

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Магнитные измерения востребованы в различных областях науки и техники.

Магнитное поле является формой материи со своими количественными характеристиками. При измерении магнитных полей измеряются **напряженность магнитного поля, магнитная индукция, магнитный поток, магнитодвижущая сила, магнитный момент** и т.д.

Чрезвычайно важными при создании, эксплуатации и ремонте различных электротехнических устройств являются результаты измерений характеристик магнитных материалов, таких как **основные кривые намагничивания, гистерезисные петли, потери на гистерезис и вихревые токи, определение дефектов в материалах и изделиях** (магнитная дефектоскопия) и т.д.

Без проведения магнитных измерений невозможно изучение физико-химических свойств веществ и материалов, используемых, в том числе, и в энергетике. Все вещества в природе являются магнетиками в том понимании, что они обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем.

Таким образом, магнитные измерения позволяют, с одной стороны, изучать окружающую природу, определять физико-химические свойства ее элементов, величины магнитных полей различных объектов, биологических существ и растений. С другой стороны, информация о магнитных свойствах электротехнических материалов позволяет целенаправленно создавать магнитные материалы с заданными свойствами для решения технических задач, проектировать и создавать электротехнические установки с требуемыми свойствами. Величины изучаемых магнитных полей, степень магнетизма используемых магнитных материалов при этом весьма разнообразны. Поэтому методы и измерительная аппаратура при магнитных измерениях весьма разнообразны.

Необходимо отметить, что все вещества в той или иной степени магнитны, так как все вещества состоят из элементарных частиц (электронов, протонов, нейтронов), которые обладают магнитными моментами.

МАГНИТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Методы магнитной дефектоскопии основаны на взаимодействии магнитного поля с контролируемым объектом.

Контролируемый объект помещается в магнитное поле. Встретив на своем пути препятствия в виде дефектов (трещин, расслоений, газовых пузырей, раковин, участков из других материалов и т.д.) с меньшей или большей магнитной проницаемостью, часть магнитных силовых линий,

искривляясь, выходит на поверхность объекта, образуя вокруг этого дефекта поля рассеяния (рис. 1).

Для регистрации полей рассеяния над дефектами применяют несколько методов: **магнитопорошковый; магнитографический и магнитоферрозондовый.**

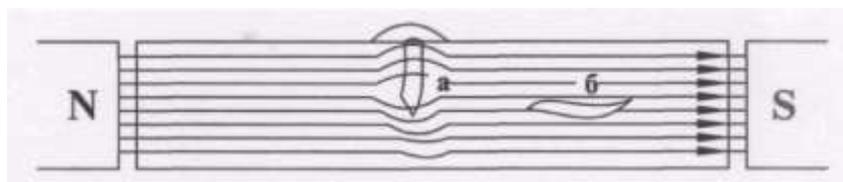


Рис. 1. Схема магнитного контроля при расположении дефекта поперек (а) и вдоль (б) магнитных силовых линий

1.1. Магнитопорошковый метод

Магнитопорошковый метод регистрации полей рассеивания основан на явлении притяжения частиц магнитного порошка в местах выхода на поверхность изделия магнитного потока, связанного с наличием дефекта.

В намагниченных изделиях из ферромагнитных материалов дефекты вызывают перераспределение магнитного потока и выход части его на поверхность. Наибольшая плотность магнитных силовых линий поля рассеяния наблюдается непосредственно над трещиной и уменьшается с удалением от нее. На поверхности изделия имеются локальные магнитные полюсы, притягивающие частицы магнитного порошка, в результате чего место дефекта становится видимым. Для обнаружения дефектов на поверхность детали наносят магнитный порошок, взвешенный в воздухе (сухим способом) (рис. 2, а) или в жидкости (создание магнитной пленки мокрым способом) (рис. 2, б).

Принцип работы магнитной пленки основан на том, что в присутствии магнитного поля она становится светлее или темнее. Пленка становится темнее, когда линии магнитного поля перпендикулярны поверхности. Пленка становится светлее, когда линии магнитного поля *горизонтальны* поверхности, т.е. расположены вдоль нее. Метод служит для выявления дефектов типа тонких поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности: трещин, расслоений, непроваров сварных соединений и т.п.

Метод позволяет контролировать изделия любых размеров и форм, если их магнитные свойства дают возможность намагничивания до степени, достаточной для создания магнитного поля дефекта.

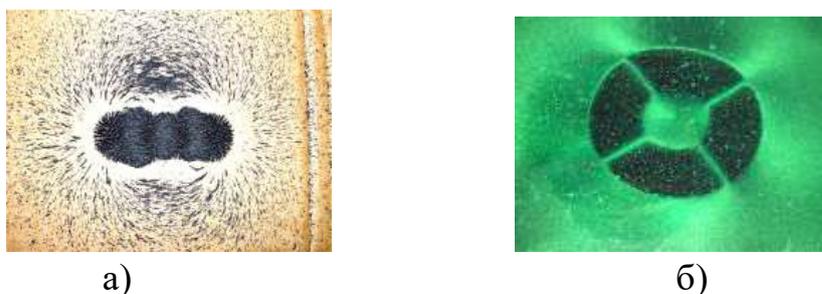


Рис. 2. Распределение магнитных полей:
а – сухой способ; б – использование магнитной пленки

Чувствительность метода определяется магнитными характеристиками изделия, его формой и размерами, чистотой обработки поверхности, напряженностью намагничивающего поля, способом контроля, свойствами применяемого магнитного порошка, способом его нанесения и т.д.

В зависимости от размеров выявляемых поверхностных дефектов установлено три условных уровня чувствительности, (табл. 1).

Уровни чувствительности магнитопорошковых методов

Условный уровень чувствительности	Ширина выявляемого дефекта, мкм	Минимальная протяженность выявляемой части дефекта, мкм
А	2,5	Свыше 0,5
Б	10,0	Свыше 0,5
В	25,0	Свыше 0,5

Магнитопорошковый метод контроля предусматривает следующие технологические операции:

- подготовку изделия к контролю;
- намагничивание изделия;
- нанесение на изделие магнитного порошка или суспензии;
- осмотр изделия;
- разбраковку;
- размагничивание.

Изделия, подаваемые на намагничивающие устройства, должны быть очищены от покрытий, мешающих их смачиванию или их намагничиванию (масла, грязь, иногда изоляционные покрытия и т.п.).

В зависимости от магнитных свойств материала, размеров и формы контролируемого изделия применяют два способа контроля:

- способ приложенного магнитного поля (СПМП);
- способ остаточной намагниченности (СОН).

При магнитопорошковом методе контроля применяют три вида намагничивания:

- циркулярное;
- продольное (полюсное)
- комбинированное.

Разбраковка изделий проводится путем визуального осмотра поверхности изделия на наличие отложений магнитного порошка в местах дефектов. При необходимости расшифровка результатов контроля может проводиться с применением оптических средств, тип и увеличение которых устанавливаются технической документацией на контроль конкретных изделий.

Рассмотрим некоторые устройства, серийно выпускаемые для контроля различных по форме деталей, сварных швов, внутренних поверхностей отверстий путем намагничивания циркулярным или продольным полем, создаваемым с помощью намагничивающих устройств, питаемых импульсным или постоянным током, или с помощью постоянных магнитов.

Достоинством портативных дефектоскопов на постоянных магнитах МД-4К (рис. 3,а) и ручного магнитного дефектоскопа Flaw Finder (рис. 3,б) является отсутствие необходимости внешнего источника питания, что позволяет использовать его во взрыво- и пожароопасных средах, на строительных площадках, участках сборки и сварки, в полевых условиях.



а – МД-4К, б – Flaw Finder, в – UM9

Ручной магнитный дефектоскоп UM9 (в) питается напряжением 220 В.

Магнитопорошковый дефектоскоп ДМПУ-1 (рис. 4, б) предназначен для намагничивания изделий или их участков в режимах импульсного, переменного, постоянного полей. Для всех режимов предусмотрено размагничивание.



а



б



В



Г

Рис. 5. Магнитопорошковый дефектоскоп ДМПУ-1

В состав прибора входят 2 катушки длиной 50 мм, внутренним диаметром 130 мм.

Имеются также стационарные дефектоскопы. В частности, унифицированный стационарный магнитный дефектоскоп для комбинированного намагничивания деталей переменным током ZER-O-MAT, 900-Universal WE II (рис. 6,а).

Бесконтактное намагничивание испытываемой детали с помощью специального U-образного соленоида позволяет выявить поверхностные дефекты во всех направлениях на цилиндрических деталях.

С помощью унифицированного стационарного магнитного дефектоскопа (рис. 6,б) возможно испытывать детали длиной до 900 мм с диаметром до 450 мм, массой до 450 кг. Напряжение питания – 3х400 В, потребляемая мощность – 55 кВА, ток циркулярного намагничивания – 2800 А, ток продольного намагничивания – 15000 А.



а



б

Рис. 6. а – ZER-O-MAT, б – 900-Universal WE II

1.2. Магнитографический метод

Метод основан на регистрации магнитных полей рассеяния над дефектами с применением в качестве индикатора ферромагнитной пленки. В методе контролируемый участок объекта намагничивают, плотно прижимают к нему магнитную ленту, аналогичную лентам, применяемым для магнитной звуко- и видеозаписи. Намагниченность ферромагнитных частиц ленты определяется напряженностью основного магнитного поля и магнитными полями рассеяния над дефектами. Информация о дефекте считывается при помощи магнитографического дефектоскопа, имеющего лентопротяжное устройство, чувствительную головку типа магнитофонной и осциллографический индикатор. Головки перемещаются поперек

магнитной ленты. Электрический сигнал с головки усиливается и подается на электроннолучевую трубку.

Чувствительность магнитографического метода сравнительно высока – на изделиях с ровной поверхностью выявляются дефекты глубиной 0,3 мм при шероховатости поверхности 0,15 мм. Преимущество данного метода – документальность контроля и возможность количественной оценки. Магнитографический метод дефектоскопии получил широкое распространение для контроля качества сварного шва, соединений трубопроводов и листовых конструкций.

1.3. Магнитоферрозондовый метод

Этот метод основан на выявлении феррозондовым преобразователем магнитных полей рассеяния над дефектами в намагниченном изделии и преобразовании их в электрические сигналы.

Феррозонд представляет собой ферритовый или пермалловый сердечник длиной не более 2-6 мм с двумя обмотками, из которых первая – возбуждающая, питаемая переменным током от генератора, а вторая – измерительная, дающая информацию о наличии и изменениях внешних магнитных полей. Феррозондовые преобразователи имеют очень высокую чувствительность (до 10^{-6} эВ), что позволяет обнаруживать мельчайшие дефекты, способные создать поле рассеяния. Обеспечив перемещение преобразователя по поверхности объекта, осуществляют автоматический или полуавтоматический контроль наличия дефектов.

В зависимости от магнитных свойств, размеров и формы контролируемого изделия, применяют два способа контроля:

- приложенного магнитного поля;
- остаточной намагниченности.

МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Наименование магнитоизмерительного прибора определяется названием единицы физической величины, для измерения которой он предназначен, а иногда также наименованием используемого в нем магнитоизмерительного преобразователя. Иногда для обозначения измерительного прибора используют термин «магнитометр».

Принципы работы магнитоизмерительных приборов основаны на преобразовании магнитной величины в величину электрическую, с дальнейшим расчетом магнитной величины по известной функциональной зависимости между этими частями единого электромагнитного процесса.

По величине интенсивности магнитные поля условно делят на слабые – индукцией B от 10^{-10} ... 10^{-3} Тл, средние – B от 10^{-3} ... 0,1 Тл, сильные – B от 0,1 ... 10 Тл.

Выбор магнитоизмерительного преобразователя (МИП) определяется:

- видом магнитного поля (постоянное, переменное, импульсное);
- интенсивностью поля;
- степенью неоднородности магнитного поля (различием составляющих B_x, B_y, B_z);
- внешними условиями (температурой, влажностью и т.д.);
- необходимой чувствительностью;
- стабильностью характеристик;
- геометрическими размерами и т.д.

В соответствии с видом выходной величины МИП делят на три основные группы: **магнитоэлектрические, магнитомеханические и магнитооптические.**

В каждой из этих групп имеются разновидности преобразователей, основанные на различных физических явлениях. Наиболее широко используют следующие явления:

- 1) **электромагнитная индукция;**
- 2) **силовое взаимодействие измеряемого магнитного поля с полем постоянного магнита или контура с током;**
- 3) **гальваномагнитные явления;**
- 4) **изменение магнитных свойств материалов в магнитном поле;**
- 5) **взаимодействие микрочастиц с магнитным полем;**
- 6) **сверхпроводимость.**

Рассмотрим МИП использованных на данных явлениях.

2.1. Индукционные преобразователи

Индукционные преобразователи, основаны на законе электромагнитной индукции. К индукционным преобразователям относятся собственно индукционные и ферроиндукционные преобразователи, разновидностью которых являются феррозонды.

Известен закон Фарадея, описывающий явление электромагнитной индукции. При изменении потока Φ в катушке с числом витков w_k , расположенной под прямым углом к потоку, возникает ЭДС e

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -\omega_k \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Видно, что с помощью катушки магнитная величина – магнитный поток Φ может быть преобразована в электрическую величину – ЭДС. МП, основанный на этом явлении, называют индукционным. Он представляет собой **измерительную** катушку, витки которой сцепляются с измеряемым магнитным потоком.

Измерительная катушка должна иметь такие форму и размеры и быть так расположена, чтобы с ее витками сцеплялся лишь тот поток, который

подлежит измерению. Плоскость ее должна быть расположена перпендикулярно вектору магнитной индукции или напряженности магнитного поля.

Если поле в пространстве, охватываемом катушкой, однородно и ось катушки совпадает с направлением векторов магнитной индукции B и напряженности магнитного поля H , то можно записать

$$e = \omega_k S_k \frac{dB}{dt} = -\omega_k S_k \mu \mu_0 \frac{dH}{dt}, \quad (2)$$

где $\omega_k S_k$ – постоянная измерительной катушки, μ – магнитная постоянная.

Из последнего соотношения видно, что индукционный преобразователь может быть использован для измерения магнитного потока, магнитной индукции и напряженности магнитного поля.

При измерении измерительная катушка должна располагаться так, чтобы ее витки охватывали испытуемое изделие и плотно прилегали к его поверхности.

Форма и размеры катушки определяются характером измеряемой величины. При измерении напряженности магнитного поля на поверхности образца измерительная катушка должна быть плоской (с малой высотой), плотно прилегать к поверхности образца и располагаться так, чтобы ее ось совпадала с направлением вектора напряженности измеряемого магнитного поля.

Измерительная катушка может быть успешно использована для измерения параметров как переменного, так и постоянного магнитных полей.

Конструктивно многovitковая измерительная катушка может размещаться на сердечнике, выполненном из ферро- или ферромагнитного материала.

Если вектор площади витка измерительной катушки не совпадает с вектором магнитной индукции внешнего магнитного поля и угол между векторами равен Θ , то наведенная ЭДС определится по формуле:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \cos \Theta. \quad (3)$$

Используя данное соотношение и выполнив требование об обеспечении неизменности в процессе измерения всех составляющих потокосцепления $\psi = \omega_k S_k \mu \mu_0 H$ за исключением одной, связь магнитной и электрической величин можно представить следующими четырьмя уравнениями:

$$e = -\omega_k S_k \mu \mu_0 \cos \Theta \frac{dH}{dt}; \quad (4)$$

$$e = -\omega_k S_k \mu \mu_0 H \sin \Theta \frac{d\Theta}{dt}; \quad (5)$$

$$e = -\omega_k S_k \mu \mu_0 H \cos \Theta \frac{dS}{dt}; \quad (6)$$

$$e = -\omega_k S_k \mu \mu_0 H \cos \Theta \frac{d\mu}{dt}. \quad (7)$$

Первое уравнение описывает принцип работы пассивного магнитоизмерительного преобразователя. Для измерения постоянного магнитного потока, согласно (4), необходимо в процессе измерения изменить магнитный поток, пронизывающий измерительную катушку (например вынести измерительную катушку из измеряемого поля, обеспечив условие $H = 0$).

