

Министерство образования и науки Российской Федерации
Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского

А.А. Князев, Н.Б. Ковылов, Ю.И. Левин, Ю.П. Шараевский

М А Г Н Е Т И З М

Учебно-методическое пособие к курсу «Электричество и магнетизм»
и к лабораторному практикуму по этому курсу

Саратов, 2011

УДК 530.10

К54 Князев А.А., Ковылов Н.Б., Левин Ю.И., Шараевский Ю.П. Магнетизм. Саратов: СГУ

Настоящее пособие содержит основные теоретические положения, лежащие в основе магнитных явлений и которые по известным причинам не рассматриваются в теоретическом курсе электромагнетизма. Эти сведения будут полезны студентам как при подготовке к практикуму, так и при работе на семинарах.

Вторая часть пособия содержит руководство по лабораторным работам, поставленным в интегрированном учебно-научном практикуме «Методика, технология и информационное обеспечение физического эксперимента». Описанные лабораторные работы отработаны на практике студентами факультета нелинейных процессов Дымовой Е.А., Цветковой Н.С. и Ахромеевым А.В. в ходе выполнения курсовых и дипломных работ.

Рекомендуют к печати:
кафедра нелинейной физики ФНП СГУ,
доцент кафедры общей физики СГУ А.В. Зборовский

УДК 530.10

© А.А. Князев, Н.Б. Ковылов,
Ю.И. Левин, Ю.П. Шараевский,
2011

Учебное издание

Князев Александр Александрович
Ковылов Николай Борисович
Левин Юрий Иванович
Шараевский Юрий Павлович

МАГНЕТИЗМ

Учебно-методическое пособие к курсу «Электричество и магнетизм»
и к лабораторному практикуму по этому курсу

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение разнообразия магнитных явлений и их изучение в практикуме конструктивно распределено по нескольким модулям. Каждый из модулей дает возможность провести цикл из двух-трех опытов, используя в разных режимах одно и то же устройство, блок питания, комплект измерительной аппаратуры и (при необходимости) шину подключения к компьютеру.

Кроме чисто конструктивного удобства и экономии лабораторной площади, такое объединение работ позволяет группе студентов выполнить две-три работы за одно занятие, не прибегая к потерям времени на освоение нового экспериментального стенда.

Перед выполнением очередной работы данного цикла необходимо познакомиться с ее описанием, понять физическую схему стенда, и сопоставить содержание краткого описания с известными теоретическими сведениями о конкретном наблюдаемом явлении. Важно понять, как организована методика регистрации и измерения изучаемых характеристик. По возможности, проведите элементарные оценки значений измеряемых величин (действующие поля, токи, напряжения, частоты, времена). Обратите внимание на измерительные приборы, источники питания, генераторы, осциллографы. Их главные характеристики: тип, класс точности, пределы измерения, быстродействие. Помните, что именно так формируются профессиональные навыки исследователя – возможно и вы в скором времени окажетесь перед необходимостью самостоятельного проведения эксперимента или организации измерений.

Далее осмысливается порядок работы, производится сборка и проверка установки, проверяется работоспособность узлов и приборов.

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Будем полагать, что основные сведения известны из курса школьной физики, а также из лекционного общего курса. Здесь обратим внимание на важнейшие физические величины и некоторые трудные моменты понимания в явлениях, которые рассматриваются в лабораторных работах данного практикума.

Вектор магнитной индукции и электромагнитная сила

Основной характеристикой магнитного поля является индукция \vec{B} . Эта величина, вместе с величиной напряженности электрического поля используется для описания электрического взаимодействия. Действительно, если заряды точечные электрические заряды q и Q неподвижны, то напряженность электростатического поля \vec{E} характеризует электрическую силу, действующую на заряд q со стороны другого заряда: $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot \vec{r}}{r^3}$. В результате получаем форму-

лу $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, которая справедлива и в случае если источник поля не является точечным, а имеет более сложную форму (здесь и далее использованы стандартные обозначения).

Если заряд Q равномерно движется в лабораторной системе отсчета со скоростью V , а скорость равномерного движения заряда q равна U , то взаимодействие зарядов ослабевает пропорционально квадрату скорости относительного движения. При этом характер его описания усложняется – из электростатического оно превращается в электродинамическое. С позиций современной физики это взаимодействие описывается уже двумя слагаемыми: электрическим и магнитным. В результате полное выражение для силы принимает вид

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot [\vec{U} \times \vec{B}] \text{ (сила Лоренца).}$$

Здесь электростатическое поле заряда описывается теперь как зависящее от скорости: $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot \vec{r}}{r^3} \cdot \frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta^2 \cdot \sin^2 \theta)^{3/2}}$, здесь $\beta = \frac{V}{c}$, θ – угол между направлением вектора скорости V и радиус вектора \vec{r} заряда q .

Дополнительно к электростатическому полю в описании возникает новое поле – магнитное – с характеристикой, получившей название магнитная индукция: $\vec{B} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \cdot c^2} \cdot \frac{Q \cdot [\vec{V} \times \vec{r}]}{r^3} \cdot \frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta^2 \cdot \sin^2 \theta)^{3/2}}$.

Важно отметить, что в отличие от электрического вектора \vec{E} , обладающего свойством коммутативности с другими векторами, магнитный вектор \vec{B} является аксиальным (антикоммутативным) – т.е. выражение силовых характеристик с его участием производится в виде векторного произведения. Это означает, что полный вектор силы Лоренца уже не подчиняется коммутативному закону преобразований Галилея при переходе к другой системе координат. Электрическое взаимодействие описывается единым шестикомпонентным полем, которое и называют электромагнитным. Строго говоря, все шесть составляющих образуют величину, называемую тензором второго ранга¹, поэтому использование только векторных представлений в задачах, связанных с преобразованием систем координат, невозможно. Отметим, что с тем же математическим аппаратом имеют дело в механике при описании деформации твердого тела: отклик на силу, приложенную в произвольной точке, часто сопровождается не только сжатием или растяжением, но и скручиванием². Именно в этой области науки первоначально зародилось понятие тензора (tensio – лат., упругость, натяжение). Неудивительно, поэтому, что математическое описание теории электричества было оформлено Дж.К. Максвеллом именно в терминах ме-

¹ В рамках этой терминологии скаляр и вектор суть тензоры нулевого и первого рангов, соответственно.

² Представьте, например, автомобиль с механизмом рессорных подвесок или пружинный пуфик.

ханики деформируемого тела (эфира), до момента предсказания (им же) явления электромагнитного излучения: возможности существования динамических полей без своих источников – зарядов и токов. Впервые на необходимость коррекции взглядов с позиции представлений о дальнем действии обратил внимание А. Эйнштейн, сумевший разрешить накопившиеся парадоксы.

Замечания

1. Ввиду многообразия методик изложения в различных общих курсах физики, обоснование некоторых релятивистских соотношений, используемых в данном пособии, приведено в ПРИЛОЖЕНИИ 1.

2. Для случая взаимодействия пробного заряда q не с одиночным зарядом Q , а с целой системой зарядов или с электрическим током, величины \vec{E} и \vec{B} рассчитываются в соответствии с принципом суперпозиции. Так, если для расчета электрической напряженности поля используют приемы электростатики, то расчет величины магнитной индукции основан на формуле Био-Савара-Лапласа $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{[d\vec{l} \vec{r}]}{r^3}$, указывающей алгоритм суммирования полей, порождаемых малыми элементами тока.

3. Значение силы взаимодействия, рассчитанное по вышеприведенным формулам, изменяется при переходе от одной системы отсчета к другой, поскольку другими становятся скорости всех носителей зарядов (включая и тех, что создают токи). При использовании аппарата релятивистской механики вид формулы для силы Лоренца остается прежним (инвариантным), но значения выражений для поля и соотношение между слагаемыми в формуле для силы Лоренца изменяется.

Вид формул преобразования:

$$\begin{aligned} E'_{\parallel} &= E_{\parallel}, & E'_{\perp} &= \gamma(E_{\perp} + [UB]) \\ B'_{\parallel} &= B_{\parallel}, & B'_{\perp} &= \gamma(B_{\perp} - [UE]/c^2) \end{aligned}$$

Для оценок полезно ориентироваться на инварианты преобразования, Указывающие, что для каждой пространственно-временной точки, координаты которой в разных системах связаны преобразованиями Лоренца, выполняются правила: $[\vec{E} \vec{B}] = [\vec{E}' \vec{B}'] = const$, причем, $E^2 - c^2 B^2 = E'^2 - c^2 B'^2 = const$.

В общем случае, если в одной системе заряды одинакового знака неподвижны, то в подвижной системе, при $V \ll c$, их магнитное поле $B_{\perp} \ll E_{\perp}$. В этом случае магнитную силу можно рассматривать как релятивистскую поправку к электрической силе. Наоборот, если система неподвижных зарядов электронейтральна (заряды разного знака), то в движущейся системе при $V \ll c$ электрическое поле $E_{\perp} \ll B_{\perp}$, так что в свою очередь электрическую силу можно рассматривать как релятивистскую поправку к магнитной. В то же время в пределе $V \rightarrow c$ в обоих случаях магнитное и электрическое действия приближаются по модулю друг к другу.

4. При ускоренном движении зарядов электрическое и магнитное поля изменяются так, что единое электромагнитное поле обнаруживает свойство независимости от порождающих его зарядов в процессе волнового распространения энергии, затраченной на ускорение источника. Теперь не только магнитная компонента поля, но и электрическая приобретают вихревой характер. В физических курсах показывается, что свободная электромагнитная волна как раз и является тем объектом, для которого и магнитное и электрическое поля совершенно равноправны.

5. Из приведенных формул видно и то, что в теории близкодействия (при $c \rightarrow \infty$), никакого магнетизма не существовало бы (или приводило бы к парадоксам). Так, если в нештрихованной системе заряд, порождающий поле, покоится, то есть его магнитное поле (B_{\parallel}, B_{\perp}) равно нулю, и если $c \rightarrow \infty$, то и в любой другой системе это поле не появится, (см. последнее слагаемое в последней формуле преобразования). Релятивистская природа магнетизма связана с отсутствием магнитных зарядов и является универсальным физическим фактом. Попытки оправдания классической теории Максвелла путем введения магнитного монополя предпринимались П.А-М. Дираком (1930), но не подтверждаются в экспериментах до настоящего времени.

Терминология и метрология

Введение величины магнитной индукции \vec{B} таким образом, как это сделано выше, стало возможным в физике относительно недавно – в начале XX-го века. К этому времени магнитные явления были известны сначала, по опытам над природными магнитами, позже по опытам взаимодействия магнитов с токами и далее – по взаимодействию токов. В это же время возникли термины и названия физических величин. С современных позиций – не всегда удачные. Так, линии магнитной индукции называли силовыми, как и линии электрического поля (М. Фарадей, ок.1830). Однако если вектор электрической силы действительно направлен по касательной к линиям вектора \vec{E} , то вектор магнитной силы не лежит по направлению линий \vec{B} . В современной терминологии линии магнитной индукции не называют силовыми. Еще большие сложности возникли с установлением единиц измерения значений магнитных (и электрических) величин. Несмотря на такие, казалось бы, естественные основные величины в электрической теории как заряд, напряженность электрического поля и индукция магнитного, в современной метрологии за базовую единицу, дополняющую основные единицы в электричестве выбрана величина силы тока с единицей Ампер. Эталон силы тока оказывается воспроизводимым с наибольшей точностью при измерении магнитного взаимодействия по формуле Ампера $d\vec{F} = I \cdot [d\vec{L} \vec{B}]$, которая для прямых параллельных токов имеет простой вид:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot L \cdot \frac{2I_1 \cdot I_2}{r}.$$

Ампер есть сила постоянного тока $I_1 = I_2$, который вызывает в двух тонких проводниках, расположенных параллельно на расстоянии $r = 1$ м друг от друга, силу F , равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на метр длины L .

Именно через Ампер и уже известные механические единицы определяются все остальные электромагнитные единицы. Приведем некоторые из них, поскольку порядок их введения на основе непосредственных измерений отличается от традиционной логической последовательности изучения соответствующих понятий в современных общих курсах физики:

Единица заряда: $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$,

Единица напряжения: $1 \text{ В} = 1 \text{ В} \cdot \text{м} / \text{А}$,

Единица сопротивления: $1 \text{ Ом} = 1 \text{ В} / \text{А}$

Единица напряженности: $1 \text{ В} / \text{м}$,

Единица магнитного потока: $1 \text{ Вб} = \text{Кл} \cdot \text{Ом}$

Единица магнитной индукции: $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб} / \text{м}^2$. Часто используют другую единицу (от системы СГС) – это Гаусс: $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$ (это, по порядку значения, поле вблизи поверхности Земли). Тогда, например, поле бытового магнита составляет около 100 Гс .

Поле в среде

Магнитная проницаемость. Если в область с магнитным полем \vec{B}_0 , которое образовано в вакууме токами проводимости (например, внутри соленоида), ввести вещество (по отношению к магнитному полю будем называть любое вещество магнетиком), то структура поля и его индукция в каждой точке изменится. Это связано, во-первых, с тем, что каждый атом или молекула вещества в общем случае имеет свое микроскопическое электромагнитное поле; во-вторых, и это поле может изменяться под воздействием внешнего поля. В итоге результирующее поле \vec{B} (усредненное по физически бесконечно малому объему вещества) складывается из первичного поля \vec{B}_0 и результирующего (макроскопического) внутреннего поля \vec{B}_i , созданного веществом: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_i$. Важно отметить, что поле \vec{B}_i , в свою очередь, создается под влиянием возникающего результирующего поля, и в простейшем линейном приближении оказывается пропорциональным именно этому результирующему полю \vec{B} (а не полю \vec{B}_0). В результате расчет самосогласованного поля в веществе составляет сложную задачу.

