец-цинкового феррита при частоте намагничивающего тока $f=50$ Гц

Показания феррометра		Из расчета		
U_H , В	U_B , В	$B = 50 \cdot U_B / f = 1,0 \cdot U_B$, Тл	$H = 10,4 \cdot 10^3 \cdot U_H / f = 208 \cdot U_H$, А/м	$\mu = B / (H \cdot \mu_0) = 3,8 \cdot 10^3 (U_B / U_H)$

4. Контрольные вопросы

4.1. Каковы основные характеристики ферромагнитных материалов?

4.2. Как зависят потери на гистерезис P_H и вихревые токи P_B от частоты f перемагничивания ферромагнетика и как расширить диапазон его рабочих частот?

4.3. Каковы разновидности, отличительные свойства и частотный диапазон электротехнических сталей, пермаллоев и ферритов?

4.4. Где применяются электротехнические стали, пермаллои и ферриты?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнические и конструкционные материалы/ Под ред. В.А. Филикова.- 2-е изд. - М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 280 с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника.- М.: Высшая школа, 1999. - 542 с.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 304 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Примерные параметры электротехнических сталей и пермаллоев

Материал	$\mu_{нач}$	μ_{max}	B_{max} , Тл	H_c , А/м	ρ , мкОм·м
Электротехническая сталь	200...600	3000... 8000	1,95...2,02	10...65	0,17...0,6
Низконикелевые пермаллои	1500... 4000	15000... 60000	1,0...1,6	5...32	0,45...0,9
Высконикелевые пермаллои	7000... 100000	50000... 300000	0,65...1,05	0,65...6	0,16...0,85
Супермаллой (пермаллой, легированный молибденом и марганцем)	100000	1500 000	0,8	0,3	0,6

Таблица П.2

Основные параметры ферритов различных марок

Марка материала	$\mu_{нач}$	μ_{max}	H_c , А/м	B_r , Тл	$T_{Кюри}$, °С	$f_{кр}$, МГц	ρ , Ом·м
20000НМ	15000	35000	0,24	0,11	110	0,01	0,001
10000НМ	8000...1500	17000	4,0	0,11	110	0,3	0,01
600НН	500...800	1500	40	0,12	110	1,2	10^2
400НН	320...500	600	56	0,13	120	2,0	10^3
150ВЧ	130...170	350	250	0,15	400	250	10^4
50ВЧ2	45...65	170	500	0,20	450	70	10^4