Второе уравнение демонстрирует принцип работы измерительного генератора. Если вращать катушку во внешнем магнитном поле B с постоянной скоростью ω (второе уравнение), то в ней возникнет ЭДС, пропорциональная измеряемой индукции и частоте вращения (5).

Согласно третьему уравнению (6), если осуществлять изменение площади витков катушки, то можно изготовить так называемые S -преобразователи. Чаще всего они представляют собой пьезокристалл с намотанной на него обмоткой, на который воздействуют магнитным полем. Кристалл деформируется, меняя площадь витков катушки, и в ней возникает ЭДС, пропорциональная измеряемой напряженности магнитного поля H и частоте колебаний граней.

Четвертым уравнением (7) описываются свойства ферромодуляционного преобразователя (феррозонда). В нем за счет вспомогательного поля, создаваемого дополнительной обмоткой, меняется магнитная проницаемость материала сердечника, а следовательно, и проницаемость тела μ . Проницаемость μ возможно изменять и под действием механических напряжений, т.е. используя магнитоупругий эффект.

2.2. Механические магнитоизмерительные преобразователи

Механические магнитоизмерительные преобразователи основаны на силовом взаимодействии тел или частиц, обладающих магнитным моментом, с измеряемым магнитным полем.

Механические МИП содержат в качестве чувствительного элемента магниты или контуры с током, поворачивающиеся под влиянием магнитного поля на определенный угол. Пассивные механические преобразователи представляют собой свободно поворачивающиеся магнитные стрелки и применяются для определения направления вектора магнитной индукции или значений его составляющих.

Активные механические преобразователи основаны на свободных качаниях стрелки в измеряемом поле.

Если МИП, основной частью которого является постоянный магнит, обладающий магнитным моментом M , поместить во внешнее магнитное поле

B , то под действием механического момента вращения $\bar{P}_{вр} = \bar{B}\bar{M}$ он повернется на угол Θ – угол между осью магнита и направлением поля. В скалярном виде уравнение может быть представлено как $P_{вр} = B_m M \sin\Theta$.

Если магнит свободно поворачивается под действием поля и принимает его направление, т.е. по углу Θ можно определить направление поля B . Для измерения значения индукции используется другая конструкция, в которой искусственно создается противодействующий момент. Для этого постоянный магнит закрепляется, например, на подвесе (на упругой нити) с удельным противодействующим моментом $M_{пр}$, в результате чего создается противодействующий момент $P_{пр} = M_{пр}\alpha$, направленный против угла поворота магнита (α – угол закручивания нити). В состоянии устойчивого равновесия $P_{пр} = P_{вр}$ и, следовательно:

$$BM \sin\Theta = M_{пр}\alpha, \quad \alpha = \frac{M \sin\Theta}{M_{пр}} B.$$

Задача измерения сводится к определению угла поворота α . Противодействующий момент можно не только с помощью упругой нити, а, например, другим магнитом, обладающим магнитным моментом и расположенным определенным образом.

Поэтому при измерении магнитную ось магнита располагают перпендикулярно определяемой компоненте магнитной индукции.

2.3. Гальваномагнитные преобразователи

Основаны на сочетании двух принципов: силовом (в них происходит искривление траектории заряженных частиц под воздействием силы Лоренца), их смещении и на индукционных явлениях.

Сила Лоренца – сила, с которой электромагнитное поле действует на точечную заряженную частицу. При движении заряженной частицы в электромагнитном поле на неё действует сила, обусловленная и электрическим F_e , и магнитным полем F_m , а полная сила есть сумма сил со стороны первого и второго:

$$F = F_e + F_m = qE + q[v \times B],$$

где E – напряжённость электрического поля; F_m – сила, действующая со стороны магнитного поля; F_e – сила, действующая со стороны электрического поля; q – заряд частицы; v – скорость частицы; B – магнитная индукция поля.

Направление движения частицы в зависимости от её заряда при векторе магнитной индукции перпендикулярном вектору скорости (из плоскости рисунка, перпендикулярно ей) показано на рис. 7.

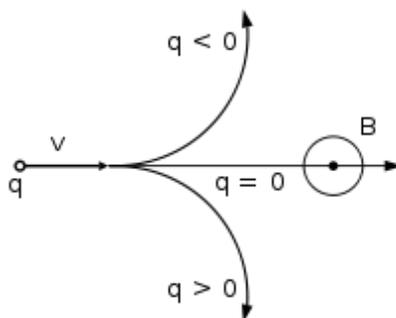


Рис. 7. Направления сил Лоренца

К гальваномагнитным преобразователям относятся:

- преобразователь Холла, основанный на эффекте Холла;
- магниторезистивные преобразователи, основанные на изменении внутреннего сопротивления (проводимости) преобразователя в магнитном поле.

К **магниторезистивным** преобразователям относятся магниторезисторы, магнитодиоды, биполярные магнитотриоды, гальваномагниторекомбинационные преобразователи.

Магниторезисторы (магнитосопротивления) основаны на эффекте Гаусса. Эффектом Гаусса называется изменение удельного электрического сопротивления R проводниковых и полупроводниковых материалов в магнитном поле B . Изменение удельного сопротивления от магнитного поля может быть описано приближенной формулой $\Delta R/R = AB^m$ где A – коэффициент, зависящий от свойств материала преобразователя и его конструкции. Магниторезистивный эффект зависит как от размеров образца, так и от направления магнитного поля. Увеличение электрического сопротивления под действием магнитного поля в случае перпендикулярности вектора магнитной индукции поверхности полупроводниковой пластины максимально (поперечный эффект магнитосопротивления), в случае их параллельности минимально (продольный эффект магнитосопротивления).

Зависимость сопротивления от величины магнитного поля в общем виде нелинейная: в слабых полях с магнитной индукцией $B < 0,3$ Тл, $m \approx 2$. В сильных полях при $B > 0,3$ Тл, $m = 1$ и выходная характеристика линейна. Для уменьшения погрешности из-за нелинейности зависимости сопротивления от B магниторезисторы применяют в основном для измерения сильных магнитных полей. Обычно они включаются в мостовые схемы.

Основными параметрами магниторезисторов являются:

- начальное сопротивление при $B = 0$;
- магниторезистивное отношение, представляющее собой отношение сопротивления при определенном значении магнитной индукции (0,3 или 1,0 Тл) к сопротивлению при $B = 0$;

– нагрузочная способность, указываемая в паспорте либо в виде значений рассеиваемой мощности P , либо в виде предельно допустимого тока I_{\max} .

При работе на переменном токе магниторезистивный эффект не зависит от частоты вплоть до 10 ГГц.

Параметры магниторезисторов из сплава *InSb-NiSb* представлены в табл. 3.

Магнитодиоды – это полупроводниковые диоды с несимметричным *p-n* переходом, из-за чего проводимость одной из областей значительно больше другой. Поэтому, если магнитодиод, включенный в прямом направлении, поместить в магнитное поле, то его электрическое сопротивление будет возрастать пропорционально индукции и, следовательно, ток через диод уменьшится. Отличительная особенность магнитодиодов – высокая чувствительность к полю, существенно превышающая аналогичные характеристики магниторезисторов.

Существенным недостатком магнитодиодов является сильная зависимость электрических параметров от температуры, которая определяется температурной зависимостью подвижности носителей и увеличением концентрации основных носителей за счёт их генерации с ростом температуры.

Биполярный **магнитотриод** конструктивно не отличается от обычного униполярного полевого триода с затвором, представляющим собой один электронно-дырочный переход, работающий по принципу работы, аналогичному принципу работы вакуумного триода. Как известно, полевой транзистор имеет принципиальное отличие от биполярного транзистора – у биполярного транзистора управление выходным сигналом производится входным током, а в полевом транзисторе – входным напряжением или электрическим полем. Аналогично в магнитотриоде под воздействием внешнего магнитного поля в зависимости от его направления (полярности) происходит увеличение или уменьшение внутреннего электрического сопротивления преобразователя.

В последнее время разработаны по специальной технологии **гальваномагниторекомбинационные** преобразователи (ГМРП), обладающие высокой чувствительностью к постоянным и переменным магнитным полям (порядка 10^{-7} Тл) и очень широким частотным диапазоном ($0 \dots 10^{14}$ Гц). ГМРП представляют собой резистор, управляемый магнитным полем, принцип действия которого основан на магниторекомбинационном эффекте, состоящем в следующем.

В однородном плоском образце полупроводника, вдоль которого протекает ток, линии тока параллельны его граням и концентрация носителей

одинакова во всем объеме, если не учитывать влияние поверхностей. Однако на поверхности происходит рекомбинация электронно-дырочных пар, а, следовательно, вблизи нее этих пар будет не хватать, т.е. создается градиент концентрации от поверхности к центру образца. Если скорости поверхностной рекомбинации на обеих гранях образца одинаковые, то градиенты концентрации от одной и от другой грани образца будут одинаково искривлять траектории движения носителей. Если приложить к образцу магнитное поле, то за счет силы Лоренца концентрация носителей у одной из граней увеличивается, а у другой уменьшается, за счет чего на первой скорость поверхностной рекомбинации возрастает, а на второй уменьшается. Однако общее число рекомбинирующих пар не изменится, и проводимость образца может измениться только за счет искривления траектории движения носителей, что является обычным магниторезистивным эффектом. Однако, если скорость поверхностной рекомбинации на одной грани образца существенно больше, чем на другой, то помещение образца в магнитное поле приведет к существенному росту на этой грани поверхностной рекомбинации, а это значит, что под действием магнитного поля концентрация носителей в образце будет уменьшаться, что приведет к уменьшению проводимости. Это явление и носит название гальваномагниторекомбинационного эффекта.

Основными параметрами ГМРП являются:

– приращение выходного сигнала, представляющее собой разность выходных напряжений при номинальном значении индукции магнитного поля U_B и её отсутствии U_0

$$\Delta U = U_B - U_0 ;$$

- рабочий ток,
- магнитная чувствительность γ , представляющая собой отношение приращения выходного сигнала ΔU_B к вызвавшей его изменению магнитной индукции, при протекании рабочего тока
- температурный коэффициент чувствительности.

2.4. Взаимодействие микрочастиц с магнитным полем.

Квантовые магнитоизмерительные резонансные преобразователи (МИП)

Содержат в качестве чувствительного элемента капсулу с веществом, поглощающую или излучающую электромагнитную энергию на частоте, однозначно связанной с индукцией измеряемого поля. Природа частиц вещества (ядра, атомы), взаимодействующих с магнитной индукцией разделяет квантовые МИП на четыре группы, основанные на: **парамагнитном**

электронном резонансе; ядерном резонансе; ферромагнитном резонансе; оптической ориентации атомов.

Представители первых трех групп квантовых преобразователей основаны на использовании магнитных резонансов, которые могут наблюдаться в веществах с различными типами магнитного состояния при воздействии на них двух полей: постоянного магнитного поля B и электромагнитного поля h с частотой ω .

Физические процессы, происходящие при этом, обусловлены магнитными свойствами изолированных частиц (атомным магнетизмом) или магнетизмом вещества в целом (магнитными свойствами групп атомов и молекул), т.е. наличием у них магнитных моментов μ и связанных с ними механических моментов количества движения p (спинами). Под действием постоянного магнитного поля магнитные моменты начинают прецессировать вокруг направления этого поля с частотой ω_0 . Это периодическое стационарное движение квантовано, т.е. угол между плоскостями орбит и направлением поля принимает дискретные значения. Если на вещество дополнительно воздействовать электромагнитным полем h , направленным перпендикулярно B , то при совпадении частоты переменного поля ω с частотой прецессии ω_0 происходит поглощение веществом электромагнитной энергии (магнитный резонанс), т.е. нарушается равновесное состояние системы атомов.

Действительно, согласно квантовой теории магнетизма, магнитная энергия такой системы при $\vec{h} \ll \vec{B}$ состоит из двух частей: первая определяет стационарные квантованные уровни энергии, возникающие во внешнем поле B вследствие взаимодействия спинов ядра и электронных оболочек с внешним полем и между собой; вторая представляет собой энергию, зависящую от времени, и может рассматриваться как возмущение, вызывающее переходы частиц вещества между этими уровнями энергии. Последнее приводит к избыточному количеству частиц на одном из энергетических уровней; происходит скачкообразное изменение энергии, сопровождающееся поглощением (излучением) электромагнитного поля.

Резонансные явления оцениваются резонансной кривой поглощения (рис. 8) и ее спектром. Уравнение преобразования квантовых преобразователей имеет вид

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B},$$

где \vec{M} – суммарный магнитный момент вещества, $\vec{M} = \sum \mu_i$, i – магнитный момент одной частицы, γ – гиромагнитное отношение частицы:

универсальная постоянная, известная для отдельных частиц с высочайшей точностью и не зависящая от внешних условий, $\gamma = \frac{\mu_i}{p_i}$.

В зависимости от того, с магнитным моментом какой частицы (ядра, электрона, атома) взаимодействует электромагнитное поле H , выделяют три основные группы квантовых МИП: ядерные, электронные и атомные.

Квантовый преобразователь, основанный на методе ядерного магнитного резонанса (ЯМР), использующий метод вынужденной прецессии ядер, представляет собой зонд (рис. 9), содержащий ампулу, заполненную соответствующим веществом (например, при использовании ядер водорода – дистиллированной водой). На зонд намотана обмотка возбуждения ОВ, которая подключена к высокочастотному генератору ВЧГ. Его частота может плавно изменяться. С помощью ОВ и ВЧГ создается электромагнитное высокочастотное поле H с переменной частотой ω . Зонд помещают в измеряемое постоянное магнитное поле B так, чтобы векторы H и B были взаимно-перпендикулярны. Изменяя частоту f , добиваются явления ядерного магнитного резонанса, при котором магнитные моменты отдельных ядер вещества, заключенного в капсулу, начинают прецессировать вокруг направления поля B с максимальной амплитудой.

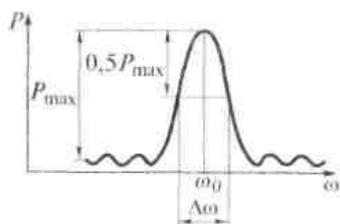


Рис. 8. Резонансная кривая поглощения веществом электромагнитной мощности P при некотором значении постоянного поля B :
 ω_0 – резонансная частота;
 $\Delta\omega$ – ширина резонансной линии

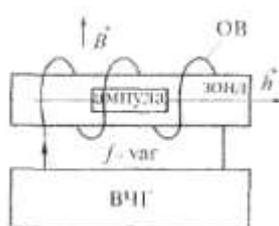


Рис. 9. Квантовый МИП на методе вынужденной прецессии ядер:
 ОВ – обмотка возбуждения;
 ВЧГ – высокочастотный генератор

Частота прецессии ω_0 будет определяться выражением $\omega_0 = \gamma_{\text{я}} \vec{B}$, где $\gamma_{\text{я}}$ – гиромагнитное отношение ядра водорода (протона), которое известно с высокой точностью.