Для дальнейшего напомним, что каждый атом, как микроскопический контур с током, может быть охарактеризован своим магнитным моментом \vec{p}_m , а для удельной характеристики всего объема вещества вводят вектор намагниченности $\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}$. Эта физическая величина характеризует поле \vec{B}_i и может изменяться под воздействием внешнего поля. В теории показывается, что если магнетик однородный изотропный и бесконечным образом заполняет все про-

странство и не является постоянным магнитом, то ситуация с расчетом самосогласованного поля упрощается. Становится возможной скалярная пропорциональность³ $\vec{B}_i = \mu_o \vec{J}$, и более того, она оказывается совсем простой $\vec{B}_i = \chi \vec{B}_o$ (χ – магнитная восприимчивость вещества). В этом случае учет влияния среды сводится к введению скалярного коэффициента магнитной проницаемости:

$$\vec{B} = (1 + \chi) \vec{B}_o = \mu \vec{B}_o.$$

Добавим, что для обхода возникающих математических сложностей, возникающих в более сложных случаях, вводят вспомогательный вектор \vec{H} , который исторически получил название вектора напряженности магнитного поля. В современной литературе его называют просто "вектор H". Не касаясь неуместного здесь изложения общей теории магнетиков, скажем, что если среду можно считать однородной и изотропной, его связь напряженности с вектором магнитной индукции оказывается скалярной $\vec{B} = \mu \cdot \mu_o \vec{H}$.

Для важных приложений, которые будут использованы в данном практикуме, заметим, что при упомянутых здесь упрощениях вектор H приобретает простой и очень удобный физический смысл: он пропорционален полю \vec{B}_o , создаваемому токами проводимости в пустоте, до внесения магнетика. Точнее – он равен индукции этого поля в пустоте, деленной на μ_o . Для пустого соленоида, например, его значение пропорционально значению тока $H = nI$, где n – плотность намотки. Тогда индукция этого поля $B = \mu_o H$, а если внести магнетик, то поле усиливается (или ослабляется) $B = \mu \cdot \mu_o H$. Так внесение ферромагнитного сердечника усиливает индукцию поля в несколько сотен (тысяч) раз. Значения вектора H измеряются в А/м. Используются и дополнительные единицы: это единица системы СГС Эрстед ($1\text{А/м} = 1,26 \cdot 10^{-2} \text{Э}$) и более мелкая единица "гамма", употребляемая при исследованиях межпланетного пространства ($1\gamma = 1 \cdot 10^{-5} \text{Э}$, $1\text{А/м} = 1,26 \cdot 10^3 \gamma$). Так, индукции 1Тл (10 тыс. Гаусс) в воздухе соответствует напряженность 800кА/м , а индукции 1Гс соответствует напряженность $1\text{мЭ} = 100\gamma$.

Для измерения индукции используют эффекты, в которых проявляется суммарное полное поле токов и вещества, например, эффект электромагнитной индукции в катушке с сердечником из данного вещества. Ясно что, проводя измерения значений B и H , можно определить магнитную проницаемость.

Возможные значения магнитной проницаемости обусловлены конкуренцией в веществе физических механизмов, важнейшие из которых:

1. парамагнетизм – главным образом, вращение движущегося связанного электрона во внешнем магнитном поле. В результате магнитный момент начинает прецессировать, стремясь в среднем установиться по направлению внеш-

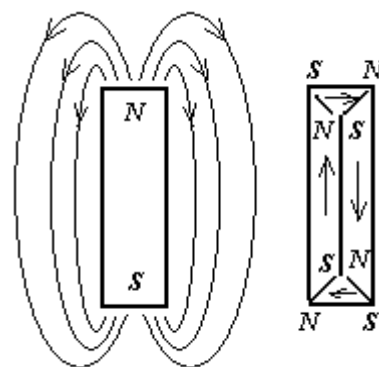
³ В общем случае каждая компонента вектора намагниченности может зависеть от всех компонент поля, и тогда необходима не скалярная, а тензорная запись условия пропорциональности.

него поля и усилить его. Процесс происходит на фоне хаотического теплового движения, которое препятствует ориентированию.

2. диамагнетизм – механизм возникновения наведенных магнитных моментов токов самоиндукции в движущихся микроскопических контурах каждого атома. Эти магнитные моменты стремятся ориентироваться против внешнего магнитного поля, ослабляя его.

3. ферромагнетизм⁴ – действует в постоянных магнитах, и исторически был первым магнитным явлением, с которым познакомился человек в практической деятельности. Значительно позже выяснилось, что в ряду других это – самый сложный эффект, для объяснения которого классических представлений совершенно недостаточно. В 1892г возникла теория доменной структуры естественных магнитов (Б.Л. Розинг, Россия), согласно которой микрокристаллики этих металлов должны быть в свою очередь разбиты на множество очень маленьких по-разному намагниченных объемов (до 10^{-14} см^3) – так называемых доменов. За счет механизма специфического взаимодействия атомов (так называемые обменные силы) домены самопроизвольно (спонтанно) намагничены в соседних областях по взаимноперпендикулярным или антипараллельным направлениям. Граница, разделяющая ферромагнитные домены⁵ между собой имеет толщину в несколько атомных диаметров. Такое разделение до определенного размера доменов, действительно, энергетически устойчиво и более выгодно, чем существование монокристаллической атомной структуры целого магнита с двумя полюсами. В этом случае магнитный поток полностью замыкается внутри кристалла так, что результирующая намагниченность образца равна нулю и энергия практически не тратится на создание внешнего поля (см. рис.). Стремление к энергетически более устойчивой конфигурации можно видеть, если свободно положить рядом два или несколько магнитиков. Однако, большой

размер доменов, таких, например, как показано на приведенном рисунке, где образец разделен всего на четыре части, невыгоден из-за энергетических затрат на поддержание формы границ. Поэтому обычно размеры доменов устанавливаются в пределах десятка-сотни микрон. При наложении внешнего поля и по мере его увеличения, домены постепенно ориентируются в направлении этого поля⁶, создавая в ферромагнетике намагничивание,



⁴ Остался незадачей механизм антиферромагнетизма с дополнительной внутренней классификацией, применительно к конкретным классам кристаллических решеток композитных материалов (ферритов).

⁵ Существуют и диэлектрические домены, в некоторых веществах – сегнетоэлектриках. Они как правило мельче: от 0,1 до 10 мкм.

⁶ В деталях устройство доменов сложнее: домены с различной ориентацией спинов имеют плавные границы (магнитные стенки) и перемагничивание связано с движением этих стенок.

которое может остаться и после снятия внешнего поля, если тепловое движение не достаточно интенсивно для разрушения организованной в образце структуры. Позже (после 1928, В. Гейзенберг, Я.И. Френкель, Я.Г. Дорфман, П. Вейсс и др.) было показано, что ферромагнетизм имеет квантовую природу и, действительно, возникает не в любых кристаллах, а лишь в тех, где параметр решетки превышает диаметр орбиты внешнего электрона более чем в 1,5 раза. Это условие выполняется для Fe, Co, Ni, Gd – в них и проявляется ферромагнетизм.

Преобладание одного из перечисленных механизмов в данном веществе определяет его соответствующее название в классификации магнетиков:

парамагнетики ($\mu \geq 1, \chi \sim 10^{-3}$),

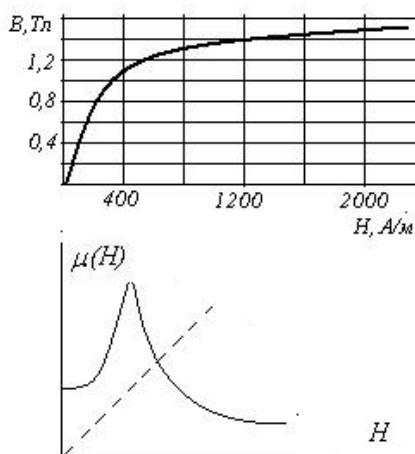
диамагнетики ($\mu \leq 1, \chi \sim 10^{-5}$),

ферромагнетики ($\mu \sim 10^4$) и т.д.

Сложность расчета характеристик магнетиков состоит, прежде всего, в том, что в намагниченности необходимо учитывать не только сумму орбитальных магнитных моментов электронов в атоме, но и внутренних (т. наз. спиновых) магнитных моментов электронов. Свойство спина является изначальным, специфическим – оно не сводится к более простому, также, как и заряд или масса, то есть не имеет механизма и дополняет орбитальное движение частиц в атоме. Ориентация спиновых моментов в атоме элемента определяется для каждого электрона законами распределения энергии микрочастиц по возможным квантовым состояниям.

Гистерезис намагничивания ферромагнетиков

Все ферромагнетики имеют нелинейную зависимость $\mu(H)$ или $B(H)$. Эта зависимость в практических случаях задается так наз. кривой намагничивания, получаемой экспериментально для каждого образца или материала (трансформаторное железо, магнитные сплавы).



На рисунке показаны обе названных зависимости. Верхняя кривая изображает зависимость индукции внутри ферромагнетика от напряженности внешнего намагничивающего поля для реального образца. Нижняя – поведение магнитной проницаемости в соответствии с законами ориентации доменов. При сопоставлении этих кривых нужно учесть связь

$$\vec{B} = \mu_0 \mu(H) \cdot \vec{H},$$

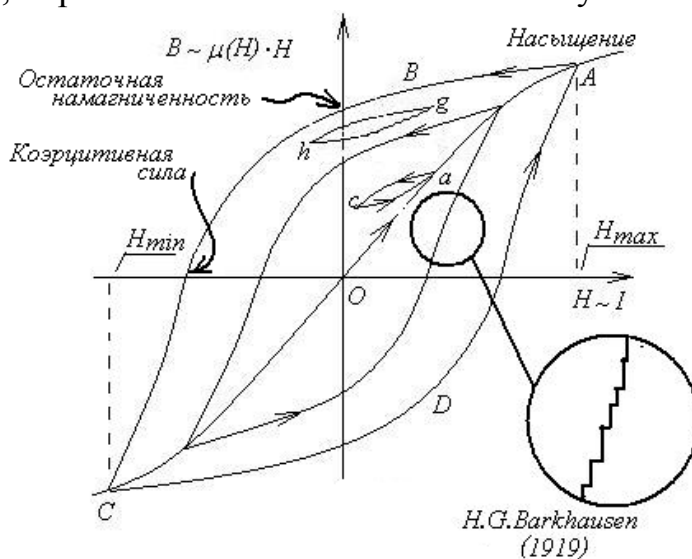
справедливую для изотропных сред, сохраняющих

нок с определенной скоростью – спиновые волны. Ныне изучение и применение этого явления представляет самостоятельную и чрезвычайно обширную область.

свойства вне зависимости от ориентации образца относительно поля H . Таким образом, верхняя кривая получается перемножением двух функций, представленных на нижнем рисунке. В реальности бывает необходимым учитывать и кристаллическую структуру ферромагнетика, тогда конкретный вид и масштаб кривой намагничивания $B(H)$ может различаться для различных ориентаций осей кристалла.

Приведенная выше кривая получена на образце, который первоначально полностью размагничен. Если же после достижения насыщения намагниченности начать теперь уменьшать внешнее поле, то ферромагнетик начнет проявлять свойство гистерезиса (от греч. *histeresis* – отставание, запаздывание): обратное движение не повторяет прямое, а проходит по другой кривой, сохраняя "память" о предыдущих значениях. В образном представлении: имея немалые в атомном масштабе размеры, домены "застревают" в своих положениях после каждого поворота в направлении внешнего поля и не могут плавно следовать за изменением индукции (напряженности). На следующем рисунке приведена серия кривых гистерезиса. Часть из этих кривых начинается из точек главной кривой намагничивания OA , а часть – из того состояния намагниченности, в котором находился данный образец перед началом очередного опыта. Так, если, дойдя в процессе первичного намагничивания до точки A , начать уменьшать ток в намагничивающей катушке, то индукция внутри сердечника этой катушки будет изменяться теперь вначале по кривой ABC . Видно, что даже при нулевом токе индукция в образце осталась ненулевая (остаточная) – образец намагнитился и может проявлять свойства такие же, как у природного магнита: часть его доменов продолжает сохранять ориентацию, заданную внешним полем. Для того, чтобы теперь размагнитить образец, необходимо вновь поместить его в катушку и подать ток, обратного направления (отрицательные значения напряженности H). Тогда, при определенном значении поля индукция обратится в ноль – это значение исторически называется коэрцитивной силой (*coercitio* – лат., удерживать). Становится ясно, хорошие постоянные магниты получаются из материалов, имеющих не только высокое значение остаточной намагниченности, но и значительную коэрцитивную силу.

Продолжая далее в опыте увеличение значений обратного поля, мы можем перемагнитить образец, разворачивая его домены в направлении обратном предшествующему. Если после этого начать уменьшать внешнее поле, то обратный процесс снова пойдет по другой кривой – теперь по кри-



вой *CDA*. Если уменьшение поля начать, не доходя до точки *A*, то возникнет новая петля гистерезиса, вложенная в описанную выше. Таким образом, видно, что, желая сохранить значительное поле внутри сердечника превышающее остаточную намагниченность (например, реле или удерживающий электромагнит), необходимо стремиться к тому, чтобы намагничивающее поле превышало насыщающее значение H_{max} (или H_{min}). Если же мы используем режим, при котором внешнее поле не остается постоянным, а изменяется во времени (например, запись сигнала на магнитофонную ленту или диск), то нужно учитывать как свойства описанных (главных) циклов перемагничивания, так и возможность возникновения частных циклов, подобных циклам *a-c* или *g-h*, показанным на том же рисунке. Последнее важно при передаче сигналов через трансформатор. Здесь первичная обмотка является намагничивающей, а ЭДС индукции во вторичной обмотке определяется значением потока магнитной индукции в сердечнике. Очевидно, что передача формы сигнала без искажений здесь принципиально невозможна. Лишь если ток переменного сигнала не выходит за пределы линейного участка основной кривой намагниченности (релеевская область), то искажения будут минимальными. При амплитуде тока переменного сигнала, выходящей по значению напряженности за пределы $H_{max} - H_{min}$ искажения станут значительными, что проявится в эффекте возникновения лишних гармоник в передаваемом периодическом сигнале.

Эффект Баркгаузена и магнитострикция

Эффект перемагничивания доменов проявляется, например, в опыте, поставленном Г.Г. Баркгаузеном (1919г). На последнем рисунке в круге выделена часть кривой намагничивания и рядом приведена в увеличенном масштабе. Видно, что кривая намагничивания принципиально, в микроскопических масштабах не является плавной. В простейших терминах это связано с тем, что при плавном нарастания ориентирующей силы ориентация доменов, "прижатых" друг к другу, происходит скачкообразно и сопровождается изменением магнитного поля в образце. Для наблюдения эффекта обычно используют скачкообразное изменение значения ЭДС индукции, наводимой в многовитковом контуре.



Доменные структуры в образцах магнетиков

Одновременно намагничивание сопровождается пропорциональным макроскопическим изменением геометрических размеров образца – **магнитострикцией** (*strictio* – лат., сжатие, натягивание). Для протяженных образцов различают продольную и поперечную, линейную и нелинейную магнитострикцию. Степень магнитострикции ко-

личественно измеряют в единицах относительного изменения размеров. По порядку величины магнитострикция составляет 10^{-5} . Как видно, значение магнитострикции по порядку совпадает с тепловым расширением и может маскироваться тепловыми явлениями. Тем не менее, магнитострикция используется в преобразователях (датчиках), реле, излучателях ультразвука и т.п. Широко известным проявлением магнитострикции является гудение трансформаторов или дросселей, вызванное периодическим перемагничиванием и колебанием поверхности сердечников под действием переменного тока с частотой 50 Гц.

Добавим, что эффект электрострикции обратим в том смысле, что обратное явление – механическая деформация, в свою очередь сопровождается изменением намагниченности. Этот эффект получил название **магнитоупругости** (Виллари-эффект, 1865). Рассмотренные выше эффекты, происходящие в ферромагнетиках, по сути, объясняют проявление механизма гистерезиса. Отметим и то, что влияние доменной структуры ферромагнетиков проявляется и в других явлениях, например, в оптических.

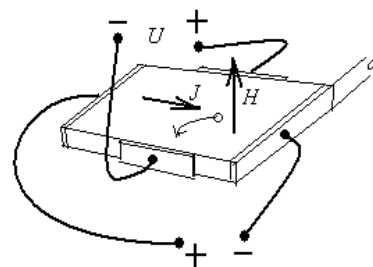
Эффект Холла

Эффект Холла (Э.Г. Холл, 1879г) наблюдается в любых проводниках и состоит в появлении в проводнике с током, плотность которого J , помещенном в магнитное поле H , электрического поля в направлении, перпендикулярном току J и полю H . Если образец имеет форму пластины толщиной d , то напряжение U , можно определить по формуле:

$$U = R \frac{J \cdot H}{d}.$$

Значение коэффициента Холла $R = \frac{1}{ne}$, выраженное через концентрацию носителей n и заряд электрона e , имеет для металлов порядок $10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$, для полупроводников $10^{-1} \text{ м}^3/\text{Кл}$. Для изготовления датчиков магнитного поля в измерительной технике чаще используют полупроводниковые образцы Ge , $InSb$, $InAs$. Как правило, такой датчик имеет форму, похожую на транзистор размером 4,6 мм и снабжается усилителем напряжения. В результате измеряемое напряжение составляет в умеренных полях несколько десятков милливольт. Холловские элементы используют и в вычислительной технике для аналогового перемножения сигналов: при этом текущий по образцу ток пропорционален первому сигналу, а второй формирует модуляцию магнитного поля.

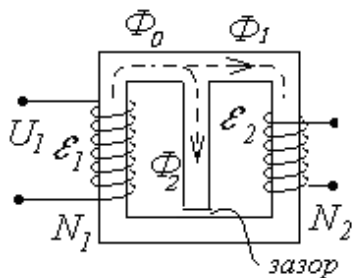
Возникновение ЭДС Холла связано с тем, что носители тока, движущиеся со скоростью V , отклоняются в магнитном поле и частично попадают на боковую стенку образца. В результате на боковой грани происходит накопление зарядов и возникает поперечное электрическое поле, которое, в свою очередь ограничивает прибытие на стенку новых зарядов. В равновесии электрическая



сила уравнивает магнитную силу: $eE = eVB$. Выражая скорость движения носителей через ток и концентрацию, а напряженность поля, через электрическое напряжение и геометрические параметры образца, можно получить приведенную выше формулу. Эффект Холла наблюдается и в ферромагнетиках, но в них он проявляет нелинейную зависимость напряжения от внешнего поля.

Законы Кирхгофа для расчета магнитных цепей

Для эффективного возбуждения магнитного поля токами часто используют конструкции, в которых внутренняя часть обмотки заполняется ферромагнетиком. Примером такой конструкции является трансформатор. В нем, как правило, используют две обмотки. По одной из них (первичной) пропускается ток, возбуждающий магнитное поле внутри обмотки, а другая пронизывается потоком возникшего поля. Если этот поток переменный, то вследствие явления индукции, в ней возбуждается вихревое электрическое поле, характеризующееся величиной ЭДС. Поскольку магнитное поле внутри ферромагнетика значительно превышает поле вне сердечника, то магнитный поток, возбуждаемый током первичной обмотки, будет проходить, в основном внутри сердечника. Для организации необходимого распределения магнитного потока конкретный сердечник данного устройства (магнитопровод) может иметь разветвления, и даже разрывы (зазоры). Отсюда возникает чисто формальная аналогия с электрическим током внутри проводников. Тем не менее, она может быть выражена количественно. Основой точного описания неразрывности магнитного потока $\Phi = \int \vec{B} d\vec{S}$ как некоторого "тока" является уравнение $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$, которое для случая разветвленного магнитопровода с разрывами удобно записать в терминах вектора \vec{H} и представить как:



характеризуемое величиной ЭДС. Поскольку магнитное поле внутри ферромагнетика значительно превышает поле вне сердечника, то магнитный поток, возбуждаемый током первичной обмотки, будет проходить, в основном внутри сердечника. Для организации необходимого распределения магнитного потока конкретный сердечник данного устройства (магнитопровод) может иметь разветвления, и даже разрывы (зазоры). Отсюда возникает чисто формальная аналогия с электрическим током внутри проводников. Тем не менее, она может быть выражена количественно. Основой точного описания неразрывности магнитного потока $\Phi = \int \vec{B} d\vec{S}$ как некоторого "тока" является уравнение $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$, которое для случая разветвленного магнитопровода с разрывами удобно записать в терминах вектора \vec{H} и представить как:

$$\Phi_0 - \Phi_1 - \Phi_2 = 0 \text{ (Первое уравнение Кирхгофа).}$$

Здесь каждое слагаемое имеет вид: $\Phi_i = B_i \cdot S_i = \mu_o \cdot \mu_i \cdot H_i$, причем, на неферромагнитных участках $\mu=1$.

Основу второго уравнения Кирхгофа составляет закон Ампера, согласно которому поле вектора \vec{H} имеет циркуляцию равную $\oint \vec{H} d\vec{l} = I$. Для описания процессов в первом контуре магнитопровода, изображенного на рисунке это выражение принимает форму:

$$H_o \cdot L_o + H_2 \cdot L_2 + H'_2 \cdot L'_2 = I_1 \cdot N_1,$$

Здесь L_o , L_2 длины участков, занятых соответствующими потоками, а L'_2 – длина зазора. Для других контуров запись второго закона имеет соответствующую

щую форму. Слагаемые $H_i \cdot L_i$ называют падениями магнитного напряжения, тогда величины $I_i \cdot N_i$ – представляют магнитодвижущие силы (МДС).

Релятивистские силы и магнетизм

1. Вполне обоснованное изложение релятивистской кинематики отработано на сегодня во множестве учебников с разной степенью сложности. Не так обстоит дело с динамикой и, тем более, с электродинамикой. Для строгого изложения в теоретической физике вместо ньютоновской механики используется аналитическая механика Лагранжа и Гамильтона, основу которой составляет принцип наименьшего действия. Именно с этих позиций строится четырехмерный вариант теории относительности, более соответствующий ее физической сути, чем представление о раздельном пространстве и времени. Для ознакомления рекомендуем, например, "Курс теоретической физики" Л.Д.Ландау, т.1, Механика.

На ранних стадиях изучения физики такое изложение, конечно, невозможно и тогда приходится допускать некоторое постулирование, которое, впрочем, обычно не вызывает возражения. Например, зная о сущности релятивистских преобразований (Лоренца), удобно начинать с выражений для релятивистского импульса и энергии, вводя их, как $\vec{p} = \gamma m \vec{V}$ и $E = m \cdot c^2 \gamma$ (здесь m – то же, что m_0 , в любой системе отсчета). При этом уравнение движения частицы может быть записано так:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \Rightarrow \frac{d(\gamma m \vec{V})}{dt} = \vec{F}.$$

Это релятивистское уравнение вполне применимо для решения задач механики, однако для выявления особенностей теории близкого действия его удобно преобразовать, приведя его к виду классического уравнения движения, где в левой части записывается произведение массы на ускорение.

Используя связь энергии и импульса $\vec{p} = \frac{E}{c^2} \cdot \vec{V}$, вместе с выражением для мощности силы $\frac{dE}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V}$, можно преобразовать левую часть, которая сейчас содержит сложную производную:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{E}{c^2} \cdot \vec{V} \right) = \frac{E}{c^2} \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} + \frac{\vec{V}}{c^2} \frac{dE}{dt} = \frac{E}{c^2} \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} + \frac{\vec{V}}{c^2} \cdot (\vec{F} \cdot \vec{V}) = F.$$

Теперь уравнение движения приобретает классический вид, удобный для решения прикладных задач:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left[\vec{F} - \frac{\vec{V}}{c^2} \cdot (\vec{F} \cdot \vec{V}) \right] = \vec{F}_{eff}.$$

Видно, что в условиях близкодействия эффективная сила взаимодействия (в правой части уравнения) претерпевает изменения по сравнению с классическим случаем, когда ее действие распространяется мгновенно во всем пространстве. Отсюда следует известный вывод о неколлинеарности силы и ускорения в общем случае. Для приложений можно провести анализ частных случаев. Так, для малых скоростей, при $V \ll c$ ($\gamma \rightarrow 1$) получаем $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{F}$ и $F = F_{eff}$. При умеренных релятивистских скоростях $\vec{V} \uparrow \uparrow \vec{F}$, получаем $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{F}$ и $F_{eff} = \frac{F}{\gamma^3}$. При $\vec{V} \perp \vec{F}$ получаем, аналогично, $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{F}$, но $F_{eff} = \frac{F}{\gamma}$.

Отсюда, в частности, при $\vec{V} \perp \vec{F}$ получаем $F_{eff} = \frac{F}{\gamma} = F \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$.

Заметим, что второе слагаемое в выражении для эффективной силы пропорционально квадрату скорости, и, подобно вязкому трению, обеспечивает предельное стационарное значение скорости тела, равное c . Так, при $V \rightarrow c$ ($\gamma \rightarrow \infty$) взаимодействие прекращается и $F_{eff} \rightarrow 0$. Из последнего, собственно, следует, что в теории дальнего действия скорость c является предельной скоростью осуществления любого взаимодействия.

Таким образом, в теории относительности сила не является инвариантной величиной. Поперечная (относительно направления движения инерциальной системы координат) сила преобразуется по формуле $F = F_o \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}$.

Для самой простой ситуации взаимодействия двух зарядов, параллельно движущихся со скоростью V относительно неподвижного наблюдателя – все записи скалярные. В этом случае $F_o = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2}$ и тогда после преобразований нетрудно получить:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2 \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} - \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{V^2}{c^2} \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2 \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}.$$

Первое выражение есть электрическая составляющая, а второе – магнитная.

Теперь, для величины силы можно записать (пренебрегая малыми величинами в знаменателе): $F = q_1 \cdot E_2 + q_1 \cdot V \cdot B_2$.

Здесь $B_2 = -\frac{1}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{V}{c^2} \cdot \frac{q_2}{r^2} = -\frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{q_2}{r^2} V$ – индукция магнитного поля второго заряда.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО МАГНЕТИЗМУ

Работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

Для проведения эксперимента используется установка, состоящая из модуля ФПЭ-04М и источника питания ИП. Блок-схема установки показана на рис.1.1.

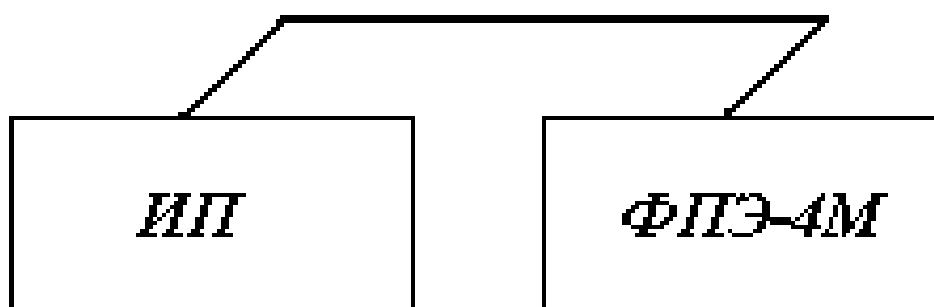


Рис 1.1. Блок-схема установки для изучения поля соленоида

Модуль ФПЭ-04М предназначен для выполнения учебных работ по магнетизму и позволяет проводить измерение индукции магнитного поля на оси длинного соленоида с помощью датчика Холла и определять энергию магнитного поля катушки с током методом экстратока размыкания.