Условие резонанса наступает при совпадении частоты внешнего возбуждающего генератора и частоты прецессии ядер $\omega_0 = \omega$. Таким образом, для нахождения значения поля B необходимо зафиксировать момент наступления резонанса и измерить частоту ω_0 . Момент поглощения может быть зафиксирован различными радиотехническими средствами (например, осциллографом), а частота – высокочастотным частотомером. Для этого используют различные схемные методы с использованием вторичных измерительных преобразователей, содержащих модуляторы, усилители, детекторы, системы микропроцессорного контроля, позволяющие проводить быстрый анализ сигнала прецессии.

Однако при измерении внешних полей B в достаточно широком диапазоне значений обойтись только одним видом ядросодержащего вещества не удастся. Для расширения пределов измерений в одной ампуле используются ядра нескольких веществ, чаще всего ядра лития, водорода и дейтерия с различным гиромагнитным отношением.

2.5. Квантовые магнитоизмерительные преобразователи на оптической ориентации атомов

Основаны на магнитооптическом эффекте Фарадея. Сущность этого эффекта состоит в том, что магнитный момент электронов в атоме при помещении вещества в магнитное поле начинает прецессировать (медленно вращаться) вокруг вектора B . В результате этого вещество приобретает разные значения коэффициентов преломления для потоков излучения с разной круговой поляризацией. Проявляется это как поворот плоскости поляризации света, проходящего через вещество.

Для измерения магнитной индукции наблюдают поворот плоскости поляризации в тонких магнитных пленках. При этом поворот плоскости поляризации пропорционален не магнитной индукции B , а намагниченности вещества. Для ферромагнитных пленок соответственно угол поворота оказывается много больше, чем у других твердых тел.

Схема магнитооптического тесламетра, основанного на эффекте Фарадея, приведена на рис. 10.

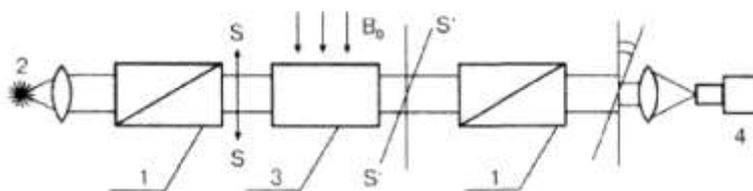


Рис. 10. Магнитооптический тесламетр

1 – поляризатор; 2 – источник света; 3 – рабочее тело; 4 – фотоприемник

Принцип измерения магнитного поля магнитооптическим тесламетром состоит в том, что оптический канал, содержащий источник света, два поляризатора и фотоприемник, настраивается в отсутствие магнитного поля либо на максимум пропускания, либо на минимум. После наложения магнитного поля плоскость поляризации повернется, и этот поворот компенсируется соответствующим поворотом одного из поляризаторов, также по максимуму или по минимуму выходного сигнала. Измеряемой характеристикой является угол поворота поляризатора относительно его положения при $B = 0$. Чаще всего шкала магнитооптического прибора градуируется непосредственно в значениях напряженности магнитного поля.

2.6. Преобразователи Холла (датчики Холла)

Основаны на гальваномагнитном явлении, заключающемся в возникновении поперечной разности потенциалов E_x в полупроводниковой пластине при одновременном воздействии на нее электрического и магнитного полей. Данное явление связано с тем, что магнитное поле отклоняет носители заряда – электроны – от их движения вдоль или против электрического поля к одной из граней пластины. Таким образом, сила Лоренца приведёт к накоплению отрицательного заряда возле одной грани пластины и положительного возле противоположной. Накопление заряда будет продолжаться до тех пор, пока возникшее электрическое поле зарядов E_1 не скомпенсирует магнитную составляющую силы Лоренца.

Датчик Холла (ДХ) представляет собой пластину толщиной d (рис. 11), к которой в продольном направлении через токовые электроды подводится электрический ток I . К середине противоположных граней в эквипотенциальных точках, т.е. на одной эквипотенциальной линии электрического поля, создаваемого током питания датчика, припаиваются потенциальные холловские электроды. Если на пластину воздействовать внешним магнитным полем B , то на потенциальных электродах возникает ЭДС Холла: $E_x = S_{IB} I B \sin \alpha$, где S_{IB} – гальваномагнитная чувствительность; α – угол между B и плоскостью ДХ.

Данное явление получило название *эффекта Холла*, по имени физика Эдвина Герберта Холла, открывшего этот эффект в 1879 г. в тонких пластинках золота. Так как измеряемое напряжение меняет знак на обратный при изменении направления магнитного поля на обратное, то эффект Холла относится к нечётным гальваномагнитным явлениям.

Значение тока I определяется для конкретного вида полупроводника допустимой температурой перегрева преобразователя и колеблется от 5 мА (для высокоомных датчиков) до 200 мА (для низкоомных).

При заданном значении тока I (указывается в паспорте на датчик): $E_x = S_B B$, где S_B – чувствительность по индукции. Это выражение при условии постоянства S_B описывает датчик Холла в качестве измерителя магнитной индукции. Реально это преобразование обладает мультипликативной и аддитивной погрешностями, а также погрешностью линейности.

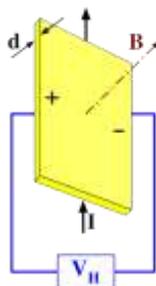


Рис. 11. Электрическая схема преобразователя с датчиком Холла.

Мультипликативная погрешность вызвана непостоянством значения S_B вследствие влияния температуры и ряда других причин.

Аддитивная погрешность обусловлена, в первую очередь, наличием остаточного напряжения на потенциальных электродах $E_{нэ}$ (при отсутствии внешнего магнитного поля), которое обусловлено асимметрией припайки потенциальных электродов и не зависит от магнитной индукции. Его полярность определяется направлением тока I .

В паспорте на датчик Холла указывают значение $E_{нэ}$, которое для различных типов датчиков может колебаться в диапазоне 10... 120 мкВ при нормальной температуре. В паспорте также указывается температурный коэффициент остаточного напряжения.

Погрешность линейности возникает из-за того, что S_B является функцией индукции. Обычно в паспорте приводится граничное значение индукции, ниже которой погрешность линейности практически можно не учитывать (чаще всего $B_{гр} < 0,6$ Тл).

При выборе датчика Холла следует учитывать и другие характеристики, например геометрические размеры датчика, которые также приводятся в паспорте на датчик. При измерениях в узких зазорах ДХ должен иметь малую толщину d . При исследовании неоднородности поля ДХ должен иметь малые размеры активной поверхности (lb).

Современные датчики выпускаются нескольких типов: монокристаллические из чистых полупроводников (германий, кремний); монокристаллические из химических соединений элементов IV и V групп Периодической системы элементов Д. И. Менделеева (антимонид индия $InSb$, арсенид индия $InAs$, арсенидфосфид индия $InAsP$ и др.); поликристаллические; пленочные.

Оптимальные геометрические размеры кристаллических датчиков составляют 0,7x0,7x0,1 мм, толщина варьируется в пределах 0,1...0,5 мм. Пленочные датчики, изготавливаемые напылением вещества на подложку, имеют очень малую толщину $d = 1... 20$ мкм.

Датчики Холла могут использоваться по двум направлениям:

а) для измерений. При этом одна из величин (ток или магнитная индукция) поддерживается постоянными. Тогда выходное напряжение является функцией измеряемой величины;

б) для создания устройств, реализующих операцию умножения. В этом случае каждая из входных величин (ток или магнитная индукция) изменяются независимо друг от друга.

2.7. Сверхпроводниковые МИП

Явление сверхпроводимости заключается в том, что многие металлы или сплавы при температуре ниже определенной (критической) T_c обладают способностью проводить электрический ток практически без сопротивления. При

этом очень важно, чтобы индукция внешнего магнитного поля не превышала бы некоторого критического значения B_c .

Важным свойством сверхпроводников является вытеснение магнитного поля из занимаемого объема. Это происходит независимо от того, помещается ли сверхпроводник при температуре ниже T_c в магнитное поле или охлаждается ниже температуры T_c во внешнем магнитном поле. То, что магнитное поле не может проникнуть внутрь сверхпроводника, объясняется законами электродинамики на основании отсутствия у сверхпроводника сопротивления. Явление вытеснения магнитного поля из объема сверхпроводника при достижении критической температуры – эффект Мейснера.

В измерительной технике сверхпроводимость нашла применение благодаря квантовым эффектам, известным как "эффекты Джозефсона" (Нобелевская премия 1973 г.). Сущность эффекта Джозефсона состоит в том, что через два слабосвязанных сверхпроводника (разделенных тонким слоем изолятора, использованием точечного перехода либо другим способом осуществления слабой связи сверхпроводников), при наличии постоянной разности потенциалов, приложенных к сверхпроводникам, может протекать переменный электрический ток с частотой, определяемой приложенной разностью потенциалов.

Измерительные преобразователи, применяемые в магнитоизмерительных приборах и основанные на эффекте Джозефсона, представляют собой сверхпроводящее кольцо с двумя (преобразователь постоянного тока) (Рис. 12) или одним (преобразователь переменного тока) переходами. В случае отсутствия внешнего магнитного поля у преобразователя с двумя джозефсоновскими переходами ток от источника разделяется на две эквивалентные ветви, содержащие по одному джозефсоновскому переходу. Поэтому при отсутствии внешнего магнитного поля прошедшие токи будут идентичными, совпадающими по фазе.

Если кольцо с двумя джозефсоновскими переходами поместить в магнитное поле, вектор магнитной индукции которого перпендикулярен плоскости кольца, то в кольце будет наводиться циркулирующий сверхпроводящий ток. Этот ток в одном из переходов будет вычитаться из джозефсоновского тока от источника, а в другом переходе складываться. В этом случае в ветвях будут разные токи, с различными разностями фаз. В результате интерференции токов проявится зависимость критического тока СКВИДА от приложенного внешнего магнитного поля. Ступенчатый характер зависимости позволяет чувствовать отдельные кванты потока. Ступенчатый вид зависимости возникает из-за наличия условия изменения фазы электронной волны на джозефсоновском переходе на $2\pi n$, где n – целое.

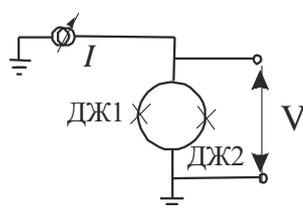


Рис. 12. Электрическая схема СКВИДа на постоянном токе

Такого рода преобразователь получил название СКВИД от английского. Информация о магнитном поле или о его изменении получается из анализа вольт-амперной характеристики СКВИДа. Эта характеристика имеет ступенчатую форму, т.е. ток через СКВИД изменяется скачками.

Процедура измерения магнитного потока с использованием СКВИДа заключается в том, что на сверхпроводящее кольцо, содержащее контакт или два контакта Джозефсона, накладывается магнитный поток $\Phi_{\text{вн}}$. При изменении внешнего магнитного потока снимается вольтамперная характеристика – ступенчатая зависимость тока от разности потенциалов U .

Величину магнитного потока находят с использованием формулы

$$\Phi_{\text{вн}} = n\Phi_0 - LI_c,$$

где n – число «ступенек» на вольт-амперной характеристике; Φ_0 – квант магнитного потока; L – индуктивность измерительной цепи; I_c – критический ток джозефсоновского контакта – амплитуда «ступеньки» на вольт-амперной характеристике. Схема СКВИДа переменного тока приведена на рис. 13.

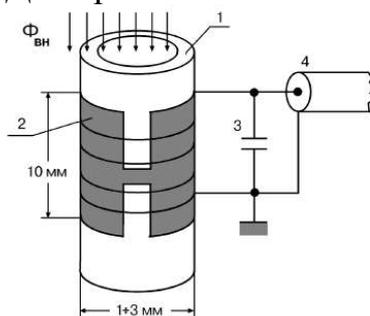


Рис. 13. СКВИД переменного тока

Благодаря особенностям вольтамперных характеристик, цепей, содержащих контакты Джозефсона, амплитуда выходных сигналов с измерительной катушки 2 зависит от амплитуды измеряющегося периодически внешнего магнитного потока. СКВИД градуируется так, что сигнал с измерительной катушки непосредственно дает информацию об амплитуде внешнего магнитного потока.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

3.1. ИЗМЕРЕНИЕ РАЗНОСТИ СКАЛЯРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДВУХ ТОЧЕК (МАГНИТОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ВДОЛЬ УЧАСТКА ПУТИ)

Для измерения разности скалярных магнитных потенциалов двух точек используются магнитные потенциалометры или магнитные пояса.

Магнитный потенциалометр представляет собой тонкую гибкую ленту из изолирующего неферромагнитного материала длиной 1 метр с обмоткой из четного числа слоев (2-4), намотанных в одну сторону с одинаковой плотностью

(рис. 14). Витки обмотки равномерно распределены по длине и плотно прилегают друг к другу. К концам обмотки, выведенным на середине пояса, присоединяется баллистический гальванометр. Выводы располагаются рядом таким образом, чтобы цепь к гальванометру не образовывала петли, в которой могли бы возникнуть мешающие индуктивные влияния. Для измерения МДС между точками a и b поля концы пояса помещают в эти точки.

Включая или выключая ток, возбуждающий измеряемое поле, изменяют поток, сцепленный с поясом, и наблюдают баллистический отброс.

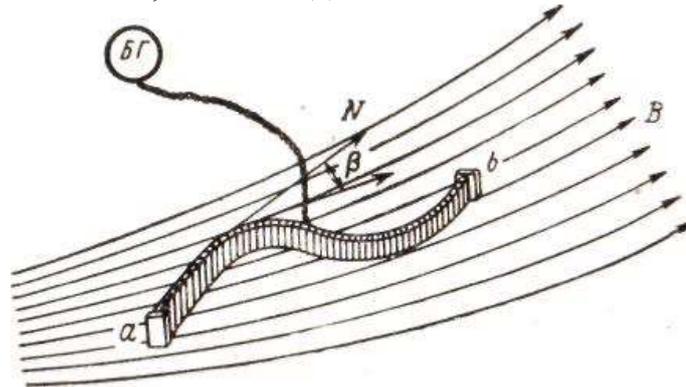


Рис. 14. Магнитный потенциометр

Сечение ленты S потенциометра настолько мало, что магнитную индукцию B во всех ее точках можно считать одинаковой. Тогда поток сквозь сечение ленты будет равен:

$$\Phi = BScos\beta = \mu_0 HScos\beta ,$$

где β – угол между нормалью к сечению и вектором B . Величина $H \cos\beta = H_T$ представляет собой тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля. Поэтому

$$\Phi = \mu_0 SH_T.$$

Полученное значение потока можно рассматривать как поток, сцепленный с одним витком. Потокосцепление с витками на участке dl ленты будет равно:

$$d\psi = \mu_0 SH_T \omega_0 dl.$$

Потокосцепление со всеми витками обмотки ленты потенциометра определится выражением

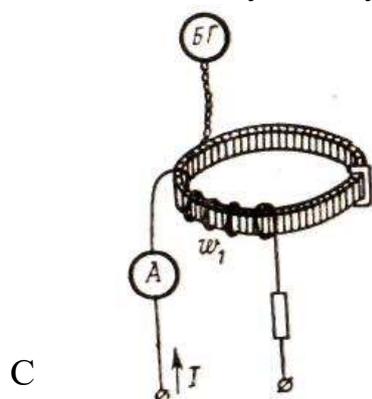
$$\psi = \mu_0 S \omega_0 \int_b^a H_T dl = \mu_0 S \omega_0 U_M.$$

U_M представляет собой разность скалярных магнитных потенциалов точек размещения концов магнитного пояса. Обозначив $\mu_0 S \omega_0 = k$, получим выражение для разности магнитных потенциалов точек a и b

$$U_M = \frac{\psi}{k}. \quad (8)$$

Величина k называется постоянной потенциометра. Из (8) следует, что если известна постоянная потенциометра, то, присоединив концы его обмотки к баллистическому гальванометру и определив потокосцепление ψ (удалением потенциометра, выключением тока, создающего поле, или быстрым замыканием концов потенциометра), можно определить величину U_u для точек поля, в которых были помещены концы потенциометра.