Модуль размещен в типовом корпусе из пластмассы и содержит:

- соленоид L, представляющий собой катушку медного провода, намотанного на немагнитный трубчатый каркас, внутри которого локализуется магнитное поле;
- тумблер S1 для размыкания цепи питания соленоида;
- диодно-конденсаторную ячейку VD для перевода энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля;
- разъемы для подключения источника питания соленоида (XP1) и датчика Холла (XP2);
- кнопка S2 для обнуления заряда конденсатора;
- гнезда X1 и X2 для подключения прибора, измеряющего ЭДС Холла (милливольтметра);
- гнезда X3 и X4 для подключения вольтметра, измеряющего напряжение заряженного конденсатора C.

Датчик Холла V1 по конструкции похож на обычный транзистор и размещен на конце штока, который может перемещать этот датчик вдоль оси соле-

ноида, причем координата датчика отсчитывается по шкале, нанесенной на шток.

Схема модернизированного блока приведена на рисунке 1.2.

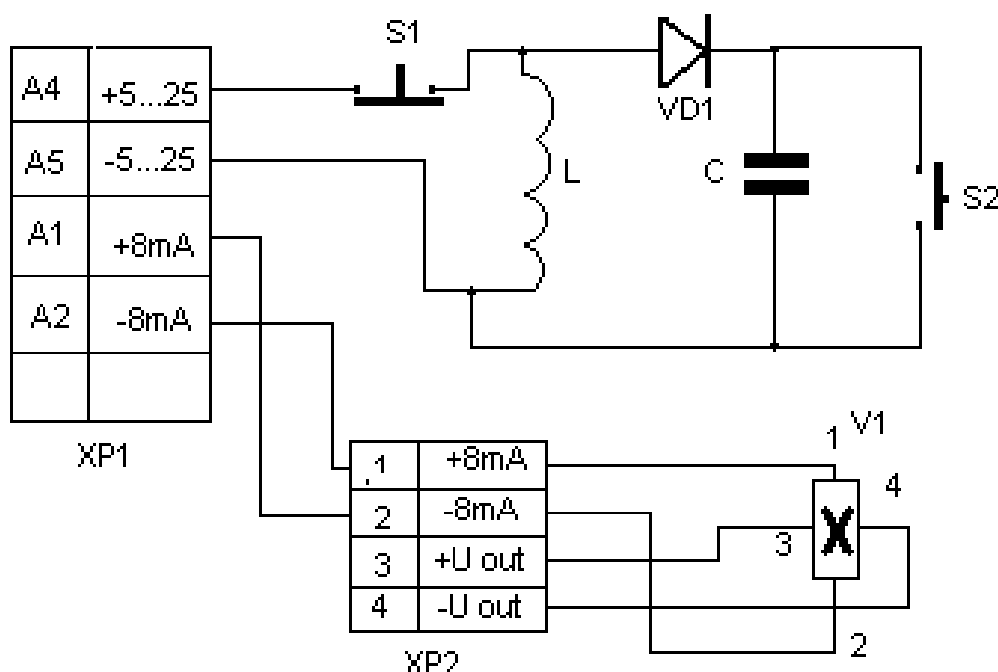


Рис 1.2. Схема блока ФПЭ-04м для создания и исследования магнитного поля соленоида

Блок ФПЭ-4М позволяет реализовать следующие режимы работы:

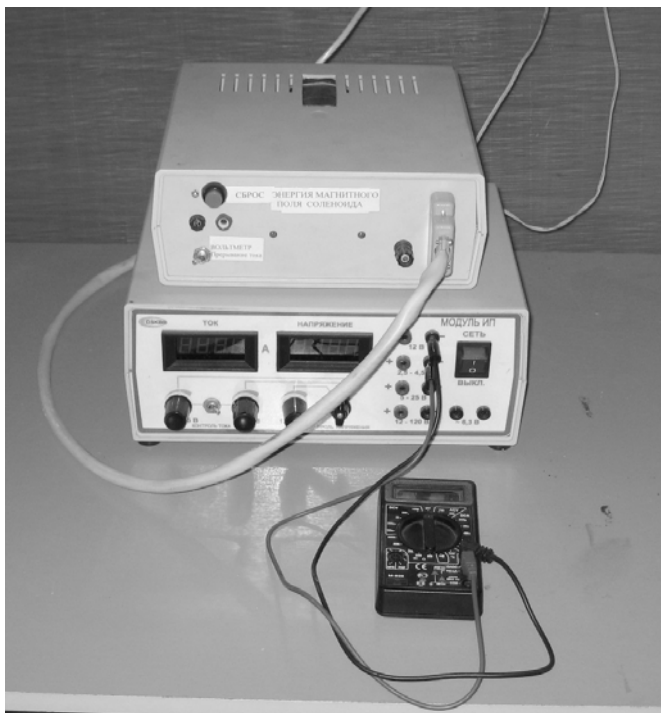
- измерение магнитной индукции на оси соленоида. Ток через соленоид создается источником (5...25 В), встроенным в блок ИП. ЭДС Холла измеряется мультиметром на шкале 0...200 мВ;
- переходный процесс размыкания цепи тока индуктивности (тумблер S1). ЭДС самоиндукции вызывает заряд конденсатора С, т.е. переход энергии магнитного поля в энергию поля электрического;
- сброс напряжения на конденсаторе перед очередным измерением (кнопка S2).

Питание схемы производится от типового источника типа ИП посредством многожильного кабеля через разъемы на задних стенках обоих модулей. Вольтметр или осциллограф подключаются кабелем через гнезда на задней стенке модуля ФПЭ-04м при измерении энергии магнитного поля и через гнезда на передней панели при измерении магнитной индукции.

Экспериментальная часть работы основана на приведенных в теоретическом разделе соотношениях физических величин, входящих во взаимодействие в процессе опыта, поэтому исполнителю важно овладеть базовыми определениями таких понятий, как магнитное и электрическое поле, свойства накопителей энергии (индуктивность, емкость), электрическая и магнитная индукция.

Возможны разные вариации экспериментов, но рекомендуется следующий порядок работ.

1. Измерение энергии магнитного поля катушки с током. Идея опыта вытекает из закона сохранения энергии. При размыкании цепи питания катушки на ее концах возникает ЭДС самоиндукции. Путь для зарядов открыт по цепи: катушка L , диод $VD1$ и конденсатор C . После достижения напряжением на конденсаторе максимального значения оно остается неизменным, если измерительный прибор, например осциллограф, не отбирает заряд. При использовании мультиметра **отсчет напряжения следует производить как можно быстрее.**



Общий вид установки

Рабочая формула:

$$w_m = \frac{L I_k^2}{2} = \frac{C U_c^2}{2} + \Delta w_r,$$

где I_k – ток через катушку, U_c – напряжение на конденсаторе, и Δw_r – потери энергии на активном сопротивлении.

Оценка вклада активного сопротивления не входит в задачу данной работы. Предполагается лишь, что эта величина незначительна. Успешным студентам предлагается по величине заряда конденсатора и времени спада тока в несколько миллисекунд оценить потери энергии на нагрев проводов.

Измерения следует провести при разных токах через катушку, после чего построить график зависимости энергии магнитного поля от тока.

2. Расчет индуктивности по данным эксперимента. Предыдущий эксперимент можно использовать для измерения индуктивности катушки. В этом случае рабочая формула приобретает вид $L = C \frac{U_c^2}{I_k^2}$

Проведя измерения при разных токах необходимо построить график зависимости индуктивности от тока и объяснить результаты.

3. Теоретический расчет индуктивности по геометрическим размерам и точным данным катушки. Требуется найти в учебной литературе подходящую формулу, сделать расчет и сравнить результат с экспериментом.

4. Измерение распределения магнитной индукции вдоль оси катушки. Измерение производят с помощью датчика Холла, перемещая шток с датчиком вдоль оси и записывая зависимость ЭДС Холла от координаты при разных значениях тока через катушку, который служит в качестве параметра.

5. Теоретический расчет значения магнитной индукции на оси катушки с использованием известных формул из учебной литературы. Цель расчета – оценка применимости этих формул при проектировании катушек индуктивности.

Результаты работы следует оформить в виде протокола лабораторной работы, в котором привести итоги опытов в виде таблиц и графиков с собственными выводами.

Работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ

Явление наведения ЭДС в каком-либо контуре при изменении тока в рядом расположенном другом контуре называется взаимной индукцией. Наведенную ЭДС называют ЭДС взаимной индукции, и ее мгновенное значение обозначают e_M . Природа взаимной индукции основана на том обстоятельстве, что создаваемое при протекании тока магнитное поле занимает больший объем, нежели катушка с током. Поэтому магнитный поток может пронизывать площадь витков и соседних катушек:

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12},$$

где Φ_1 - поток, создаваемый током первого контура, Φ_{11} - поток, пронизывающий только первый контур, Φ_{12} - поток, захватывающий второй контур (см. теорию трансформатора в Приложении 2).

Произведение потока, создаваемого током, на число витков катушки называется потокосцеплением. Общая часть потока, объединяющая оба контура Φ_{12} , создает потокосцепление ψ_{12} , которое пропорционально индуцирующему току

$$\psi_{12} = M \cdot i_1$$

В линейных системах коэффициент M не зависит от i и называется взаимной индуктивностью катушек 1 и 2. Под коэффициентом связи двух магнитно-связанных контуров с индуктивностями L_1 и L_2 и взаимной индуктивностью M понимают величину

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

Очевидно, коэффициент связи не может быть больше единицы.

Рассмотрим схему последовательного включения двух магнитно-связанных катушек с согласным включением (поле второй катушки усиливает поле первой), показанную на рис.2.1.

Применяя второй закон Кирхгофа, нетрудно получить связь мгновенных значений тока и напряжения в общей цепи:

$$iR_1 + L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + iR_2 = e$$

Поскольку отношение ЭДС к току, ей создаваемому, по определению не что иное, как сопротивление цепи, причем для гармонических колебаний

$$\frac{e}{i} = R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)$$

Если катушки подключены встречно (ток второй катушки ослабляет поле первой), очевидно, придется поменять знаки перед M на минус, что физически оправдано. В этом случае:

$$\frac{e}{i} = R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M)$$

Полученные выражения показывают, что последовательно соединенные катушки индуктивности имеют комплексное сопротивление, действительная часть которого, как и следовало ожидать, суммирует сопротивления обмоток постоянному току, а мнимая часть, предваренная множителем $j\omega$, есть индуктивность всей системы катушек. Следовательно, можно записать

$$L_{эф} = L_1 + L_2 \pm 2M$$

В этом выражении плюс относится к случаю согласного включения обмоток, а минус – к встречному включению.

Имея прибор для измерения индуктивности, можно измерить один раз индуктивность катушек с последовательно-согласным включением, а потом переключить обмотки встречно и снова измерить индуктивность.

В первом случае измеряется $L_{согл} = L_1 + L_2 + 2M$

Во втором случае $L_{встр} = L_1 + L_2 - 2M$

Вычитая из первого выражения второе, получим

$$M = \frac{L_{согл} - L_{встр}}{4}$$

Перейдем к эксперименту. В качестве объекта исследования используем модуль ФПЭ-05, содержащий две соосные катушки. Внешняя катушка большего диаметра может перемещаться вдоль длины внутренней катушки и ее поло-

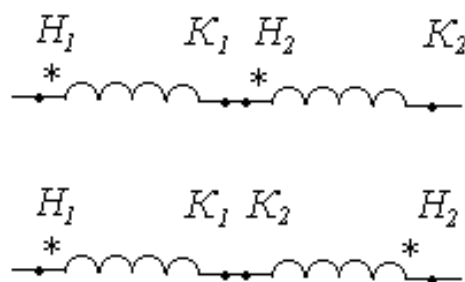


Рис.2.1. Схема вариантов включения катушек индуктивности



Общий вид установки

жение контролируется по шкале на штоке. Начала и концы обеих обмоток выведены на заднюю стенку модуля, соответствующие гнезда помечены как Н1, К1, Н2, К2. С помощью соединительных проводов катушки соединяются с высокочастотным измерителем емкости и индуктивности типа Е7-9 или Е12-1а. Описание приборов есть в папке «универсальные измерительные приборы». Изменяя положение внешней катушки с помощью штока, производим измерения соответствующих индуктивностей согласного и встречного включения, рассчитываем соответствующие величины M и строим график $M (мГ) = \Phi(X_{см})$.

Работа №3

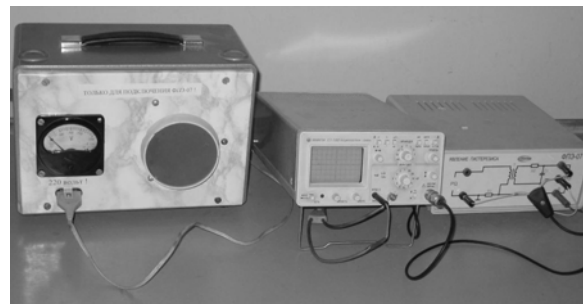
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

Поскольку взаимодействие ферромагнетиков с внешним магнитным полем носит нелинейный характер и обладает запаздыванием (гистерезисом) магнитной индукции внутри магнетика по отношению к воздействию на него, то модуль должен давать возможность регулировать величину внешнего магнитного поля и одновременно наблюдать изменения во времени как внешнего, так и внутреннего поля.

В предлагаемом эксперименте используется трансформатор (Тр2): ферромагнитный сердечник с надетыми на него двумя обмотками. Измерение тока первичной питающей обмотки и знание параметров этой обмотки дает сведения о значении магнитной индукции внутри обмотки в отсутствие сердечника. Измерение ЭДС, наводимой во вторичной обмотке несет информацию о полном поле в катушке с сердечником.

Идея эксперимента состоит в том, что, если получить от исследуемого объекта (трансформатора) два синхронных сигнала: один пропорциональный намагничивающему току, а другой пропорциональный индукции в магнитопроводе, то можно получить информацию о свойствах ферромагнетика, из которого сделан сердечник. Опыт производится на модуле ФПЭ-04м.

Первая цель достигается питанием модуля от сети переменного тока через лабораторный автотрансформатор, который позволяет менять амплитуду питающего напряжения в широких пределах.



Общий вид установки

Собственно модуль ФПЭ-7М содержит размещенные в типовом пластмассовом корпусе следующие элементы:

- разделительный трансформатор Тр1;
- исследуемый ферромагнитный сердечник кольцевого типа с двумя обмотками;
- переменный резистор R1 для регулирования предельного тока через обмотку трансформатора Тр2;
- опорный постоянный резистор R2, по падению напряжения на котором измеряется ток через обмотку Тр2;
- интегрирующая RC-цепочка для преобразования выходного напряжения трансформатора Тр2 в сигнал, пропорциональный магнитной индукции в исследуемом сердечнике этого трансформатора.

Для подключения модуля к автотрансформатору предусмотрен шнур с вилкой, а соединения с осциллографом и компьютером производится через гнезда «X1», «X2» и «X3» стандартными кабелями.

Схема модуля ФПЭ-7М приведена на рис.3.1. На этом же рисунке приведены параметры обеих катушек.

Поясним функции отдельных элементов.

Как известно, один из проводов автотрансформатора находится под напряжением сети переменного тока (220 вольт). Поэтому регулируемое напряжение для питания ФПЭ-7М подается в схему не непосредственно, а на первичную обмотку трансформатора Тр1, хорошо изолированную от его сердечника и вторичной обмотки. Вследствие этого схема модуля гальванически не связана с сетью, а наибольшее напряжение в ее точках не превышает напряжения вторичной обмотки Тр1 (15 вольт).

Резисторы R1 и R2 в сумме определяют величину тока в первичной обмотке трансформатора Тр2. Напряжение на R2 равно $u_{R2} = iR_2$ и может использоваться в эксперименте для контроля и измерения тока, намагничивающего исследуемый сердечник.

Падение напряжения на сопротивлении R₂, равное u_x , пропорционально величине тока и, следовательно, H :
 $u_x = k_x H$

Этот сигнал подается на вход «x» осциллографа.

ЭДС, индуцируемая создаваемым магнитным потоком во вторичной обмотке:

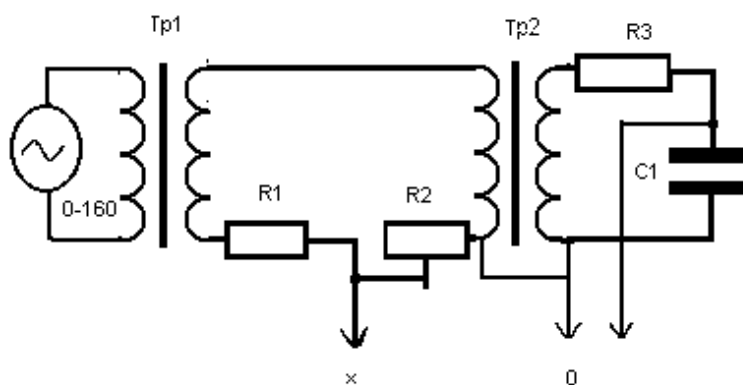


Рис.3.1. Схема модернизированного модуля ФПЭ-7м. Параметры модуля ФПЭ-7М (см. рабочие формулы): N1=1000 витков, R2=8200 Ом, r = 0,6 см, N2=200 витков, S= 1,35 кв.см, R3=820 кОм, C=0,22 мкФ

$e_2 = -\frac{d\Psi}{dt}$, где производная в правой части описывает изменение потокосцепления с витками. Потокосцепление – это произведение магнитной индукции на число витков обмотки.

Изменение потокосцепления $d\Psi$ пропорционально изменению dB в сердечнике. Следовательно, чтобы получить сигнал, пропорциональный величине B , необходимо проинтегрировать функцию $e_2(t)$ по времени, для чего используется подключенная к вторичной обмотке интегрирующая цепочка R_3, C . Для удовлетворительного интегрирования необходимо, чтобы на частоте измерения ω выполнялось условие: $R_3 \gg \frac{1}{\omega C}$. Снимаемый с ёмкости C сигнал $u_c \approx k_y B$, пропорциональный индукции B , подаётся на вход «Y» осциллографа.

Таким образом при одновременной подаче на вход «X» сигнала u_x , а на вход «Y» – сигнала u_c на экране осциллографа получается изображение функции $B = F(H)$, заданной в параметрическом виде (в качестве параметра выступает время t). Именно эта функция является петлей гистерезиса, как ее принято называть в научной литературе.

Вывод рабочих формул

Исследуемый ферромагнитный образец в модуле ФПЭ-7М служит магнитопроводом трансформатора Тр2, имеющего две обмотки с числом витков соответственно N_1 и N_2 . Первичная обмотка служит для намагничивания сердечника от внешнего источника переменного тока. Вторичная обмотка воспринимает изменение магнитной индукции сердечника во времени.

Известно, что напряженность магнитного поля в сердечнике трансформатора H определяется выражением (закон Ампера о циркуляции поля) $H = \frac{N_1 i_1}{l}$, где i_1 - ток первичной обмотки, l - средняя длина силовой линии поля.

В нашем случае ток первичной обмотки измеряется косвенно по падению напряжения U на сопротивлении R_2 , поэтому

$$H = \frac{N_1 i_1}{lR}$$

Наблюдаемое смещение луча осциллографа x , если известна чувствительность канала горизонтального отклонения k_x (вольт на деление), легко перевести в величину $U = x \cdot k_x$. Тогда величина H оказывается связанной с наблюдаемым смещением соотношением

$$H = \alpha k_x x, \text{ где } \alpha = \frac{N_1}{lR_2}$$

Особо отметим, что ток первичной обмотки i_1 благодаря нелинейной связи магнитной проницаемости от H даже при синусоидальном напряжении на пер-

вичной обмотке имеет сложный вид и может быть представлен рядом Фурье

$$i_2 = A_1 \sin \omega t + A_3 \sin 3\omega t + A_5 \sin 5\omega t + \dots$$

(об этом пойдет речь в следующей работе).

Переходя к вторичной обмотке, найдем для рассмотренного случая ЭДС индукции на выводах этой обмотки.

$$e_2 = -N_2 \frac{dB}{dt} S,$$

где S – площадь сечения магнитопровода.

При небольшом числе витков обмотки и высокоомной нагрузке эта ЭДС расходуется главным образом на нагрузке R_3 . Другими словами,

$$I_2 R_3 = N_2 S \frac{dB}{dt} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{N_2 S}{R_3} \frac{dB}{dt}$$

Выше упоминалось, что вторичная обмотка нагружена на интегрирующую цепочку. Благодаря ее свойствам с конденсатора в этой цепочке снимается напряжение

$$U_c = \int_0^t \frac{I_2}{C} dt = \frac{N_2 S}{R_3 C} \int_0^B dB = \frac{N_2 S}{R_3 C} B$$

Зная чувствительность осциллографа k_y по входу «У», получим оценку величины магнитной индукции B :

$$B = \frac{R_3 C k_y U}{N_2 S} = \beta k_y U, \quad \text{где} \quad \beta = \frac{\mu R_3 C}{N_2 S}$$

Подставив в приведенные формулы значения параметров модуля, можно обработать результаты эксперимента.

Проведение эксперимента

1. Данный эксперимент начинается с включения установки: проверьте, подключен ли модуль ФПЭ-07М к источнику регулируемого переменного напряжения (автотрансформатору). Установите ручку регулятора в крайнее положение против часовой стрелки. Вилку источника включите в розетку сети 220 В и включите электронный осциллограф. После его прогрева (виден луч на экране) переведите его в режим характериографа, для чего отключите горизонтальную развертку (на осциллографе имеется соответствующая клавиша). Плавно увеличивая напряжение регулятора, наблюдайте за изображением на экране. Если это замкнутая кривая, похожая на теоретическую петлю гистерезиса, установка исправна, и можно перейти к следующему шагу.

2. Тарировка установки. Термин «тарировка» означает установление соответствия показаний приборов реальным физическим величинам, которые ими измеряются. В данном случае процедура начинается с проверки вертикальной

развертки осциллографа. Для этого параллельно вертикальному входу (входу «У») подключаются проверенный цифровой вольтметр и батарейка с ЭДС около 1,5 В.

По величине смещения луча измеряется подаваемое напряжение и сравнивается с показанием вольтметра. Если расхождение не превышает 5%, переходим к тарировке усилителя горизонтального отклонения. С этой целью на вход «Х» подается напряжение с любого низкочастотного генератора и, меняя его напряжение, длина светящегося отрезка устанавливается равной целому числу клеток на экране. Затем, не трогая ручек генератора, кабель переносится с входа «Х» на вход «У», и производится определение амплитуды поданного сигнала. Число милливольт, требуемое для смещения луча на одну клетку (деление) по горизонтали, и есть чувствительность осциллографа по горизонтальному входу k_x .

3. Определение параметров основной кривой намагничивания. По определению основная кривая есть геометрическое место вершин петель гистерезиса при разных амплитудах питающего напряжения первичной обмотки исследуемого трансформатора. Следовательно, задавая эти амплитуды через равные промежутки и записывая координаты вершин наблюдаемых при этом петель в делениях координатной сетки на экране, выполняем первую часть задачи.

4. Определение потерь на перемагничивание. Эту информацию удобно получать одновременно с предыдущей, вычисляя (конечно, приближенно) площадь каждой наблюдаемой петли в «квадратных клетках».

5. Переход к выражению предыдущих графиков в физических величинах. Для этого величины в клеточках переводятся в ампер-витки и тесла по приведенным в теоретической части формулам.

Результаты работы оформляются в виде протокола учебного эксперимента.

Работа №4

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В РЕАКТИВНЫХ КАТУШКАХ

В теоретической электротехнике под реактивными катушками понимаются катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником. Подробно эффект искажения формы гармонического тока в реактивных катушках подробно исследован в литературе по теоретической электротехнике. Студентам предлагается по мере освоения методов численного решения дифференциальных уравнений попытаться найти форму тока в катушке под действием гармонической ЭДС, если динамическая магнитная проницаемость сердечника описывается выражением:

$$\mu_d = \sqrt{\frac{I_0 - i}{k}},$$

где I_0 - ток насыщения сердечника данной катушки, i – текущее значение тока в катушке, k – коэффициент пропорциональности.

Независимо от решения этой теоретической задачи проводится исследование формы тока в катушке модуля ФПЭ-7М с обработкой результатов на персональном компьютере. Методика исследования заключается в следующем.

Сигнал, пропорциональный току в катушке, снимается с резистора R2 модуля и поступает на вход звуковой карты компьютера, которая является, по сути, аналого-цифровым преобразователем с умеренно широкополосной характеристикой. В ней он переводится в цифровую форму и становится пригодным для анализа компьютерными методами.

В компьютере активизируется программа «SpectralLab», которая позволяет в числе прочего позволяет 1) наблюдать осциллограмму сигнала и 2) получить спектр сигнала, т.е. набор составляющих сигнала с указанием их частот, амплитуд и фаз колебаний. Для облегчения задачи приводятся рабочие окна данной программы в основных опциях.

Работа с программой «SPECTRALAB»

1. После загрузки программы «SpectraLab» и появления окна (рис. 4.1) щелкнуть кнопку «View», после чего под ней выбрать режимы «Time series» и «Spectrum» (одновременно).

2. Щелкнуть кнопку «OPTIONS» и выбрать «Time series». Появится (рис.4.2) для воспроизведения осциллограммы.