Постоянная потенцилометра k может быть определена опытным путем перед проведением эксперимента. Для этого используется схема установки представленной, на рис. 15. Установка включает в себя потенцилометр и вспомогательную катушку w_1 , обтекаемую известным постоянным током I .



Производя изменения потокосцепления (включением, выключением или переключением на обратное направление тока) и определяя максимальный отброс подвижной системы гальванометра, найдем

$$\Delta\psi = C_{\mu}\alpha_m.$$

другой стороны, изменение потокосцепления можно выразить так:

$$\Delta\psi = kU_M = k \oint H_T dl. \quad (9)$$

Рис. 15. Схема определения постоянной потенцилометра

Но интеграл по замкнутому контуру $\oint H_T dl$ равен полному току, охватываемому контуром интегрирования, поэтому

$$\Delta\psi = k\omega_1 I. \quad (10)$$

Из сравнения формул (9) и (10) находим

$$k = \frac{C_{\mu}\alpha_m}{\omega_1 I}.$$

Потенцилометры выполняются как гибкой, так и жесткой конструкции. Если первые можно использовать для измерения разности магнитных потенциалов между любыми двумя точками поля, то жесткие используют для измерений разности магнитных потенциалов между точками, определяемыми расстоянием между концами потенцилометра.

3.2. Методы и приборы для измерения магнитной индукции

Магнитная индукция представляет собой векторную величину, определяющую интенсивность магнитного поля и его направление в каждой точке. При создании и эксплуатации различных электромагнитных и электромеханических устройств требуется знание распределения магнитной индукции внутри этих устройств, а также в окружающем пространстве.

Распределение магнитной индукции может быть выполнено расчетным или экспериментальным путем. Экспериментальное определение магнитной индукции в равномерном постоянном магнитном поле может быть выполнено через определение величины магнитного потока и дальнейшего определения величины магнитной индукции по формуле

$$B = \Phi/S, \quad (11)$$

где S – площадь сечения измерительной катушки.

Измерение магнитной индукции в неравномерных магнитных полях возможно лишь в определенной точках магнитного поля. Для этого

измерительная катушка должна иметь небольшие размеры и помещаться в различные точки исследуемого магнитного поля. Чем меньше габариты измерительной катушки, тем точнее можно определить индукцию в данной точке поля. Однако уменьшение площади измерительной катушки имеет предел, определяемый чувствительностью измерительного устройства.

Измерение магнитной индукции возможно также специально созданными измерительными устройствами.

3.3. Ферромодуляционный тесламетр.

Работа ферромодуляционных преобразователей (феррозондов), использующихся в ферромодуляционных тесламетрах, основана на нелинейном характере намагничивания ферромагнитных материалов, который особенно сильно проявляется в ферритах и сплавах типа пермаллой. Принцип работы феррозондов основан на изменении магнитного состояния ферромагнитного сердечника при одновременном воздействии на него переменного и постоянного магнитных полей (либо двух переменных полей различных частот) и явления электромагнитной индукции.

На рис. 16 показана принципиальная схема феррозонда, состоящего из двух идентичных по размерам и свойствам пермалловых сердечников, расположенных параллельно друг другу. На сердечники нанесены две обмотки: намагничивающая и сигнальная. Намагничивающая обмотка состоит из двух одинаковых частей, нанесенных на каждый стержень. Направление витков намагничивающей обмотки на отдельных стержнях выбрано таким, чтобы магнитные потоки в стержнях были направлены противоположно (потоки Φ_{\sim}). Намагничивающая обмотка включается на переменное синусоидальное напряжение. Сигнальная обмотка охватывает оба сердечника. Такая конструкция феррозонда обеспечивает отсутствие ЭДС в сигнальной обмотке при входном сигнале (напряженность постоянного измеряемого поля H_0), равном нулю, так как потоки, создаваемые обмотками, одинаковы и направлены встречно.

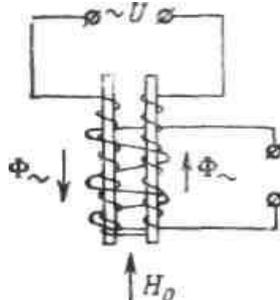


Рис. 16. Схема феррозонда

При наличии постоянного измеряемого поля с напряженностью H_0 , вектор которого параллелен оси сердечника, связь между напряженностью и магнитной индукцией сердечников выражается несимметричной основной кривой намагничивания, в отличие от того, как это было при отсутствии постоянного поля. В этом случае кривая переменной составляющей индукции B_{\sim} станет

несимметричной относительно оси времени и разложение в ряд функции $B(t)$ будет содержать не только нечетные гармоники (как при отсутствии постоянного измеряемого поля), но и четные. Это приводит к тому, что в выходной сигнальной обмотке появится ЭДС, содержащая четные гармоники. При этом величина четных гармоник выходного сигнала в определенных пределах зависит линейно от величины напряженности H_0 измеряемого магнитного поля, т.е. $E_2 = kB_0 = k_1H_0$, где k и k_1 – коэффициенты преобразования, зависящие от параметров ферромодуляционного преобразователя, частоты и значения напряженности поля возбуждения; B_0 – измеряемая магнитная индукция; H_0 – напряженность магнитного поля.

Фаза четных гармоник изменяется на 180° при изменении направления постоянного поля. Таким образом, по величине четных гармоник на выходе сигнальной обмотки можно судить о величине напряженности постоянного магнитного поля. На практике обычно используется вторая гармоника ЭДС, которая после фильтрации и усиления измеряется вольтметром.

Упрощенная структурная схема прибора для измерения напряженности магнитного поля с использованием феррозондов с удвоением частоты изображена на рис. 17. Напряжение частотой ω от генератора 1 подается на обмотки феррозонда 2. Выходной сигнал датчика подается на вход избирательного усилителя 3, усиливающего вторую гармонику, затем на индикаторное уст-во 4.

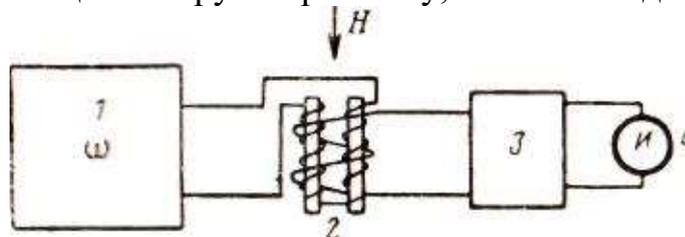


Рис. 17. Структурная схема феррозондового измерителя магнитного поля

Ферромодуляционные тесламетры используются для измерения магнитной индукции (или напряженности магнитного поля) в малых постоянных и низкочастотных переменных магнитных полях (H от 10^{-5} до 100 А/м, B от $1,0$ до 10^{-6} мТл). Благодаря высокой чувствительности, достаточно высокой точности измерения (порядка 1–5 %), возможности проведения непрерывных измерений эти приборы нашли широкое распространение при технических измерениях.

В последнее время все более широкое применение находят цифровые ферромодуляционные тесламетры, которые имеют повышенную точность и быстродействие.

3.4. Тесламетры Холла

Магнитометры на датчиках Холла обеспечивают высокую точность при измерении средних полей. При измерении слабых полей необходимо применять специальные методы коррекции погрешностей.

Рассмотрим использование ДХ для измерения внешнего поля B . Блок питания с внутренним сопротивлением $R_{БП}$ обеспечивает питание датчика

заданным в паспорте током. Ток I может быть переменным, постоянным и импульсным. Выбор рода тока определяется характером измеряемого поля (постоянное, переменное, импульсное) и его значением.

Постоянный управляющий ток чаще всего применяется при измерении сильных полей, когда ЭДС Холла достигает значительной величины (десятки милливольт – единицы вольт). Переменный ток применяется при измерении средних и слабых полей (ЭДС Холла от сотен микровольт до десятков милливольт) для повышения помехозащищенности и уменьшения влияния собственных шумов датчика. Импульсный управляющий ток $I_{\text{и}} > I$ используется в целях увеличения чувствительности датчика Холла, так как при таком виде тока не происходит повышения рассеиваемой в пластине Холла мощности и отсутствует ее перегрев даже при естественном охлаждении.

Датчик Холла обладает еще двумя важными параметрами, которые нужно учитывать при выборе схемотехнических решений. Это входное сопротивление $r_{\text{вх}}$ между токовыми электродами и выходное сопротивление $r_{\text{вых}}$ между холловскими потенциальными электродами, которые также указываются в паспорте. Выпускаются низкоомные датчики $r_{\text{вх}} = r_{\text{вых}} = 2 \dots 4$ Ом и высокоомные датчики $r_{\text{вх}} \sim r_{\text{вых}} = 500 \dots 1000$ Ом.

Нагрузкой датчика является вторичный измерительный преобразователь (с выходным сигналом U_y) или показывающий прибор с сопротивлением $R_{\text{н}}$. В этой схеме возможны два режима работы ДХ: режим заданного напряжения ($r_{\text{вх}} \gg R_{\text{БП}}$) и режим заданного тока ($r_{\text{вх}} \ll R_{\text{БП}}$). Выбор режима во многом диктуется необходимостью уменьшения температурной и временной погрешностей зависимости S_B , получением линейной зависимости U_y от индукции B в широком диапазоне полей и температур.

Для ряда датчиков минимальные температурные погрешности имеют ДХ при использовании их в режиме заданного тока, если сопротивление $R_{\text{н}}$ существенно больше $r_{\text{вых}}$. Для датчиков из InAs при выборе $R_{\text{н}} = 3r_{\text{вых}}$ получена линейная зависимость U_y от B . Некоторые зарубежные фирмы для датчика каждого типа приводят в паспорте значения $R_{\text{н}}$, при котором обеспечивается линейная зависимость U_y от B .

Как отмечалось ранее, одним из основных недостатков ДХ является наличие остаточного напряжения $E_{\text{нэ}}$. Его можно уменьшить различными схемными способами, например с помощью операционного усилителя с дифференциальным входом.

При измерении слабых магнитных полей основное требование, предъявленное к ДХ, – большая чувствительность и минимальное напряжение шумов. Датчики в этом случае питают переменным током, а вторичный измерительный преобразователь представляет узкополосный усилитель, настроенный на частоту тока питания.

При измерении средних магнитных полей используют питание постоянным током с дальнейшим преобразованием по схеме: модулятор, демодулятор или переменным током с усилителем переменного тока и детектированием. При измерении сильных магнитных полей применяются либо усилители постоянного тока, либо подают сигнал с датчика Холла непосредственно на показывающий магнитоэлектрический прибор. Для полей $B > 0,6$ Тл используют специальные методы линеаризации зависимости $U_y = F(B)$.

Структурная схема простейшего электронного тесламетра показана на рис. 18. Магнитоизмерительным преобразователем в рассматриваемом приборе является гальваномагнитный преобразователь Холла, в котором под действием магнитного поля возникает ЭДС.

После усиления ЭДС Холла ($E_x = S_B B$) измеряется милливольтметром, шкала которого может быть градуирована в единицах магнитной индукции при условии постоянства силы тока.

Тесламетры с преобразователем Холла просты в эксплуатации, позволяют измерять магнитную индукцию или напряженность постоянных, переменных (в широком диапазоне частот) и импульсных магнитных полей.

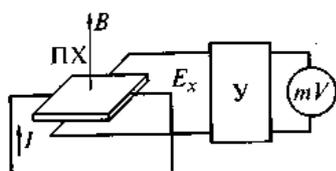


Рис. 18. Схема электронного цифрового измерителя индукции:
ПХ – преобразователь Холла;
У – усилитель

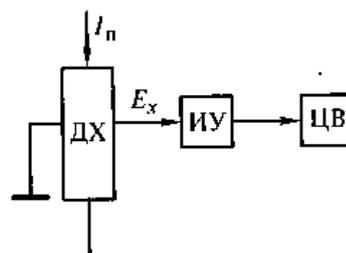


Рис. 19. Схема простейшего тесламетра с преобразователем Холла

В настоящее время выпускают в основном цифровые тесламетры. На рис. 19 показана схема цифрового измерителя индукции, основанного на способе прямого преобразования выходного сигнала с датчика Холла. Выходной сигнал E_x с датчика Холла, питаемого переменным током I_n , усиливается избирательным усилителем ИУ и измеряется цифровым милливольтметром ЦВ. Такая схема имеет невысокую точность из-за временной и температурной нестабильности самого ДХ и элементов схемы.

Для повышения точности измерения иногда применяют метод уравнивающего преобразования выходного сигнала с ДХ. Идея метода заключается в сравнении напряжения с датчика Холла с высокостабильным напряжением ЦАП. Для уменьшения времени измерения используют и другие методы, применяемые в цифровых приборах, например время-импульсное преобразование.

Весьма перспективным способом для автоматической коррекции погрешности цифровых измерителей магнитной индукции с преобразователями Холла является метод с использованием пробного сигнала, позволяющий автоматически корректировать изменения чувствительности аналоговых устройств, в частности ДХ и усилителей при повышенном быстродействии. В этом случае на преобразователь Холла, кроме измеряемого магнитного поля B_x , воздействуют дополнительным коммутируемым постоянным магнитным полем B_d , с помощью которого осуществляется автоматическая калибровка цифрового прибора.

Это наиболее распространенный вид магнитометров для измерения постоянных, переменных и импульсных полей. Диапазон измерений полей очень широк $10^{-5} \dots 10^2$ Тл, ширина частотного диапазона составляет $0 \dots 30$ кГц. Погрешность измерения индукции – $0,2 \dots 2,5$ %.

3.5. Квантовые тесламетры. Используются для измерений магнитных индукций постоянных и переменных магнитных полей в диапазоне значений от 0,01 до 10 Тл. В постоянных полях квантовые тесламетры позволяют проводить измерения малых индукций (до 10^{-6} Тл). Достоинством является высокая точность измерения индукции (погрешность измерения менее 0,005 %) и практическая безинерционность (быстродействие прибора $0,1 \dots 0,001$ с). Для измерения слабых магнитных полей применяют приборы, основанные на оптической накачке атомов или на свободной прецессии ядер. Переменные магнитные поля чаще всего измеряют магнитометрами с использованием методов электронного или ядерного резонанса. Современные магнитометры снабжены индивидуальными датчиками, которые подключаются к измерительной части. Приборы имеют аналоговые или цифровые отсчетные устройства, а также устройства для обработки полученной информации с помощью ЭВМ.

Магнитометр, основанный на вынужденной ядерной прецессии, предназначен для измерения индукции средних и сильных постоянных полей. Упрощенная структурная схема прибора приведена на рис. 20.

Квантовый магнитоизмерительный преобразователь МИП, содержащий ампулу с рабочим веществом, помещают в измеряемое поле B_x так, чтобы ось обмотки возбуждения ОВ была перпендикулярна направлению поля. Генератор высокой частоты ГВЧ создает высокочастотное электромагнитное поле $h \sim c$ частотой ω . Индуктивность обмотки ОВ и емкость конденсатора C образуют колебательный контур с добротностью Q генератора ГВЧ. Изменяя емкость конденсатора, можно добиться явления ядерного магнитного резонанса при условии $\omega = \omega_0$.

При резонансе угол прецессии магнитных моментов ядер резко увеличивается за счет поглощения ядрами энергии ОВ. Это

приводит к изменению добротности Q , а следовательно, и к уменьшению напряжения U_1 , на выходе генератора. Для наблюдения этого явления визуально (например, на электронном осциллографе ЭО) необходимо, чтобы резонанс повторялся периодически, а сигнал U_1 был непрерывным.