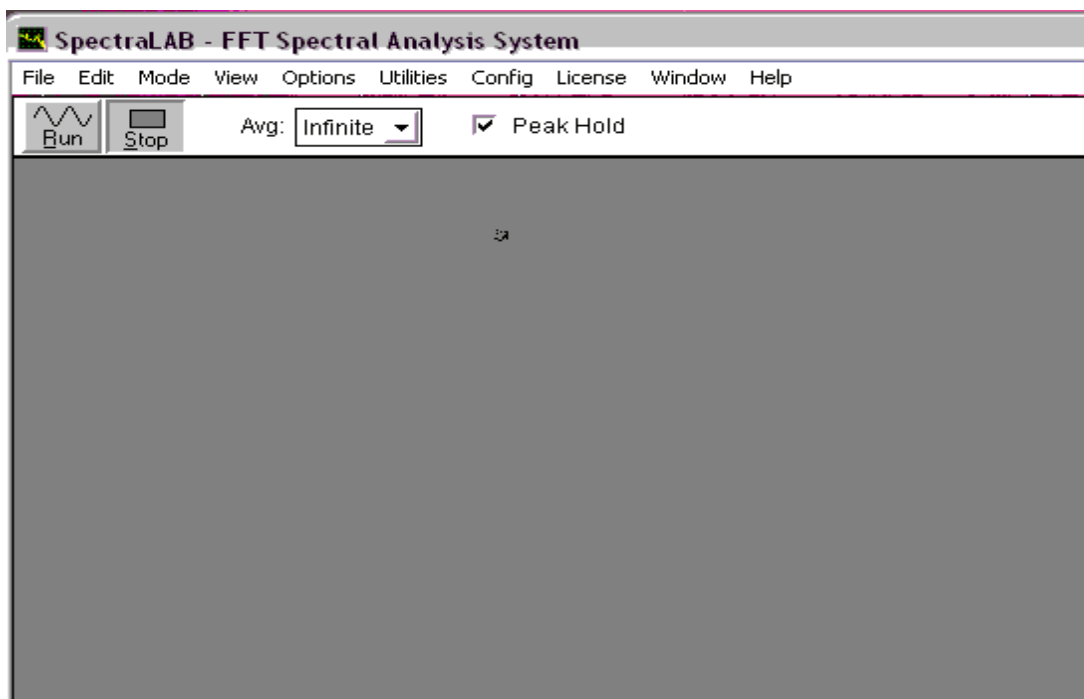


Рис. 4.1

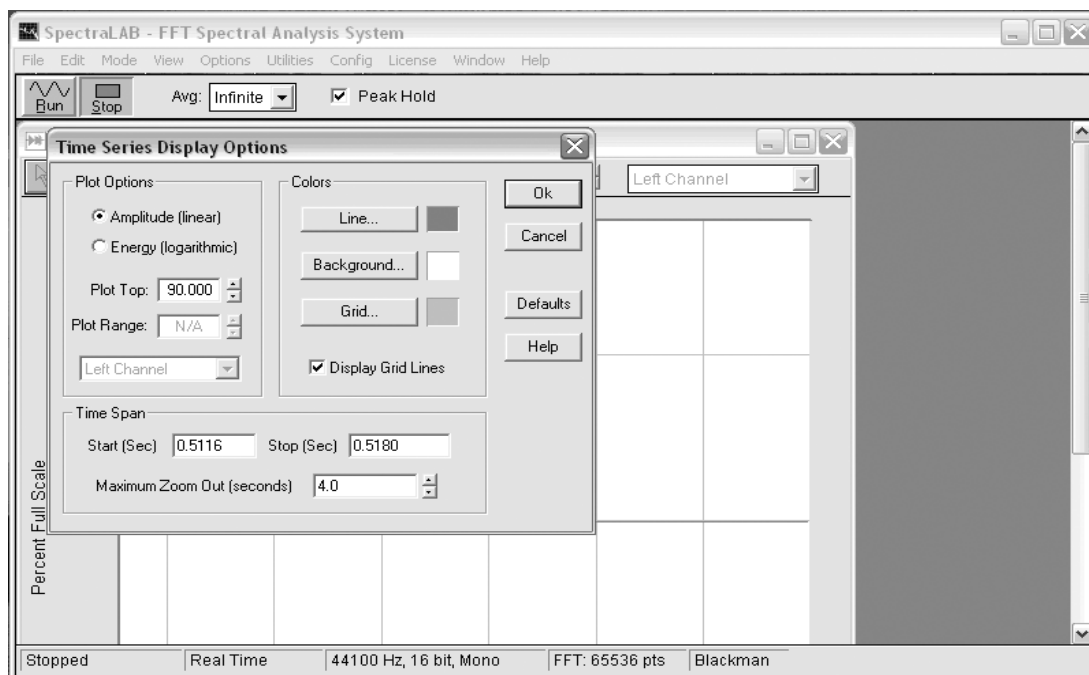


Рис. 4.2. Начальные установки

В этом окне снова щелкнуть кнопки «OPTIONS» и «Time series». Появится окно «Time series D O», в котором надо произвести начальные установки программы, указанные на рисунке.

3. Закрыть два последних окна и снова последовательно щелкнуть «OPTIONS» и «Spectrum». Появится окно для воспроизведения спектра. В этом окне щелкните «Options», открыв вспомогательное окно для начальных установок по образцу, показанному на рис.4.3.

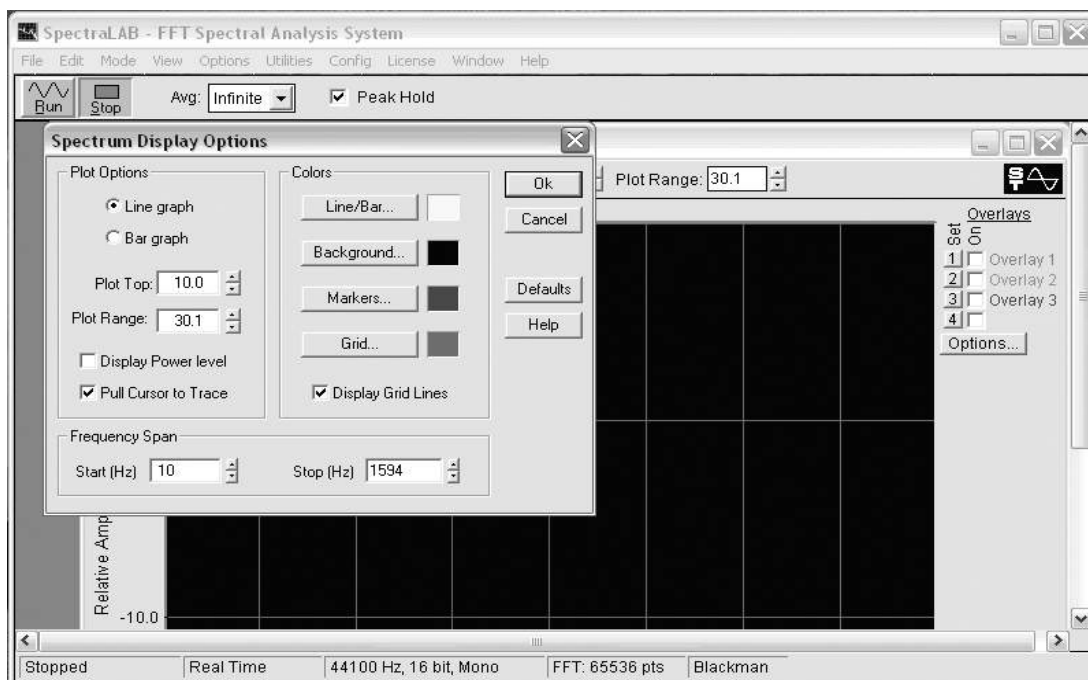


Рис. 4.3

4. Закройте два последних окна, после чего можно работать с программой. Удостоверьтесь только, что в окне «Avg» установлено «Infinite», а в иконке Peak Hold видна «птичка».

Далее кабель входа «У» осциллографа подключается к переходнику звуковой карты компьютера и получаются результаты спектрального анализа при напряжениях на входе модуля ФПЭ-7М 50, 125, 150 и 180 В.

Обработка результатов спектрального анализа

Программа «Spectralab» позволяет, получив изображение спектра сигнала и совместив курсор (крестик) с концом спектральной линии, щелкнуть правой кнопкой мыши и отсчитать частоту гармоники и ее уровень относительно уровня сигнала в децибелах.

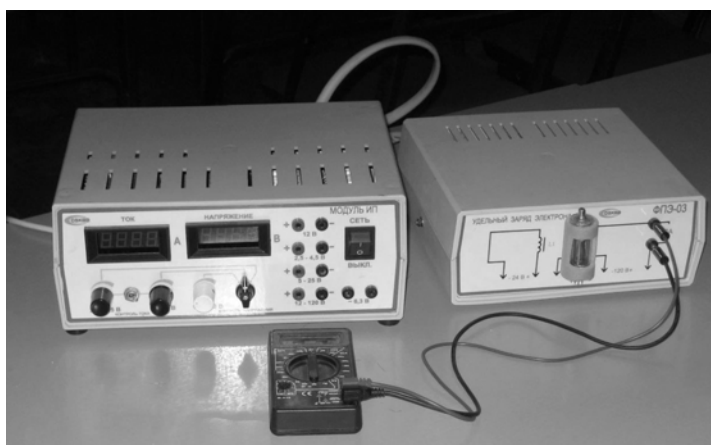
Работа №5

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Идея эксперимента основана на следующих положениях:

- магнитное поле, создаваемое постоянным током в соленоиде, достаточно однородно вблизи его оси;
- вакуумный диод, имеющий соосные катод и анод и помещенный своей осью вдоль оси соленоида, имеет ломаную вольт-амперную характеристику (ВАХ), определяемую формой траектории электронов в межэлектродном промежутке;
- точка излома ВАХ однозначно связана с величиной магнитной индукции, при которой самые медленные электроны перестают попадать на анод, и может быть использована для целей измерения.

Данный эксперимент производится на функциональном модуле ФПЭ-03, а его питание осуществляется от типового источника питания ИП. Структура установки показана на рис. 5.1. Соленоид представляет собой многослойную катушку медного провода с лаковой изоляцией, намотанную на пустотелый диэлектрический каркас, внутрь которого вставлен вакуумный



Общий вид установки

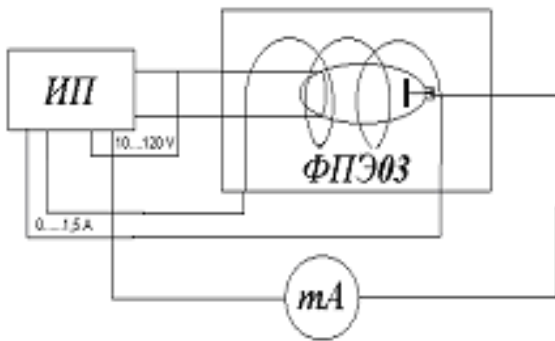


Рис.5.1. Блок-схема установки для осуществления метода магнетрона

диод на соединительной панельке. Соединительные провода от электродов диода и от катушки выведены на штепсельный разъем, размещенный на задней стенке модуля. По этим проводам подводятся:

- напряжение накала катода (2,5...4,5 В);
- анодное напряжение (10...120 В);
- напряжение питания соленоида (5...25 В).

Вакуумный диод типа 1Ц21П имеет следующие параметры:

Внутренний диаметр анода $D = 8$ мм.
 Внешний диаметр катода $d = 0,6$ мм.

Известно, что на движущийся в скрещенных электрическом и магнитном полях электрон действует сила Лоренца

$$F_n = eVB,$$

где e – заряд электрона, V – скорость движения и B – магнитная индукция в зоне электронного потока.

Направление этой силы перпендикулярно векторам обоих полей, что заставляет электроны описывать круговые траектории. При этом соблюдается следующее уравнение движения:

$$m \frac{V^2}{R} = e \cdot V B,$$

где m – масса электрона, R – радиус кривизны траектории. Величина скорости определяется напряжением анода и находится из соотношения: $\frac{mV^2}{2} = e\varphi$. Используя записанные формулы, получаем:

$$B = \frac{\sqrt{2 \frac{m}{e} \varphi_a}}{R}$$

Если радиус кривизны будет меньше половины расстояния между анодом и катодом, электроны в идеальном случае не попадут на анод, а будут находиться в межэлектродном промежутке. Таким образом, определив, при каком значении анодного напряжения происходит падение анодного тока диода, мож-

но оценить величину магнитной индукции: $B = \frac{\sqrt{8 \frac{m}{e} \varphi_a}}{D-d}$. Эта формула является рабочей.

Вывод данной формулы является упрощенным. Для строгого решения необходимо учесть, что электрическое поле межэлектродного промежутка иска-

жает круговую траекторию движения электрона в магнитном поле. Решение уравнения движения в этом случае будет сложнее, однако, не внесет существенных изменений в количественные оценки.

Эксперимент

Задачей данного эксперимента является установление зависимости магнитной индукции в осевой зоне соленоида от намагничивающего тока. Для этого при каждом значении тока снимается график зависимости анодного тока от анодного напряжения и по нему определяется среднее значение потенциала анода, при котором происходит резкое изменение тока φ_a . Пользуясь рабочей формулой, находится значение индукции B для данного намагничивающего тока. Полученные результаты сводятся в таблицу и переносятся на график в осях (B, I) . Дается объяснение полученной экспериментальной зависимости на основе базовых теоретических положений.

Работа №6

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИНДИКАТОРА

Идея эксперимента заключается в том, что существует класс электровакуумных приборов с анодом, покрытым слоем вещества (люминофора), светящегося под ударами электронов, благодаря чему можно сделать видимыми (визуализировать) их траектории. Эти траектории в поперечном магнитном поле искривляются, и это позволяет оценивать степень воздействия магнитного поля на электронный поток. К числу таких приборов относятся электронно-лучевые индикаторы. Они были разработаны для радиоприемной аппаратуры как индикаторы качества настройки на резонанс, для чего в качестве управляющего сигнала используется напряжение на демодуляторе приемника. Устройство одного из таких индикаторов (его тип - 6Е1П) приведено на рис.6.1.

Главная его часть - электронная пушка формирует электронный поток прямоугольного поперечного сечения. Электронное облако возникает вокруг катода 2 вследствие термоэлектронной эмиссии, для чего внутрь катода введена спираль, нагреваемая током накала. Катод окружен соединенными с ним электрически металлическими деталями 3 сложной формы. С одной стороны катода помещен анод 1,

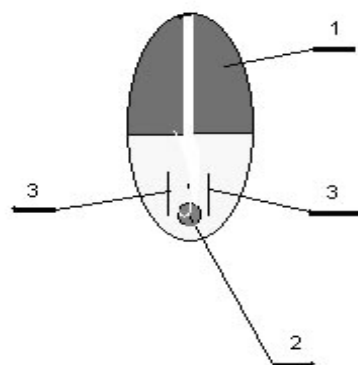


Рис.6.1. Схематическое устройство электронно-лучевого индикатора типа 6Е1П

покрытый слоем люминофора. Форма анода напоминает столовую ложку. Электростатическое поле между катодом и анодом в данном случае вызывает движение свободных электронов в таком направлении, что они образуют "ленту", соединяющую катод с анодом. На пути эта «лента» из электронов наталкивается на управляющий электрод в форме штыря, отрицательный управляющий потенциал которого раздваивает поток. В результате на светящемся аноде возникает "тень" от управляющего электрода, ширина которой пропорциональна потенциалу управляющего электрода и используется как мера этого потенциала. При нулевом потенциале электрода за ним вместо тени образуется сфокусированный поток электронов.

Если поместить описанный индикатор в магнитное поле, вследствие воздействия на электроны силы Лоренца их траектории искривятся, что наблюдается на искажении формы светящегося пятна на аноде. Исследуя эти искажения при изменении магнитной индукции, можно весьма наглядно проследить закономерности взаимодействия электронов с магнитным полем и даже использовать данный индикатор для оценки величины магнитной индукции и степени однородности магнитного поля.

Проведение эксперимента

Все необходимое для данного эксперимента смонтировано в функциональном модуле КНФ-6. В стандартном корпусе размещены (см. рис.6.2): силовой трансформатор Т, диодный выпрямительный мост В, фильтр нижних частот Ф, электронно-лучевой индикатор, катушка L и нагрузочная лампа накаливания Л.

Включив вилку сетевого шнура в сеть, подадим питание на первичную обмотку силового трансформатора, имеющего две вторичных обмотки. Одна обеспечивает питание цепи накала катода индикатора напряжением 6,3 вольта, другая подает напряжение 240 вольт на выпрямительный мост из 4 полупроводниковых диодов. На выходе моста получается пульсирующее напряжение, имеющее постоянную составляющую порядка 235 вольт, которую свободно пропускает фильтр нижних частот (его называют еще сглаживающим). Переменная составляющая с частотами 50 герц и выше через фильтр не проходит. В

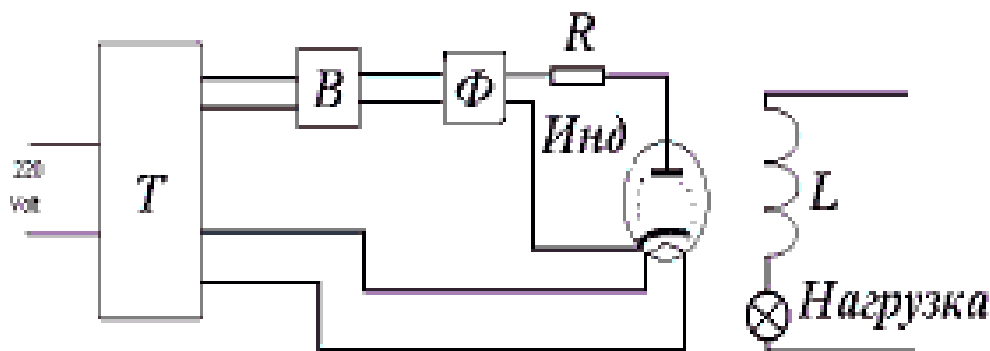
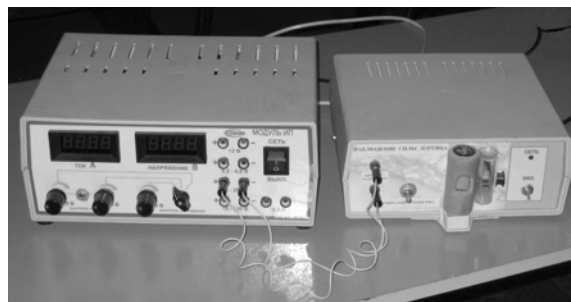


Рис. 6.2. Схема специального модуля КНФ-6

итоге постоянное анодное напряжение через ограничительный резистор поступает на аноды индикатора, создавая в нем поток термоэлектронов от катода к анодам. Если аппаратура исправна, анод индикатора светится, и на нем видна тень от дополнительного электрода в виде вертикальной темной полоски.



Общий вид установки

Далее необходимо создать магнитное поле, пропуская через катушку довольно значительный ток. Учитывая низкое сопротивление катушки (*200 витков* толстого медного провода) для создания тока порядка *1...2 ампер* потребовался бы регулируемый источник постоянного напряжения в доли вольта. Среди стандартных приборов такого источника нет, поэтому здесь последовательно с катушкой включена в качестве резистора автомобильная лампа мощностью *20 Вт*, рассчитанная на напряжение *12 В*. Такую цепь несложно запитать от источника типа ИП, используя гнезда *5...25 вольт*. Изменяя величину тока через катушку с лампой, наблюдайте за отклонением тени на индикаторе.

Чтобы увязать наблюдаемый эффект с механизмом взаимодействия потока электронов с магнитным полем, внимательно изучите макет индикатора и его положение относительно катушки на макете, который расположен на передней панели модуля.

Тумблер на передней панели позволяет менять направление тока в катушке. Опишите наблюдаемый эффект и объясните его, используя выражение для силы Лоренца. Предложите способ использования нанесенной вокруг индикатора шкалы для оценки магнитной индукции в общепринятых физических единицах. Результаты оформите в виде протокола исследования.

Работа № 7

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ТОКОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ КЛЕЩАМИ

При протекании переменного тока по проводнику вокруг него возникает переменный магнитный поток. Если окружить этот проводник кольцевым ферромагнитным сердечником, то этот магнитный поток локализуется преимущественно внутри ферромагнетика. Амплитуда колебаний магнитного потока будет пропорциональна току в проводнике. Обнаружить колебания можно, намотав на сердечник обмотку с большим числом витков, и измеряя ЭДС, наводимую в ней переменным магнитным потоком. Схему измерения описанным спо-

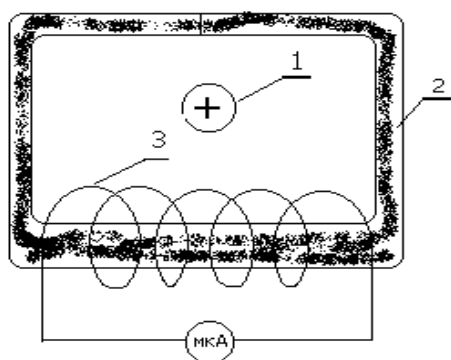


Рис. 7.1. 1 – проводник с током, 2 – магнитопровод, 3 – сигнальная обмотка

сособом реализуют с помощью прибора, называемого токоизмерительными клещами, поскольку в приборе предусмотрен механизм размыкания кольцевого сердечника для надевания его на проводник с измеряемым током. Принцип измерения иллюстрируется рис. 1.

Вид токоизмерительных клещей с открытой крышкой показан на рис. 2.

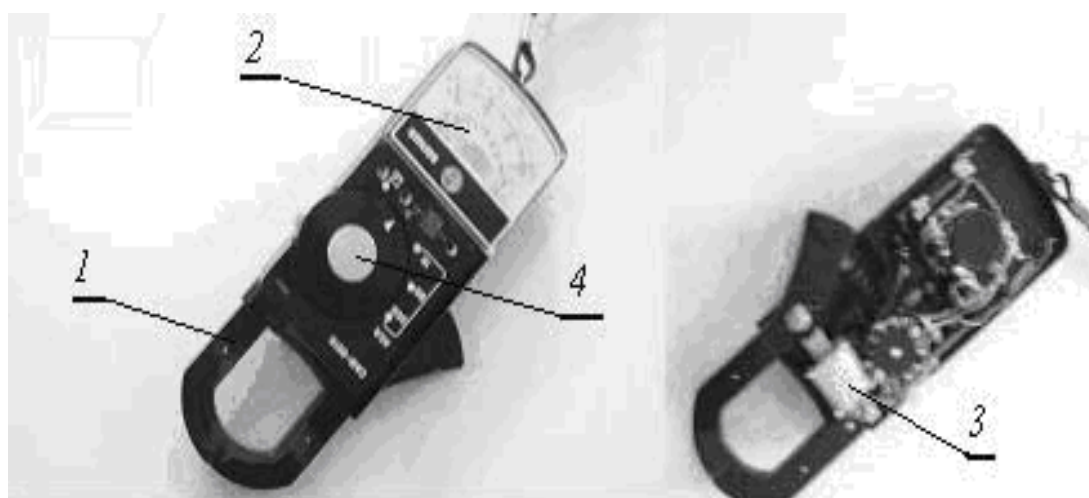


Рис. 7.2. Комбинированный прибор для измерений в цепях переменного тока и прозвонки цепей (режим омметра). 1- кольцевой магнитопровод, 2- измеритель малых токов, 3- катушка токосъемника, 4- переключатель вида измерений.

Задание на выполнение эксперимента

Соберите установку, содержащую
 – регулятор напряжения (автотрансформатор),
 – силовой трансформатор и нагрузку, в качестве которой используется спираль нагрева катода магнетрона типа М-162. У этого магнетрона номинальный ток накала составляет 11А при напряжении 4 В. Схема установки приведена на рис. 3.

Включите автотрансформатор в сеть. Охватите токоизмерительными клещами один из подводящих проводов и отсчитайте показания гальванометра. Оцените влияние

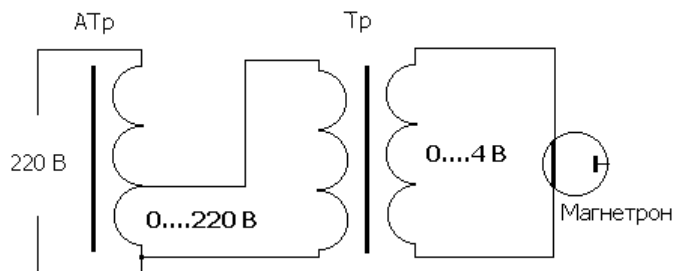


Рис. 7.3. Схема установки для проведения эксперимента

местоположения провода в просвете клещей на показания прибора, перемещая прибор относительно провода вручную. Результат подробно опишите и объясните. Можно ли таким способом измерять постоянный ток, и, если можно, тогда опишите как нужно изменить методику измерения?



Работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Классический метод определения основной кривой намагничивания ферромагнетика базируется на создании постоянного магнитного поля в образце пропусканием через намагничивающую обмотку постоянного тока и измерении величины магнитной индукции баллистическим гальванометром.

Более современным является метод измерения на переменном токе, поскольку он дает больше информации и лучше поддается автоматизации, хотя таит в себе некоторые сложности. В данном практикуме применяется функциональный модуль КНФ-16.

Этот модуль предназначен для исследования зависимости коэффициента трансформации трансформатора с ферромагнитным сердечником от наличия в последнем постоянной составляющей магнитной индукции. Основу модуля составляет трехобмоточный трансформатор Т1 (см. схему). Его первичная обмотка подключается к источнику гармонического сигнала (функциональному генератору) ФГ, а вторичная обмотка соединяется с входом «У» осциллографа ЭО.

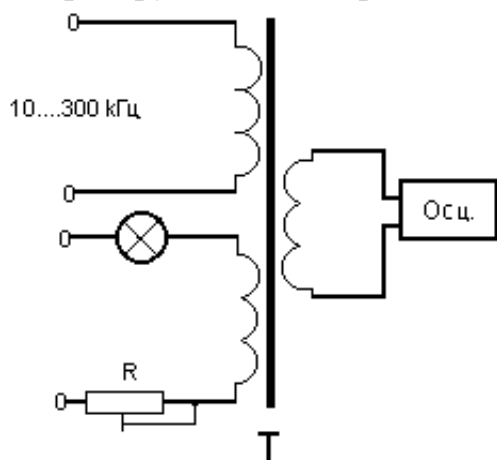
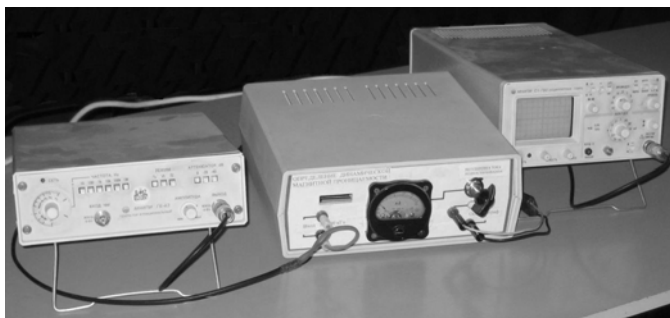


Рис. 8.1. Трехобмоточный трансформатор

Третья обмотка служит для создания в сердечнике постоянного магнитного потока. Ток через нее создается выпрямителем «2...5 В» лабораторного источника питания ИП, а избыток энергии гасится включенными последовательно с обмоткой переменным резистором R1 и лампой накаливания Л1. Резистор R1 служит одновременно для регулирования тока третьей обмотки. Модуль размещен в стандартном пластмассовом корпусе. На его задней стенке имеется разъем для соединения с источником питания ИП. На передней панели размещены гнезда для под-

ключения кабелей от функционального генератора ФГ и электронного осциллографа ЭО, а также индикатор тока третьей обмотки и ручка переменного резистора R1.

Проведение эксперимента



Общий вид установки

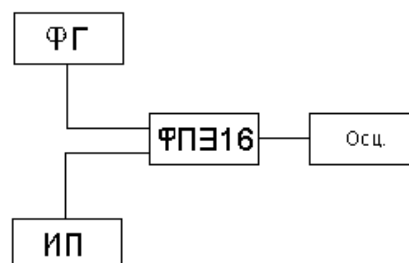


Рис. 8.2

Схема измерительной установки приведена на рис. 2. Наименования элементов расшифрованы выше. Начальные установки приборов приведены в таблице.

1. Снимается зависимость напряжения на вторичной обмотке от тока в обмотке подмагничивания на частоте 1кГц. Ток увеличивают до величины, при которой контролируемое напряжение уменьшится в 10 раз.