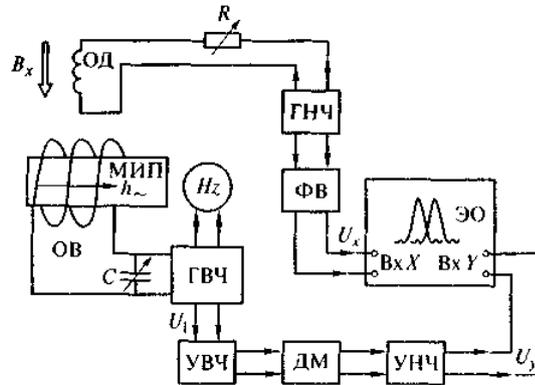


Рис. 20. Структурная схема квантового тесламетра (магнитометра), основанного на вынужденной ядерной прецессии

Для этого создают дополнительное переменное низкочастотное поле B_M , модулирующее измеряемое постоянное поле B_X полем низкой частоты f_M . Поле модуляции получают с помощью дополнительной обмотки ДО, в которую подают ток от генератора низкой частоты ГНЧ. Значение поля модуляции можно изменять за счет изменения сопротивления R , что позволяет изменять чувствительность прибора.

Мгновенное значение частоты прецессии атомов в МИП, находящихся под воздействием трех полей имеет вид: $\omega_{0t} = \gamma(B_X + B_M \sin \omega_M t)$, где γ — известное гиромагнитное отношение. При условии $(\omega_0 - \omega_M) < \omega < (\omega_0 + \omega_M)$ поглощение энергии за один период модуляции повторяется дважды.

Для наблюдения резонансных кривых на электронном осциллографе ЭО формируют два сигнала U_Y и U_X , поступающие на его входы Y и X . Сигнал U_Y формируется следующим образом: высокочастотное модулированное резонансное напряжение U_1 , усиливается усилителем высокой частоты УВЧ, затем с помощью демодулятора ДМ и усилителя низкой частоты УНЧ из него выделяется резонансный ядерный сигнал U_Y (рис. 20, экран ЭО).

Сигнал U_X представляет собой модулирующее напряжение, развертывающее сигнал резонанса по оси X . С помощью фазовращателя ФВ можно точно определить положение резонанса по осциллографу: два импульса, показанные на экране, должны быть симметричными относительно середины развертки. Таким образом, изменяя частоту ω , добиваются изображения, показанного на экране осциллографа. В этот момент высокочастотным частотомером Hz измеряют частоту генератора ГВЧ f . Значение измеряемого поля определяют с высокой точностью из выражения $B_X = 2nf/\gamma$.

Конструктивно МИП и обе катушки ОВ и ОД помещены в тонкостенный медный стакан и совместно с высокочастотным кабелем представляют собой зонд

(датчик) магнитометра. В приборе Е11-2, созданном по описанной схеме, имеются четыре датчика, содержащих ядра с различными гиромагнитными постоянными γ , что позволяет проводить измерения магнитной индукции в диапазоне 0,025...2,5 Тл.

Идея метода **свободной прецессии** заключается в следующем. Как и в предыдущем случае, МИП представляет собой ампулу с жидкостью, ядра атомов которой обладают магнитными моментами, с нанесенной на нее измерительной обмоткой ИО. Если создать сильное поляризующее поле B_{Π} (может создаваться с помощью специальной поляризационной обмотки ПО), перпендикулярное измеряемому полю B_x , причем $B_{\Pi} \gg B_x$, то через некоторое время (время релаксации) магнитные моменты ядер будут ориентированы вдоль поля B_{Π} . При быстром снятии поля B_{Π} магнитные моменты ядер, практически не меняя своего направления, будут совершать прецессию вокруг измеряемого поля B_x с частотой $\omega_x = \gamma B_x$ и индуцировать ЭДС в приемной катушке ИО с частотой f_x .

Происходящие при этом релаксационные процессы затухания, связанные со скоростью расфокусировки прецессии отдельных ядер, входящих в состав рабочего вещества, приводят к уменьшению угла и амплитуды прецессии, а следовательно, и амплитуды сигнала в катушке ИО. Таким образом, при создании магнитометров этого типа необходимо учитывать две важные особенности: весьма малый сигнал в приемной катушке ИО (порядка нескольких микровольт) и ограниченное релаксационными процессами время для измерения частоты f_x (для разных рабочих веществ максимальное время релаксации затухания не превышает 1 ... 2 с).

Датчики этих магнитометров могут содержать не две катушки (ИО и ПО), а одну, которая выполняет функции измерительной и поляризационной обмоток. Наиболее распространен однокатушечный вариант квантового тесламетра на методе свободной прецессии (рис. 21). МИП выполнен в виде тора с одной обмоткой О, которая выполняет функцию обмотки ИО, а в определенный момент времени и функцию поляризующей обмотки ПО. Такая конструкция позволяет получать сигнал прецессии при любой ориентации датчика в пространстве. В качестве рабочего вещества РВ использован гептан (C_7H_{16}) – жидкость с временами релаксации 2,1; 1,2 с, практически не зависящими от температуры.

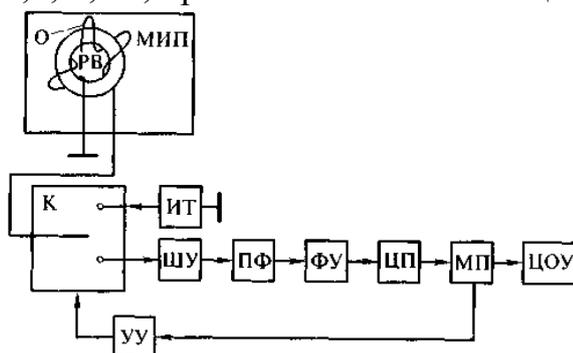


Рис. 21. Структурная схема квантового тесламетра (магнитометра), основанная на методе свободной прецессии

Устройство управления УУ связано с микропроцессором МП, который задает программу выполнения работы. На цифровое отсчетное устройство ЦОУ выводятся значения измеренной индукции B_x . Коммутатор К, управляемый УУ, подключает к источнику тока ИТ измерительную обмотку О, в результате чего создается поляризующее поле $B_{п}$. Временные интервалы, определяемые временами релаксации, устанавливаются программно с помощью МП. По истечении заданного времени коммутатор подключает О к каналу измерения, на выходе которого в цифровой форме на ЦОУ формируется результат измерения в соответствии с выражением $B_x = 2nf_x/\gamma$.

За это время сигнал с ИО должен быть усилен широкополосным усилителем ШУ с малым уровнем собственных шумов и большим коэффициентом усиления ($\approx 10^6$). Для улучшения соотношения сигнал/шум в схеме применен полосовой фильтр ПФ. Далее сигнал поступает на формирующее устройство ФУ, задача которого – обеспечить надежную работу последующего цифрового периодометра ЦП. Периодометр, построенный на методе последовательного счета, формирует измерительный интервал, длительность которого составляет определенное число периодов частоты сигнала свободной прецессии ядер рабочего вещества, и преобразует число зафиксированных импульсов частоты эталонного генератора за этот временной интервал в значение магнитной индукции, нТл.

Сверхпроводниковые тесламетры. Приборы для измерения магнитных полей с уникальной чувствительностью, высокой точности и быстродействием. Магнитоизмерительные приборы базируются на явлении сверхпроводимости, эффектах Мейснера и Джозефсона.

Тесламетр состоит из преобразователя, криостата и электронного измерительного устройства, служащего для выделения и измерения ЭДС.

Магнитоизмерительный преобразователь представляет собой сплошной цилиндр из сверхпроводящего материала, на который намотана обмотка. На цилиндре, помещенном в измеряемое магнитное поле, имеется нагреватель, который обеспечивает периодический, с частотой 1 МГц, нагрев и охлаждение его до температуры больше или меньше критической для данного сверхпроводящего материала. Это приводит к периодическому выталкиванию измеряемого магнитного потока (эффект Мейснера) из объема цилиндра и к изменению потокосцепления его с обмоткой. В результате в обмотке возникает ЭДС, пропорциональная частоте тока нагревателя, числу витков катушки, сечению цилиндра и напряженности измеряемого магнитного поля (измеряется составляющая поля, совпадающая с направлением оси цилиндра).

3.6. Методы и приборы для измерения магнитного потока

Приборы для измерения магнитного потока называются веберметрами или флюксметрами, чаще всего основаны на явлении электромагнитной индукции. В своем составе должна иметь измерительную катушку, являющейся преобразователем магнитной величины (B, H, Φ) в ЭДС.

Флюксметр содержит устройство, осуществляющее интегрирование импульса ЭДС или импульса тока. В настоящее время применяется три группы флюксметров: электромеханические приборы (баллистический гальванометр и магнитоэлектрический веберметр), фотогальванометрические веберметры и электронные аналоговые и цифровые веберметры.

Приборами, которые выполняют интегрирование с помощью магнитоэлектрического измерительного механизма, являются баллистический гальванометр (интегратор тока) и магнитоэлектрический веберметр (интегратор ЭДС).

а) *Баллистический гальванометр*

Баллистический гальванометр – это магнитоэлектрический гальванометр с увеличенными моментом инерции и периодом свободных колебаний $T_0 = 10$ с, благодаря чему первый максимальный отброс его указателя I_{\max} пропорционален количеству электричества Q , т.е. он является интегратором кратковременного импульса тока (длительность импульса тока τ должна быть не более $0,1 T_0$).

Измерение постоянного магнитного потока баллистическим методом основано на измерении количества электричества в импульсе тока, возникающего в замкнутом контуре измерительная катушка – баллистический гальванометр, при изменении измеряемого потока, сцепленного с измерительной катушкой.

Для измерения постоянного магнитного потока помощью баллистического гальванометра собирается схема (рис. 22). Измерительная катушка w и резистор r_1 соединяются последовательно, образуя цепь с сопротивлением $r = r_{\text{бг}} + r_{\text{ик}} + r_1$.

Быстрое удаление катушки из измеряемого магнитного поля или быстрое ее внесение в поле сопровождается изменением магнитного потока, пронизывающего катушку, и появлением в ней э.д.с. E , а, следовательно, и тока i

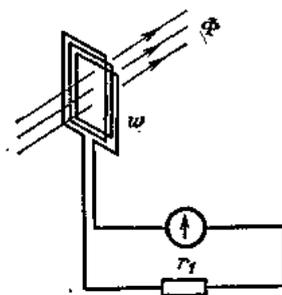


Рис. 22. Схема измерения баллистическим гальванометром

$$e = -w_{\text{ук}} \frac{d\Phi}{dt}$$

$$i = \frac{e}{r} = -W_{\text{ик}} \frac{d\Phi}{dt},$$

откуда электрический заряд idt , возникающий при изменении магнитного потока на величину $d\Phi$ за время dt , выражается так

$$dQ = idt = -\frac{W_{\text{ик}}}{r} d\Phi.$$

Электрический заряд, который пройдет по цепи за время dt , если магнитный поток изменится от 0 до Φ , будет:

$$Q = -\frac{W_{\text{ик}}}{r} \Phi,$$

а если поток изменится от Φ до нуля, то

$$Q = \frac{W_{\text{ик}}}{r} \Phi.$$

Из последнего выражения можно получить значение магнитного потока:

$$\Phi = \frac{r}{W_{\text{ик}}} Q.$$

Заряд Q , проходя по цепи, вызывает отброс подвижной части гальванометра, который будет пропорционален заряду, если время протекания заряда будет достаточно мало по сравнению с периодом колебания гальванометра. Таким образом, $Q = C_q \alpha$,

а магнитный поток

$$\Phi = \frac{r}{W_{\text{ик}}} C_q \alpha.$$

Величина $C_\Phi = rC_q$ – баллистическая постоянная, выражающая магнитный поток, отнесенный к одному делению шкалы (Вб/деление). Следовательно, по баллистическому отбросу гальванометра можно определять магнитный поток.

Баллистическая постоянная зависит от сопротивления цепи гальванометра, так как при изменении сопротивления изменяется электромагнитное торможение. Ввиду этого при определении магнитного потока подставляют значение постоянной, соответствующее сопротивлению цепи гальванометра, которое было при измерении.

Для определения баллистической постоянной (рис. 23), установив ток I_1 , при некотором сопротивлении r_M магазина резисторов перебрасываем ножи переключателя из положения 1 в положение 2.

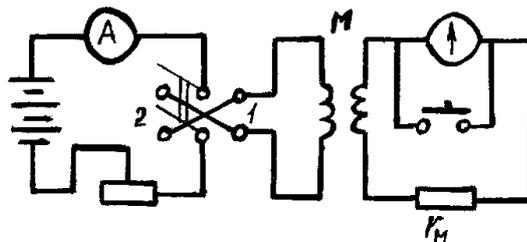


Рис. 23. Схема для определения баллистической постоянной гальванометра

При этом ток изменится от $+I_1$ до $-I_1$, а потокосцепление вторичной обмотки катушки взаимной индуктивности M изменится на

$$2MI_1 = 2w_2\Phi_2.$$

Изменение потокосцепления вызовет протекание заряда Q и отброс гальванометра на угол α .

Заряд $Q = 2w_2\Phi_2/r_2 = 2MI_1/r_2$, т.е. имеет коэффициент 2, так как ток изменяется от $+I_1$ до $-I_1$. Баллистическая постоянная при этом равна

$$C_\Phi = r_2 \frac{Q}{\alpha} = 2MI_1/\alpha.$$

Определение баллистической постоянной C_Φ производят при различных значениях резистора r_2 , после чего строят график $C_\Phi = f(r_2)$, которым и пользуются при работе с баллистическим гальванометром.

Баллистический гальванометр обеспечивает высокую чувствительность и точность при измерении магнитных величин, но является прибором с неградуированной шкалой, требующим определения постоянной C_Φ при каждом значении R . Значение C_Φ можно найти, используя образцовую катушку взаимной индуктивности с известным магнитным потоком. В современных стационарных гальванометрах постоянная C_Φ находится в пределах $10^{-6} \dots (5 \cdot 10^{-5})$ Вб·м/мм, в переносных в пределах $(5 \cdot 10^{-6}) \dots (5 \cdot 10^{-3})$ Вб/дел.

б) магнитоэлектрический веберметр

Веберметром называется магнитоизмерительный прибор для измерения магнитного потока со шкалой, градуированной в единицах магнитного потока – веберах. Применяют веберметры следующих видов: магнитоэлектрические, фотогальванометрические, электронные аналоговые и цифровые.

В магнитоэлектрическом веберметре используется стрелочный магнитоэлектрический измерительный механизм без противодействующего момента, но с большим моментом магнитоиндукционного успокоения. Ток к подвижной части прибора подводится при помощи безмоментных токоподводов.

Схема включения веберметра аналогична схеме включения баллистического гальванометра. Принципиальным отличием является характер движения подвижных частей магнитоэлектрического измерительного механизма. Подвижная часть веберметра обладает ничтожным моментом инерции, поэтому, в отличие от баллистического гальванометра, нельзя считать, что она не успевает повернуться на сколько-нибудь значительный угол за время прохождения импульса тока.

Работа веберметра основана на свойстве магнитного потока замкнутого контура сохраняться неизменным. Следовательно, уменьшение магнитного потока, сцепленного с измерительной катушкой, вызовет поворот рамки гальванометра на угол α , приводящий к увеличению потокосцепления подвижной рамки магнитоэлектрического механизма, компенсирующего уменьшение потокосцепления измерительной катушки.

Магнитное поле веберметра однородное и радиальное, поэтому изменение потокосцепления ее рамки будет пропорционально углу поворота α

$$w_{\text{ик}} \Phi = BS w_p \alpha,$$

откуда соотношение между измеряемым магнитным потоком Φ и углом поворота стрелочного указателя определяется соотношением

$$\Phi = \frac{BS w_p}{w_{\text{ик}}} \alpha = \frac{C}{w_{\text{ик}}} \alpha,$$

где C – постоянная веберметра, w_p – количество витков рамки измерительного механизма, $w_{\text{ик}}$ – количество витков измерительной катушки.

Шкала веберметра может быть градуирована в единицах магнитного потока.

Противодействующий момент веберметра ничтожно мал, поэтому для установки стрелки в нулевое положение он имеет вспомогательный магнит, в воздушном зазоре которого расположена вспомогательная рамка. Переключив веберметр на вспомогательную рамку и изменяя ее положение с помощью специальной рукоятки изменяют величину потокосцепления этой рамки, что вызывает поворот катушки веберметра. Таким образом, производится установка стрелки веберметра на нуль шкалы перед началом процесса измерения.

Ценным качеством веберметра в отличие от баллистического гальванометра является независимость его показаний от скорости изменения измеряемого потока. Его можно использовать для регистрации изменений магнитных потоков во времени. Он прост и удобен в работе, его показания в широких пределах не зависят от сопротивления цепи включения веберметра и времени изменения потокосцепления. Верхний предел измерений составляет от 500 до 10^4 мкВб.

Относительно низкая чувствительность и малая точность, а также необходимость установления указателя на нулевую отметку шкалы вручную – основные недостатки прибора. В значительной мере лишены этих недостатков фотогальванометрические и электронные веберметры.

в) фотогальванометрический веберметр

На рис. 24 приведена упрощенная схема фотогальванометрического веберметра, построенная по принципу компенсационного преобразования со статической характеристикой. Фотогальванометрический веберметр представляет собой фотогальванометрический усилитель с отрицательной

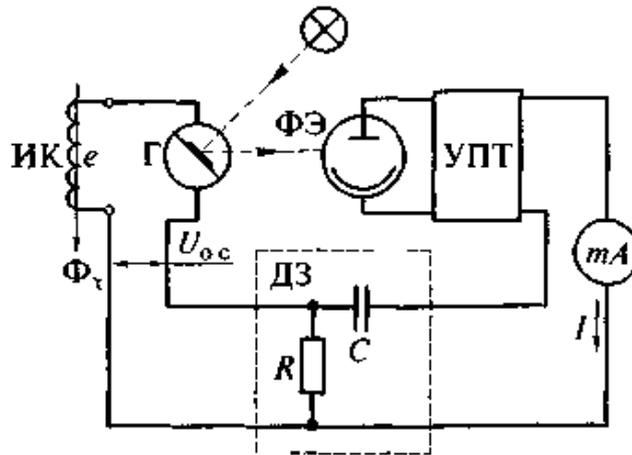


Рис. 22. Схема фотогальванометрического веберметра обратной связью по производной выходного тока, которая осуществляется с помощью RC -цепи. При изменении потока, сцепляющегося с витками измерительной катушки ИК, на ее зажимах возникает ЭДС e .

Под действием ЭДС в цепи магнитоэлектрического гальванометра Г потечет ток, при этом подвижная часть гальванометра повернется, что вызовет изменение светового потока, падающего на фотоэлемент ФЭ, а следовательно, и фототока. Фототок усиливается усилителем постоянного тока УПТ.

Выходной ток I усилителя преобразуется с помощью дифференцирующего звена ДЗ в напряжение обратной связи $U_{oc} = k \frac{dI}{dt}$, которое поступает в цепь измерительной катушки. Поворот подвижной части гальванометра и изменение фототока будут происходить до тех пор, пока напряжение обратной связи U_{oc} не уравновесит ЭДС, т.е.

$$k \frac{dI}{dt} = \frac{w_k \frac{d\Phi_x}{dt}}{dt}.$$

В процессе измерения происходит интегрирование ЭДС e во времени, что приводит к установлению зависимости, при которой изменение силы тока в цепи миллиамперметра $\Delta I = w_k \Delta \Phi_x / k$, где w_k – число витков измерительной катушки; $\Delta \Phi_x$ – измерение измеряемого потока; k – постоянная цепи обратной связи. Таким образом, по силе тока можно судить о потоке Φ_x . Шкалу миллиамперметра градуируют в единицах магнитного потока.

Фотогальванометрический веберметр обладает высокой точностью и чувствительностью, что позволяет измерять весьма малые магнитные потоки (2... 500 мкВб). Благодаря действию отрицательной обратной связи входное сопротивление прибора увеличивается, что дает возможность использовать измерительные катушки с высоким сопротивлением (100 Ом и более).

В настоящее время находят применение также электронные аналоговые и цифровые веберметры. В аналоговом электронном веберметре интегрирующее звено выполняется в виде интегрирующего усилителя. Трудность создания такого типа веберметров заключается в том, что для нормального функционирования ин-

тегрирующего усилителя требуется усиление весьма малых ЭДС порядка 10... 100 мкВ. Для этого часто используются специальные магнитомодуляционные усилители. Электронные веберметры также обладают высокой чувствительностью (предел измерений 25...2500 мкВб), но погрешность их меньше, чем у предыдущих приборов (порядка 1 %). Значительное увеличение точности измерения магнитного потока (погрешность измерения +0,05 %) может обеспечить цифровой веберметр, основанный на преобразовании выходного сигнала измерительной катушки с помощью АЦП в частоту импульсов и получением отсчетов на цифровом табло.

В ряде случаев в цифровом веберметре измерение магнитного потока осуществляется путем измерения времени разряда интегрирующего конденсатора, который заряжается током измерительной катушки. В настоящее время для производственного контроля разработан компактный переносной интегрирующий флюксметр ФК-4 с цифровым отсчетом, который с успехом может заменить баллистический гальванометр. Более точными характеристиками обладает цифровой микровеберметр Ф5050 с автоматической установкой нуля и порогом чувствительности порядка 10^8 Вб.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Магнитные материалы делят на три группы: магнитомягкие (обычно используются для магнитопроводов); магнитотвердые (служат источниками магнитного поля); материалы со специальными свойствами. Статические и динамические характеристики магнитных материалов и методы их определения регламентируются соответствующими ГОСТами и нормативными документами.

Аппаратура для определения характеристик и параметров магнитных материалов состоит из намагничивающих и измерительных обмоток, средств измерения, регистрации, обработки полученной информации и различных вспомогательных устройств.

В промышленных установках для определения статических характеристик магнитных материалов определяют индукцию B с помощью индукционно-импульсного метода, а напряженность поля H – косвенно по силе тока в намагничивающей катушке и ее параметрам или с помощью магнитоизмерительных приборов. В установках для определения динамических характеристик магнитных материалов обычно используют индукционный магнитоизмерительный преобразователь и различные способы измерения его выходного сигнала.

1.1. Образцы для испытаний

Испытание магнитных материалов стремятся проводить при равномерном намагничивании материала, когда индукция в различных сечениях образца одинакова. Для испытания магнитного материала в замкнутой магнитной цепи

используют образцы в виде кольца, что обеспечивает наибольшую точность измерения.

Если намагничивающая обмотка нанесена равномерно по периметру образца, то напряженность поля внутри образца на основании закона полного тока может быть рассчитана по формуле

$$H = w_1 I / (2\pi R_{\text{ср}}),$$

где w_1 – число витков намагничивающей обмотки; I – ток в намагничивающей обмотке; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус, определяемый как среднее арифметическое внешнего и внутреннего радиусов кольца $(R_{\text{вн}} + R_{\text{вн}})/2$.

Чем больше относительная разность между внутренним и внешним радиусами, тем больше радиальная неоднородность поля в образце, поскольку плотность намотки внутри кольца больше. Например, при отличии внутреннего радиуса от внешнего на 10 и 20 % напряженности поля вблизи внешней и внутренней поверхности кольца отличаются соответственно на 5 и 10 %. Для более точного определения радиуса окружности, вдоль которой напряженность поля равна среднеарифметическому максимальной и минимальной напряженностей, применяют кольца с отношением $R_{\text{вн}}/R_{\text{вн}} = 1,2$.

Но изготовление кольцевых образцов – сложное дело, связанное не только с их изготовлением, но и нанесением обмотки, поэтому гораздо проще испытывать образцы материалов в виде полос, стержней.

Для испытаний образцов из листового материала применяют замкнутые магнитные цепи, имеющие форму квадрата. Сторонами квадрата являются пакеты, содержащие равное количество полос из исследуемого материала одинакового размера, при этом для исключения анизотропии материала одна половина полос в каждом пакете нарезана вдоль проката, другая – поперек. Поскольку катушки не могут охватить всю магнитную цепь, намагничивание по периметру получается неоднородным и возникают потоки рассеяния. Кроме того, в местах соединения пакетов образуются воздушные зазоры. Расчет напряженности поля в образце по закону полного тока дает большую погрешность.

Для испытания образцов являющихся частью замкнутой магнитной цепи используются аппараты, которые называются пермеаметрами. С их помощью испытываются образцы в виде параллелепипедов, цилиндров, полос, при напряженностях поля более 25 кА/м.

Схема устройства одного из пермеаметров дана на рис. 24. Он представляет собой массивный магнитопровод 1 прямоугольной или круглой формы, изготовленный из магнитомягкого материала. Через боковые отверстия вводится и укрепляется испытуемый стержневой образец 2. Магнитопровод из стали с большой магнитной проницаемостью имеет сечение в десятки раз больше сечения образца, вследствие чего сопротивление его значительно меньше сопротивления образца. Образец находится внутри намагничивающей обмотки w_1 ,

измерительная катушка w_2 размещена на каркасе под намагничивающей и прилегает к поверхности образца.

Воздушный зазор между магнитопроводом и образцом увеличивает магнитное сопротивление цепи и является источником погрешностей. Для уменьшения этих погрешностей пользуются поправочными кривыми.

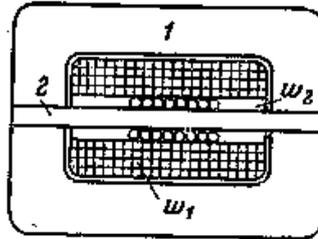
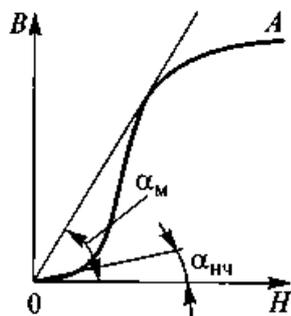


Рис. 24. Устройство пермеаметра

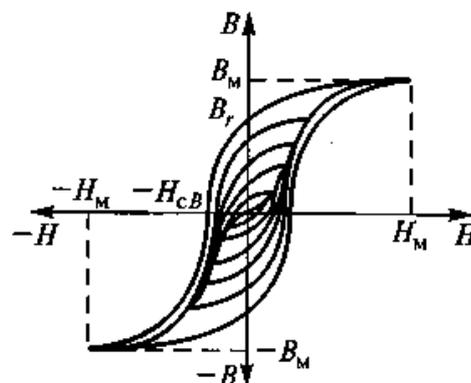
1.2. Основные статические характеристики

Это – характеристики материалов, определяемые в постоянных магнитных полях и позволяющие отличить один материал от другого. К ним относятся: основная кривая намагничивания и симметричная петля гистерезисного цикла, площадь которой пропорциональна энергии, затрачиваемой на перемагничивание, а точки пересечения с осями координат позволяют определить основные магнитные характеристики материалов (рис. 25).

Начальная кривая намагничивания (рис. 25,а) представляет собой зависимость магнитной индукции от напряженности намагничивающего поля $B = f(H)$. Кривая ОА получается при монотонном увеличении напряженности поля предварительно размагниченого образца. На практике чаще пользуются основной кривой намагничивания $B = f(H)$, являющейся



а



б

Рис. 25. Основные статические характеристики материалов:

а – начальная кривая намагничивания;

б – основная кривая намагничивания

геометрическим местом вершин симметричных гистерезисных петель (рис. 23,б). Из основной кривой намагничивания определяют значения нормальной магнитной проницаемости $\mu = B/H$ для различных значений B и H . Из предельной гистерезисной петли находят остаточную индукцию материала B_r и коэрцитивную силу H_{cB} (напряженность поля, при которой $B = 0$), индукцию насыщения B_M , относительную магнитную проницаемость $\mu_{отн}$ и ее начальное $\mu_{нч}$ и максимальное значения μ_{max} .

Наиболее распространенный способ определения статических характеристик – индукционно-импульсный метод с использованием баллистического гальванометра и веберметра. На рис. 26 представлена схема для получения основной кривой намагничивания и петли гистерезисного цикла с помощью баллистического гальванометра.

Перед получением кривой намагничивания требуется определить баллистическую постоянную гальванометра. Для этого, поставив ножи переключателя Π_1 в положение 1, кнопку K_1 замыкают и получают цепь, изображенную на рис. 23. Процесс определения баллистической постоянной гальванометра изложен там же.

Перед испытанием образец размагничивается воздействием на него изменяющегося по направлению и уменьшающегося по величине магнитного поля. Для этого кнопки K и K_2 замыкаются (рис. 24), ножи переключателя Π_1 ставятся в положение 2, а ножи переключателя Π_2 в произвольное положение 1 или 2. Установив реостатом r_2 намагничивающий ток, соответствующий напряженности поля около 40 А/см, производят несколько (шесть-десять) переключений направления тока; затем несколько уменьшают ток и снова делают ряд переключений направлений тока и так далее, уменьшая ток сначала до возможного минимума, а затем и до нуля.

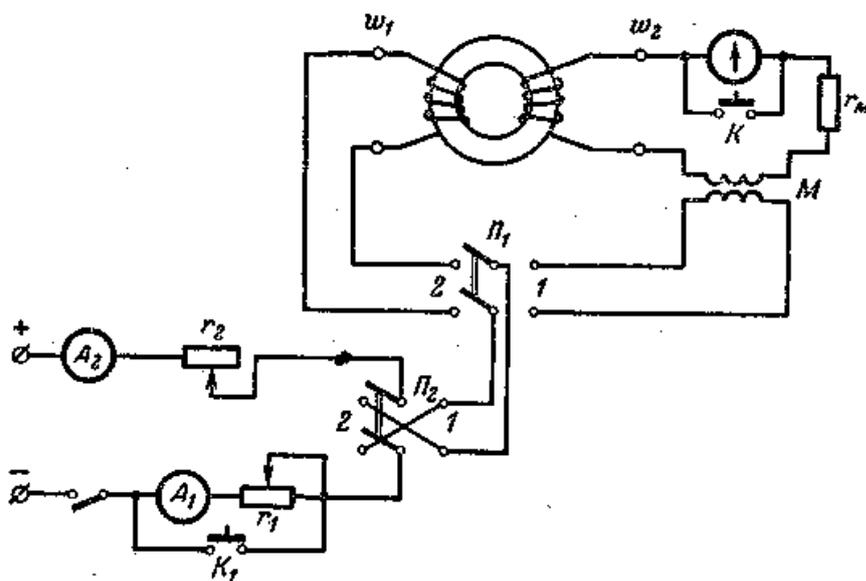


Рис. 26. Схема для снятия статических характеристик

магнитных материалов

1.3. Получение основной кривой намагничивания. Для получения основной кривой намагничивания предварительно выбирают напряженности поля, при которых будут получены гистерезисные петли. Задавшись напряженностями поля, определяют соответствующие им намагничивающие токи, исходя из формулы

$$H = I_l w / l.$$

При получении основной кривой намагничивания кнопки К и К₁ замыкаются, ножи переключателя П₁ ставятся в положение 2, а П₂ – в положение 1.

Для получения первой петли с наименьшими значениями H и B , вершина которой будет первой точкой искомой кривой, устанавливают при помощи реостата r_2 и амперметра A_2 вычисленный намагничивающий ток. Сделав переключателем П₂ ряд переключений (шесть-десять), поставим ножи переключателя в положение 1. Такое многократное переключение намагничивающего тока приводит образец в состояние, определяемое симметричной гистерезисной петлей, и носит название магнитной подготовки образца. Таким образом, в нашем случае магнитное состояние образца будет характеризоваться точкой, являющейся вершиной первой симметричной гистерезисной петли.

Разомкнув кнопку К и убедившись, что указатель гальванометра стоит на нуле, перебрасывают ножи переключателя из положения 1 в положение 2, отсчитывают при этом баллистический отброс гальванометра и замыкают кнопку К. При этом переключении напряженность поля изменилась с $+H_1$ на $-H_1$, а магнитная индукция — с $+B_1$ на $-B_1$, т.е. магнитная индукция изменилась на $2B_1$.

Для получения второй, а затем и следующих точек основной кривой намагничивания поступают аналогичным образом, т.е. устанавливают намагничивающий ток, выполнив магнитную подготовку, ставят ножи переключателя П₂ в положение 1. Разомкнув кнопку К, перебрасывают ножи переключателя П₂ из положения 1 в положение 2, отсчитывают баллистический отброс, замыкают кнопку К и определяют вершину второй гистерезисной петли.

Так определяют все точки основной кривой намагничивания, включая точку наибольшей напряженности поля при данном испытании.

Получение петли гистерезисного цикла. Для получения точек симметричной гистерезисной петли выбираются произвольно напряженности магнитного поля и определяются соответствующие им намагничивающие токи, при которых будет определяться магнитная индукция.

Для получения каждой из точек петли экспериментально определяется разность между максимальной индукцией B_m и магнитной индукцией, соответствующей выбранной напряженности поля.

Определение точек петли, расположенных на нисходящей части ее в первом квадранте (рис. 27), производится следующим образом. Ножи переключателя Π_1 (рис. 26) ставятся в положение 2, переключателя Π_2 — в положение 1. Кнопки K и K_1 замкнуты.

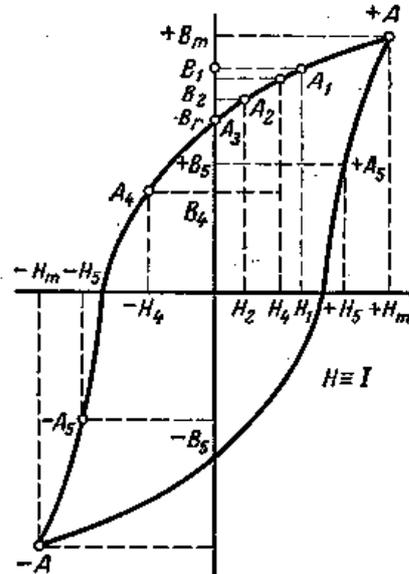


Рис. 27. Петля гистерезиса

Размыкая кнопку K_1 , устанавливают реостатом r_1 намагничивающий ток I_1 соответствующий напряженности поля H_1 . Замкнув кнопку K_1 переключателем Π_2 , выполняют магнитную подготовку, после которой ножи переключателя Π_2 ставят в положение 1. Разомкнув кнопку K и убедившись в том, что указатель гальванометра, стоит на нуле шкалы, размыкается кнопка K_1 . Отметив баллистический отброс, замыкается кнопка K .

При размыкании кнопки K_1 ток уменьшился с $+I_m$ до I_1 , напряженность поля — с $+H_m$ до H_1 и магнитная индукция с $+B_m$ до B_1 .

Если определить по баллистическому отбросу изменение магнитной индукции

$$\Delta B_1 = B_m - B_1 = \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_1$$

искомое значение магнитной индукции

$$B_1 = B_m - \Delta B_1 = B_m - \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_1.$$

Аналогично точке A_1 (H_1 и B_1) на рис. 25 находятся и другие точки кривой, расположенные в первом, квадранте.

При нахождении точки A_3 (рис. 25), соответствующей остаточной индукции B_r , после магнитной подготовки и установки ножей переключателя Π_2 в положение 1 размыкают кнопку K и, размыкая цепь намагничивающего тока переключателем Π_2 , отмечают баллистический отброс и находят остаточную индукцию по формуле

$$B_r = B_m - \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_r.$$

Определение точек гистерезисной петли, расположенных во II и III квадрантах рис. 27, производится так же, как и точек, расположенных в I квадранте, с той лишь разницей, что вслед за магнитной подготовкой и размыканием кнопки K_1 тотчас производится переключение ножей переключателя Π_2 из положения 1 в положение 2. При этом намагничивающий ток изменится, например, от $+I_m$ до $+I_4$ и от $+I_4$ до $-I_4$; напряженность поля изменится от $+H_m$ до $+H_4$ и от $+H_4$ до $-H_4$; магнитная индукция – от $+B_m$ до $+B_4$.

Определяемое по баллистическому отбросу изменение магнитной индукции

$$\Delta B = B_m - B_4 = \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_4,$$

а искомое значение магнитной индукции

$$B_4 = B_m - \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_4.$$

Последняя точка A находится по отбросу гальванометра при переключении переключателя Π_2 из положения 1 в положение 2 после магнитной подготовки.

Изменение магнитной индукции

$$\Delta B = B_m - (-B_m) = 2B_m = \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha,$$

а искомое значение магнитной индукции

$$B_m = \frac{C_\Phi}{2S_w} \alpha.$$

Вторая половина гистерезисной петли строится по первой половине исходя из условий симметрии.

Динамические характеристики магнитного материала

Эти характеристики зависят не только от качества самого материала, но и от формы и размеров образца, формы кривой и частоты намагничивающего поля. При намагничивании магнитного материала переменным магнитным полем магнитная индукция изменяется по кривой, называемой *динамической петлей*. Динамическая петля и ее площадь определяют полную энергию, рассеиваемую за цикл перемагничивания, т.е. потери за счет гистерезисных явлений, вихревых токов, магнитной вязкости и т.д. Семейство динамических петель характеризует магнитный материал при данных размерах образца, форм и частоте магнитного поля. Геометрическое место вершины динамических петель называется *динамической кривой намагничивания*. Важными параметрами магнитных материалов в переменных магнитных полях являются различные виды магнитной проницаемости.

1.4. Использование амперметра и вольтметров

Динамические испытания магнитных материалов наиболее просто осуществить, располагая амперметром действующих и вольтметрами амплитудных и средних значений.

Амперметр PA и вольтметры $PV1$ и $PV2$ включают в электрические цепи намагничивающей w_1 и измерительной w_2 обмоток испытуемого образца, как показано на рис. 28.

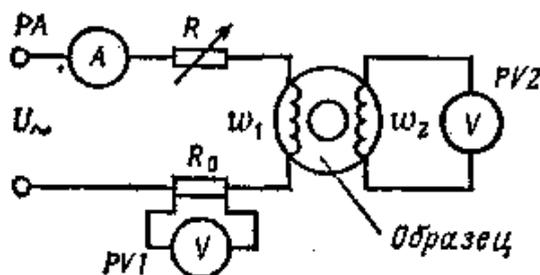


Рис. 28. Схема соединений при определении динамических характеристик магнитных материалов с помощью амперметра и вольтметров

Если активное сопротивление R в цепи намагничивающей обмотки велико, то при синусоидальном напряжении питания форма кривой напряженности поля в образце близка к синусоидальной. В этом случае напряженность H_m вычисляют по ранее упоминавшейся формуле

$$H_m = \sqrt{2}Iw_1/l_{cp}.$$

Если же активное сопротивление $R = 0$, то близкой к синусоидальной оказывается форма кривой индукции, и для определения напряженности поля в образце измеряют вольтметром амплитудных значений $PV1$ падение напряжения U_m на образцовом резисторе R_0 . Очевидно, что

$$H_m = U_m w_1 / (R_0 l_{cp}).$$

Магнитная индукция B_m в любом случае выражается через среднее значение ЭДС, наводимой в обмотке w_2 и измеряемой вольтметром средних значений $PV2$, следующим образом:

$$B_m = \frac{E_{2cp}}{4fw_2S_0} \cong \frac{U_{2cp}}{4fw_2S_0},$$

где U_{2cp} – показание вольтметра; f – частота; w_2 – число витков измерительной обмотки; S_0 – площадь поперечного сечения образца.

Изменяя намагничивающий ток и измеряя H_m и B_m , можно по полученным значениям построить зависимость $B_m = f(H_m)$, а также определить амплитудную магнитную проницаемость $\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$.

1.5. Феррометр

Получить основную кривую намагничивания и определить потери в стали при переменном токе позволяет феррометр.

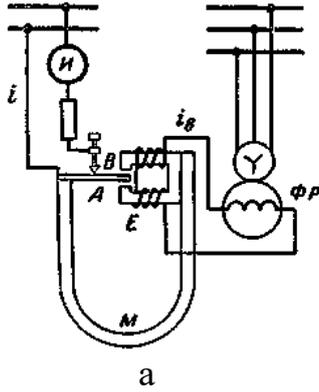


Рис. 29.Схема феррометра.

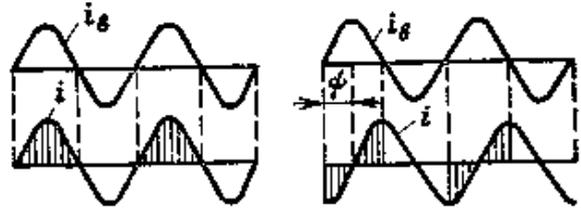


Рис. 30. Кривые токов в феррометре.

Он состоит из магнитоэлектрического измерителя И, фазорегулятора и вибрационного выпрямителя (рис. 29), состоящего из магнита М, электромагнита Е и якоря-вibrator А.

Обмотка электромагнита присоединена к ротору фазорегулятора. Фаза тока i_{δ} электромагнита может изменяться поворотом ротора. В течение одного полупериода тока возбуждения якорь замыкает цепь измерителя в точке В; в течение второго полупериода – цепь измерителя разомкнута. Если ток i_{δ} и ток измерителя совпадают по фазе, то в течение каждого периода через измеритель будет проходить положительная полуволна тока (рис. 30,а) и показания измерителя будут пропорциональны среднему за полупериод значению измеряемого тока (напряжения). Если токи i_{δ} и i не совпадают по фазе, то через измеритель в течение каждого периода будет проходить часть положительной и часть отрицательной полуволн тока и показания измерителя будут пропорциональны произведению среднего значения измеряемого тока (напряжения) и косинуса угла ψ сдвига между токами i_{δ} и i , т.е.

$$\alpha = kI_{cp} \cos \psi.$$

Например, при $\psi = 90^{\circ}$ показание измерителя будет равно нулю (рис. 30,б), так как $\alpha = kI_{cp} \cos \psi = kI_{cp} 0 = 0$.

Измеритель градуируется в действующих значениях напряжения при синусоидальной форме кривой напряжения.

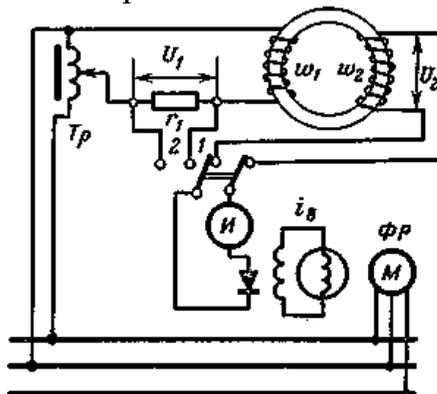


Рис. 31. Принципиальная схема соединения для испытания стали

при помощи феррометра

Образец стали для испытания имеет форму кольца сечением S , массой 50 г. На него наматываются намагничивающая w_1 и измерительная w_2 обмотки (рис. 31).

При испытании измеритель подключают к обмотке w_2 . Ротор фазорегулятора поворачивают до тех пор, пока измеритель не даст наибольшего показания, что соответствует совпадению по фазам токов i_e и i в цепи обмотки w_2 . Прибор измерит напряжение U_2 на зажимах обмотки w_2 , которое можно выразить так:

$$U_2 = 4,44fw_2B_mS.$$

Отсюда значение магнитной индукции в образце

$$B_m = U_2/(4,44fw_2S)$$

Определив напряжение U_2 , не изменяя положения ротора фазорегулятора, включим прибор на зажимы сопротивления r_1 . Напряжение U_1 на зажимах этого безреактивного резистора пропорционально току I намагничивающей обмотки w_1 . В этом случае прибор измерит активную слагающую напряжения $U_{1a} = r_1I\cos\varphi$, так как между током i_e (имеющим ту же фазу, что и U_2) и током измерителя (имеющим ту же фазу, что и ток в резисторе r_1) будет угол сдвига φ . Зная активное сопротивление r_1 , определим и активную слагающую намагничивающего тока:

$$I_a = I\cos\varphi = \frac{U_{1a}}{r_1}.$$

Переключив прибор на обмотку w_2 поворотом ротора фазорегулятора, получим нулевое показание измерителя, что укажет на изменение фазы тока i_e на 90° . Теперь, переключив прибор на сопротивление r_1 , измерим реактивную слагающую напряжения $U_{1r} = r_1I\sin\varphi$, откуда реактивная слагающая намагничивающего тока

$$I_r = I\sin\varphi = \frac{U_{1r}}{r_1}.$$

Магнитное поле, созданное обмоткой w_1 , имеет напряженность

$$H_m = \sqrt{2}I\sin\varphi w_1/l.$$

Магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{B_m}{H_m} = \frac{B_m l}{\sqrt{2}\sin\varphi w_1},$$

где l – длина осевой линии образца.

Мощность потерь в образце на гистерезис и вихревые токи, отнесенная к единице массы стали, $P_{c0} = U_2I\cos\varphi \frac{w_1}{w_2} \frac{1}{G}$, где G – масса образца.

Проведя ряд подобных измерений при различных напряжениях на зажимах намагничивающей обмотки, определяют для различных напряженностей поля H соответствующие значения B и μ , что позволяет построить кривые

$$B_m = f(H) \quad \text{и} \quad \mu = f(H).$$

Кроме того, определив удельные потери P_{co} при различных значениях B_m , строят кривую $P_{co} = f(B_m)$.

1.6. Получение магнитных характеристик с применением электронного осциллографа

Для приближенного определения гистерезисных петель на переменном токе часто используется осциллографический метод. Одна из схем для получения магнитных характеристик с применением электронного осциллографа дана на рис. 32.

На испытуемый кольцевой образец наложены две равномерно намотанные обмотки – намагничивающая w_1 и измерительная w_2 . Обмотка w_1 и безреактивный низкоомный резистор r_1 через автотрансформатор присоединены к сети.

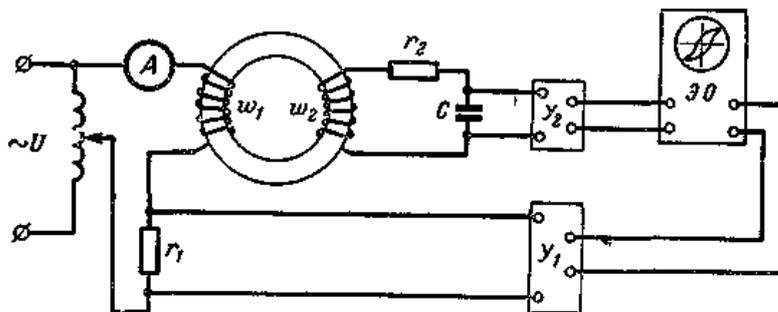


Рис. 32. Схема получения магнитных характеристик с применением электронного осциллографа

Падение напряжения на резисторе r_1 , пропорциональное намагничивающему току, а следовательно, и напряженности поля в образце, через усилитель U_1 подается на горизонтальные пластины осциллографа.

На вертикальные пластины осциллографа через усилитель U_2 подается напряжение, снимаемое с конденсатора C , включенного последовательно с измерительной обмоткой w_2 и большим сопротивлением r_2 .

Согласно второму закону Кирхгофа для измерительного контура можно записать

$$e_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 + u_c,$$

где e_2 – ЭДС измерительной обмотки, L_2 – индуктивность измерительного контура.

Параметры измерительного контура выбираются так, чтобы выполнялось условие

$$i_2 r_2 \gg L_2 \frac{di_2}{dt} + u_c.$$

Тогда предыдущее уравнение примет следующий вид $e_2 = i_2 r_2$, откуда

$$i_2 = e_2 / r_2 = (w_2 S / r_2) dB / dt.$$

Напряжение на конденсаторе, подаваемое на вертикально отклоняемые пластины, пропорционально магнитной индукции в образце

$$u_c = \frac{1}{c_2} \int i_2 dt = \frac{w_2 S}{r_2 c_2} B(t) .$$

Видно, что напряжение на вертикальных пластинах осциллографа пропорционально мгновенным значениям магнитной индукции в образце.

Таким образом, луч осциллографа будет описывать динамическую петлю гистерезиса.

Достоинством осциллографического метода является возможность наблюдения и регистрации динамических петель, оценки влияния на них различных внешних факторов (температуры, дефектов образца и т.д.) в широком диапазоне частот. По этой причине осциллографический метод удобно применять для браковки испытываемых образцов и готовых изделий. Кроме того, осциллографический метод эффективен в случае испытания образцов в различных режимах намагничивания, например в случае одновременного намагничивания постоянным и переменным полем, импульсного намагничивания и т.д. Устройства с использованием осциллографа для определения магнитных характеристик материалов называются ферротестерами.

Погрешность осциллографического метода в определении координат точек основной и гистерезисной кривых оценивается величиной порядка 10 %.

1.7. Определение потерь в стали ваттметровым методом

За каждый период переменного тока сталь перемагничивается и в ней происходит потеря энергии на перемагничивание – потеря на гистерезис.

Изменение магнитного потока вызывает появление в стали э.д.с. И вихревых токов, что также связано с потерями энергии – потерями на вихревые токи.

Мощность потерь на гистерезис

$$P_{\Gamma} = \eta f B_m^n V,$$

где η — коэффициент гистерезиса; V — объем стали; $n = 1,2 \div 2$ (в зависимости от магнитной индукции).

Мощность потерь на вихревые токи

$$P_B = \xi f^2 \Delta^2 B_m^2 V ,$$

где ξ – коэффициент вихревых токов; Δ – толщина листов стали.

Из последнего соотношения следует, что для данного сорта стали потери зависят от частоты тока и максимальной индукции.

Определение мощности потерь в стали ваттметровым методом, идея которого принадлежит Доливо-Добровольскому, производится на аппарате Эпштайна для испытания стали.

Он состоит из четырех длинных (до 0,5 м) катушек, укрепленных на раме, и зажимов для крепления образцов стали. Каждая катушка имеет по две обмотки с

одинаковым числом витков – первичной (намагничивающей) и вторичной (измерительной). Внутри катушек закладываются пакеты стали, образующие замкнутый магнитопровод. Пакеты набираются из полос листовой стали, например, длиной 0,5 м, шириной 3 см. Половина полос нарезается вдоль проката листов, другая половина — в перпендикулярном направлении. Полосы изолируются друг от друга папиросной бумагой. Масса всех пакетов 10 кг или 1 кг.

При включении цепи (рис. 33) на переменное напряжение ваттметр измерит мощность P , состоящую из:

- 1) мощности потерь в стали $P_c = P_r + P_b$;
- 2) мощности потерь в вольтметре $P_v = U^2/r_v$
- 3) мощности потерь в цепи напряжения ваттметра $P_u = U^2/r_u$.

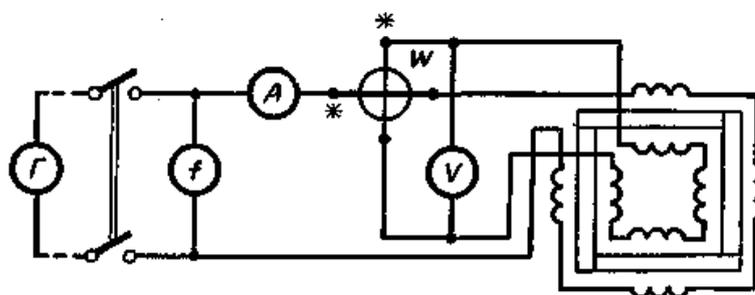


Рис. 33. Схема соединения для испытания стали ваттметровым методом

Следовательно, измеренная ваттметром мощность $P = P_c + P_v + P_u$, откуда мощность потерь в стали

$$P_c = P - (P_v + P_u).$$

Разделив мощность потерь в стали на ее массу G , определим мощность потерь, отнесенную к единице массы стали: $P_{c0} = P_c / G$. Так как мощность потерь в стали зависит от магнитной индукции, то последнюю необходимо знать при определении потерь.

Магнитная индукция

$$B_m = U / 4,44 f w S,$$

которая непосредственно вытекает из известной формулы

$$U = E = 4,44 f w S B_m,$$

где U – напряжение, измеряемое вольтметром, приблизительно равное э.д.с., наведенной в обмотке аппарата E , так как падение напряжения в ней мало; S – сечение образца, определяемое по его массе и плотности материала.

Величина потерь в материале зависит от ряда факторов: величины максимальной индукции, частоты, размеров и свойств образца. Поэтому определение потерь производится при определенных условиях (определенная частота, определенная величина максимальной магнитной индукции, синусоидальный характер индукции) и на образцах определенной формы, предусмотренных стандартами.

1.8. Разделение потерь в стали

Для разделения потерь в стали можно воспользоваться установкой рис. 30, питаемой от источника, допускающего регулировку частоты от 20 до 60 Гц.

Определив мощность потерь в стали при постоянной индукции и разных частотах, построим кривую зависимости мощности потерь от частоты $P_c = F(f)$ (рис. 34).

Как показано раньше, мощность потерь в стали

$$P_c = P_\Gamma + P_B = \eta B_m^n V + \xi f^2 \Delta^2 B_m^2 V \quad (12)$$

При постоянной магнитной индукции

$$P_c = P_\Gamma + P_B = \alpha f + \beta f^2 \quad (13)$$

где $\alpha = \eta B_m^n V$ – мощность потерь на гистерезисе за один период;

$\beta f = \xi \Delta^2 B_m^2 V f$ – мощность потерь на вихревые токи за один период.

Мощность потерь в стали за один период

$$P_{c1} = P_c / f = \alpha + \beta f. \quad (14)$$

Разделив ординаты кривой $P_c = F(f)$ при $B_m = \text{const}$ (рис. 34) на соответствующую им частоту f , получим

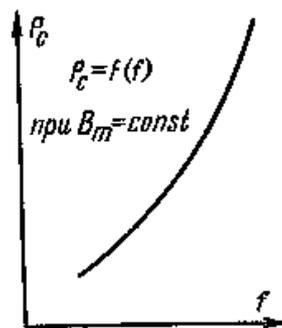


Рис. 34. Кривая мощности потерь в стали в зависимости от частоты

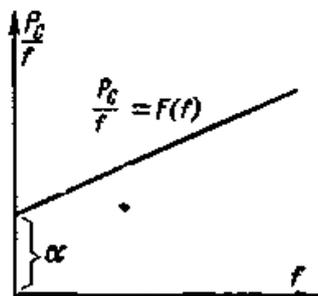


Рис. 35. Графический способ разделения мощности потерь в стали

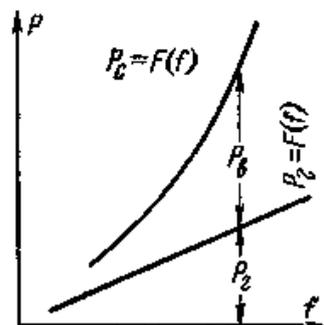


Рис. 36. Кривые мощности потерь в стали в зависимости от частоты

Значения ординат новой кривой (рис. 35) – кривой мощности потерь в стали за один период в зависимости от частоты $P_{c1} = F(f)$. Из уравнения (14) следует, что новая кривая является прямой линией, отсекающей на оси ординат отрезок,

равный первому члену a (14), т.е. мощности потерь на гистерезис за один период. Умножая полученное графически значение a на различную частоту, получаем мощность потерь на гистерезисе при различных частотах.

Вычитая из мощности потерь в стали мощность потерь на гистерезис при одной и той же магнитной индукцией при той же частоте, найдем мощность потерь на вихревые токи (рис. 33). Таким образом, возможно разделить потери в стали на потери от гистерезиса и потери на вихревые токи при постоянной индукции и разных значениях частоты.

Аналогичным образом можно произвести определение и разделение потерь в стали и для других значений магнитной индукции.

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего упорядочения все вещества можно подразделить на пять групп:

диамагнетики - материалы, атомы (ионы) которых не обладают результирующим магнитным моментом, т.е. в отсутствии внеш. магн. поля D . немагнитен. Внешне диамагнетики проявляют себя тем, что выталкиваются из магнитного поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и ее производные), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, и др.), большинство полупроводников и органических соединений и др. Диамагнетиками являются все вещества в сверхпроводящем состоянии.

парамагнетики - вещества, обладающее положительной магнитной восприимчивостью. К парамагнетикам относят кислород, окись азота, щелочные и щелочноземельные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов.

В парамагнетиках атомы (ионы) обладают собственным элементарным магнитным моментом даже в отсутствии внешнего поля. Из-за теплового движения эти магнитные моменты атомов (ионов) распределены хаотично, поэтому намагниченность вещества в целом равна нулю. Внешнее магнитное поле вызывает преимущественную ориентацию магнитных моментов атомов в одном направлении. В результате парамагнетик приобретает суммарный магнитный момент J , пропорциональный напряжённости поля H и направленный по полю. Тепловая энергия противодействует магнитной упорядоченности. Поэтому парамагнитная восприимчивость сильно зависит от температуры.

Благодаря положительной намагниченности парамагнетики, помещенные в неоднородное магнитное поле, втягиваются в него. В очень сильных полях и при низких температурах в парамагнетиках может наступать состояние магнитного насыщения, при котором все элементарные магнитные моменты ориентируются параллельно H .

ферромагнетики (вещество, обладающее ферромагнитными свойствами). К ферромагнетикам относятся Fe, Co, Ni. Любое ферромагнитное тело разбито на домены – малые области самопроизвольной (спонтанной) намагниченности. В отсутствие внешнего магнитного поля, направления векторов намагниченности различных доменов не совпадают, и результирующая намагниченность всего тела может быть равна нулю.

антиферромагнетики - вещества, в которых ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки, поэтому намагниченность вещества в целом равна нулю. Под действием внешнего магнитного поля антиферромагнетики приобретают слабую намагниченность. Повышение температуры приводит к потере намагниченности и переходу в

парамагнитное состояние. Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов

Ферримагнетики К ферримагнетикам относят вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Во внешнем магнитном поле ферримагнетик намагничивается подобно ферромагнетику. У некоторых ферримагнетиков существует температурная точка компенсации, в ней $M_s = 0$. При температуре выше Кюри точки ферримагнетизм исчезает. Свойствами ферримагнетиков обладают ферриты.

Магнитное состояние вещества характеризуется вектором намагниченности J . По определению J равно сумме магнитных моментов всех электронов, расположенных в единице объема вещества.

Классификация магнитных материалов

К **слабомагнитным** относят диамагнетики и парамагнетики.

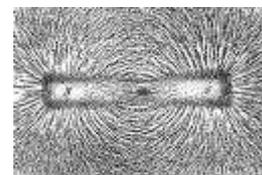
К сильномагнитным – ферромагнетики, которые, в свою очередь, могут быть магнитомягкими и магнитотвердыми. К магнитомягким относят магнитные материалы с малой коэрцитивной силой (H_c 800 А/м) и высокой магнитной проницаемостью обладающие свойствами ферромагнетика или ферримагнетика, причём их коэрцитивная сила по индукции составляет не более 4 кА/м. Они обладают способностью намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях, характеризуются узкой петлей гистерезиса и малыми потерями на перемагничивание. Магнитомягкие материалы используются в основном в качестве различных магнитопроводов: сердечников дросселей, трансформаторов, электромагнитов, магнитных систем электроизмерительных приборов.

К магнитотвердым относят материалы с большой коэрцитивной силой. Они перемагничиваются лишь в очень сильных магнитных полях и служат в основном для изготовления постоянных магнитов.

Ферромагнетиками называют материалы, в которых собственное (внутреннее) магнитное поле может в сотни и тысячи раз превышать вызвавшее его внешнее магнитное поле.

Существует три типа процессов намагничивания ферромагнетиков:

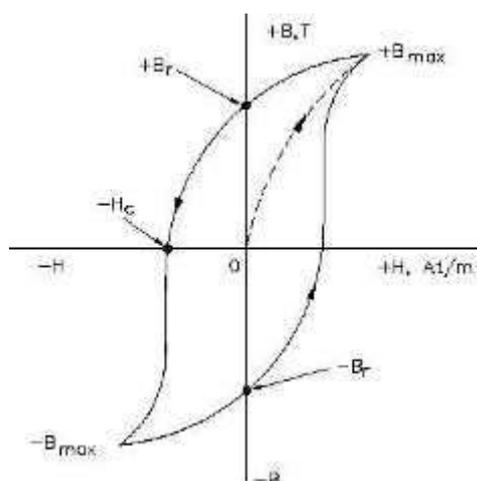
1. Процесс обратимого смещения магнитных доменов. В данном случае происходит смещение границ доменов, ориентированных наиболее близко к направлению внешнего поля. При снятии поля домены смещаются в обратном направлении. Область обратимого смещения доменов расположена на начальном участке кривой намагничивания.



2. Процесс необратимого смещения магнитных доменов. В данном случае смещение границ между магнитными доменами не снимается при снижении магнитного поля. Исходные положения доменов могут быть достигнуты в процессе перемагничивания.

Необратимое смещение границ доменов приводит к появлению магнитного гистерезиса – отставанию магнитной индукции от напряженности поля .

3. Процессы вращения доменов. В данном случае завершение процессов смещения границ доменов приводит к техническому насыщению материала. В области насыщения все домены поворачиваются по направлению поля. Петля гистерезиса, достигающая области насыщения называется предельной.



Предельная петля гистерезиса имеет следующие характеристики: B_{\max} – индукция насыщения; B_r – остаточная индукция; H_c - задерживающая (коэрцитивная) сила.

Материалы с малыми значениями H_c (узкой петлей гистерезиса) и большой магнитной проницаемостью называются магнитомягкими.

Материалы с большими значениями H_c (широкой петлей гистерезиса) и низкой магнитной проницаемостью называются магнитотвердыми.

При перемагничивании ферромагнетика в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые потери энергии, то есть материал нагревается. Эти потери обусловлены потерями на гистерезис и [потерями на вихревые токи](#). Потери на гистерезис пропорциональны площади петли гистерезиса.

Потери на вихревые токи зависят от электрического сопротивления ферромагнетика. Чем выше сопротивление – тем меньше потери на вихревые токи.