2. Опыт повторяется на частоте 10 кГц, а затем частота увеличивается до 100 кГц.

Результаты измерений заносятся в таблицу и по ним строятся соответствующие графики.

Обработка результатов эксперимента

Вывод рабочих формул

В рассматриваемом режиме в сердечнике трансформатора магнитный поток Φ создается двумя токами: постоянным током обмотки подмагничивания i_0 и переменным током i_1 , протекающим по первичной обмотке.

Взаимосвязь параметров измерительного трансформатора поясняется на совмещенном графике.

$$\Phi = \Phi(i_1) + \Phi_0(i_0) \quad (1)$$

Закон Ома для магнитных цепей устанавливает связь между магнитодвижущей силой (МДС), магнитным сопротивлением цепи R_m и создаваемым магнитным потоком:

$$\Phi = (i_1 N_1 + i_0 N_3) \frac{\mu S}{l} \quad (2)$$

Здесь N – число витков в соответствующих обмотках, S – площадь сечения магнитопровода, l – средняя длина силовой линии в нем, μ – динамическая маг-

нитная проницаемость сердечника в рабочей точке кривой намагничивания, т.е. $\mu = \frac{dB}{dH}$.

В данном опыте трансформатор работает в режиме холостого хода, поскольку входное сопротивление осциллографа, нагружающего вторичную обмотку весьма велико и может не учитываться. В этом случае ток первичной обмотки можно выразить через напряжение на ней, используя второй закон Кирхгофа:

$$i_1 R_1 + L \frac{di_1}{dt} = u_1 \quad (3)$$

На применяемых в опыте частотах генератора индуктивное сопротивление обмотки преобладает над активным, и первым слагаемым в (3) можно пренебречь.

Для тороидальных сердечников индуктивность обмотки равна: $L = \mu \frac{S}{l} N_1^2$, причем в этом выражении магнитная проницаемость определяется как отношение индукции В к смещению Н, и производная от тока

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{u_1}{\mu S/l N_1^2} \quad (4)$$

Напряжение вторичной обмотки u_2 по закону электромагнитной индукции и с учетом (2) равно

$$u_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_1 N_2 \frac{S\mu}{l} \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

Подстановка результата (4) в (5) дает окончательно

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2 \mu_{\approx}}{N_1 \mu_0} \quad (6)$$

Индексы у величины μ введены, чтобы отличить текущую проницаемость μ_0 от динамической проницаемости μ_{\approx} . Из полученной формулы видно, что при работе на линейном участке основной кривой намагничивания сердечника отношение напряжений равно отношению чисел витков (идеальный трансформатор). При смещении к области насыщения коэффициент трансформации может служить характеристикой динамической магнитной проницаемости с точностью до величины μ_0 . На графике приведена сня-

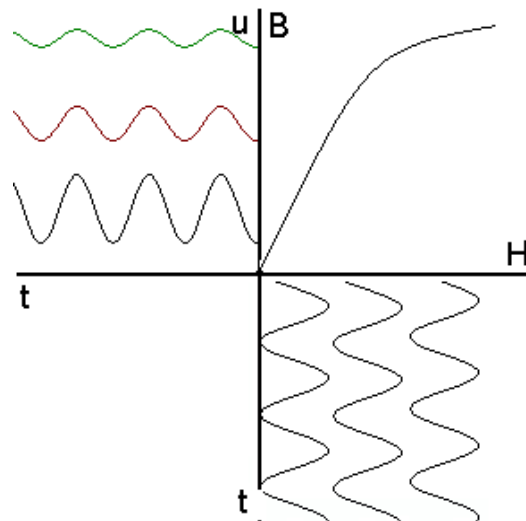


Рис. 8.3

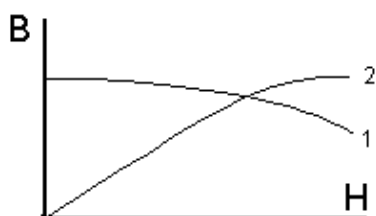


Рис. 8.4

тая опытным путем по изменению коэффициента трансформации зависимость динамической магнитной проницаемости B от постоянной составляющей магнитного смещения H (1). Графическое интегрирование дает зависимость B от H с той лишь оговоркой, что начальное значение B является постоянной интегрирования и должно определяться по специальной методике или его следует взять из паспортных данных.

Работа № 9

ДЕМОНСТРАЦИЯ ВИХРЕВОГО ХАРАКТЕРА ИНДУКЦИОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электрическое поле, возникающее в опыте электромагнитной индукции, обязано своим происхождением ускоренно движущимся зарядам (именно они создали изменяющийся поток магнитного поля). В этом случае, как уже говорилось, поле является не электростатическим, а электродинамическим. Важнейшее свойство этого поля проявляется в том, что оно является вихревым – т.е. его работа по перемещению заряда зависит от пути, по которому совершается перемещение. Иными словами, созданное таким образом электрическое поле способно совершать работу по замкнутому контуру. Очевидно, это возможно за счет энергии стороннего источника взаимодействия, породившего ускорение зарядов и переменный магнитный поток.

Как известно, математически это выражается, в интегральной форме посредством циркуляции векторного поля:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint_S \vec{B} d\vec{S} \quad (\text{или, в других обозначениях } \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}),$$

а в дифференциальной форме – посредством ротора: $\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$.

Добавим, что для электростатического поля правые части всех выражений нулевые – самостоятельное перемещение за счет электростатических сил осуществляется лишь в одну сторону. При вынужденном движении зарядов в противоположную сторону поле совершает работу, равную по модулю и отрицательную по знаку.

В данной работе предлагается наблюдать свойство зависимости работы по перемещению зарядов в цепи от формы их пути в области действия вихревого электрического поля. Переменный магнитный поток создается во внутреннем сечении соленоида, а измерителями совершаемой работы служат два вольтметра. Один подключен между двумя точками параллельно одному резистору, а другой, между теми же точками – параллельно другому резистору. Различие состоит лишь в том, что цепи резисторов расположены по разные стороны от тела

соленоида, и ток в одном из резисторов идет в одну сторону от исходной точки, а в другом – в обратную, совершая работу одного знака по замкнутому контуру силами индукционного электрического поля. Как только что отмечалось, для электростатического поля ни длина пути, ни значение сопротивления на этом пути не имеет значения для количества совершаемой работы.

Постановка эксперимента

Хорошо известно, что, действующая внутри источника постоянного тока сторонняя сила (например, химического происхождения), разделяет заряды на электродах и порождает в проводниках внешней электрической цепи электростатическое поле. При замыкании цепи возникает ток носителей зарядов, при создании которого совершается работа $A = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot I \cdot R$.

Величина $U = I \cdot R$ называется, как известно, падением напряжения на участке с сопротивлением R , она численно равна работе по перемещению единичного заряда на данном участке. Значение падения напряжения можно измерять вольтметром – устройством, в котором отклонение стрелки зависит от протекающего тока и пропорционально падению напряжения на внутреннем сопротивлении прибора. Для дальнейшего важно отметить, что на показания прибора не влияет, каким физическим явлением вызван протекающий через прибор ток.

Так, например, очевидно, что в схеме, изображенной на рис.1, показания вольтметра $U = I_2 \cdot r_2$ будут совпадать со значением $U = I \cdot R$ падения напряжения на резисторе R , по закону параллельного соединения⁷. Этот факт нетрудно доказать, пользуясь законом Кирхгофа для одного из контуров цепи: $I \cdot R - I_2 \cdot r_2 = 0$.

По сути, эта запись и является выражением потенциального характера работы электростатического поля, действующего в этом контуре по перемещению в нем зарядов. Очевидно и то, что если параллельно резистору R подключить еще один резистор или еще один вольтметр, то все падения напряжения будут равными. В данном случае значение всех падений напряжения равно разности потенциалов между точками А и В.

Но вот другой опыт.

На следующем рисунке схематически изображена следующая ситуация. Область с магнитным полем соленоида окружена проводом с двумя резисторами, соединенными параллельно в точках А и В. Напомним, что во внешней области соленоида

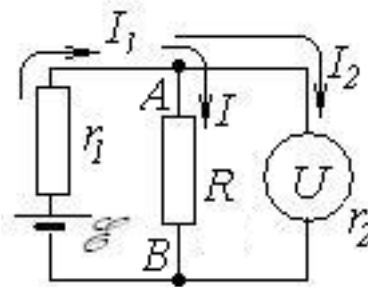
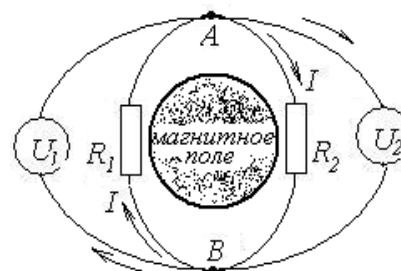


Рис. 9.1



⁷ Обычно сопротивление вольтметра выбирается очень большим. Так, что ответвляемый в цепь вольтметра ток пренебрежимо мал по сравнению с током через исследуемый элемент.

магнитное поле отсутствует (в пределе – это бесконечно длинная катушка). Параллельно каждому из резисторов включен вольтметр с очень большим сопротивлением.

Очевидно, что если ток соленоида постоянен, то поток магнитного поля через любой из контуров равен нулю. Если же ток соленоида станет переменным, то в пространстве возникнет индукционное электрическое поле, и в контурах проводников, охватывающих область поля, появятся токи, вызванные действием соответствующих ЭДС индукции:

$$E_1 = \oint_1 \vec{E}_1 d\vec{l} \quad \text{и} \quad E_2 = \oint_2 \vec{E}_2 d\vec{l}.$$

Теперь показания вольтметров, подключенных различными путями, будут различаться. В самом деле, задавая какой-либо конкретный вид изменения магнитного потока во времени, например, линейный $\Phi = \alpha \cdot t$, получим, что, для рассматриваемой схемы включения значение ЭДС равно $E_i = \alpha$. При этом, значение тока в контуре с резисторами равно $I = \frac{\alpha}{R_1 + R_2}$, а показания вольтметров действительно будут различаться:

$$U_1 = \frac{\alpha \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{и} \quad U_2 = -\frac{\alpha \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Заметим, что, например, свивая один из проводников в кольца вокруг соленоида, можно в несколько раз изменить значение ЭДС индукции на данном участке. Именно этот прием используется в трансформаторах.

Описание установки и ход выполнения работы

В лабораторной установке ток соленоида изменяется не по линейному, а по гармоническому закону, амплитуда и частота которого задаются генератором. Это удобно потому, что исследуемый процесс можно многократно и автоматически повторять во времени. Теперь роль вольтметров выполняет двухлучевой осциллограф, развертка лучей которого синхронизируется с работой генератора. Такое техническое решение позволяет измерять, наблюдать и сравнивать форму и полярность переменного падения напряжения на резисторах в каждый момент времени за период синусоиды.

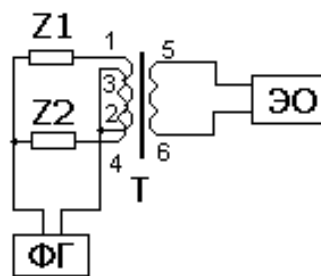
Работа № 10

ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОСТ

Известные четырехплечие мосты, в которых сравниваются узловые потенциалы (см. мосты Уитстона), обладают тем недостатком, что соединительные элементы (гнезда, провода и т.п.) вносят погрешность в результат измерения.

Трансформаторный измерительный мост избавлен в значительной мере от этого недостатка. Схема его приведена на рис. 1.

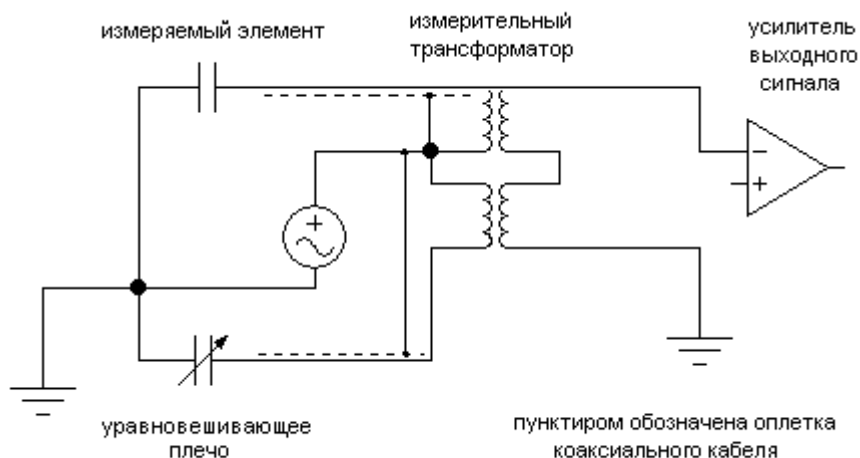
Основу его составляет измерительный трансформатор, имеющий две симметричных первичных обмотки, выполненные свитым вдвойне проводом и равномерно намотанные на тороидальном ферритовом сердечнике с относительной магнитной проницаемостью 2000. Благодаря этому коэффициент связи между обмотками 1-2 и 3-4 равен единице. Конец обмотки (2) соединен с началом другой обмотки (3) и к этой же точке подключен выход генератора синусоидального напряжения. Ток генератора разветвляется по обеим обмоткам и через нагрузки $Z1$ и $Z2$ поступает на обратный провод генератора (земля).



Эти нагрузки составлены измеряемым импедансом $Z1$ и измерительным импедансом $Z2$.

Поверх первичных обмоток намотана сигнальная обмотка 5-6, служащая для контроля соотношения измерительных токов в первичных обмотках путем измерения напряжения на выводах этой обмотки осциллографом или чувствительным гальванометром переменного тока.

Более подробно можно проследить работу моста на следующей схеме.



Лабораторный трансформаторный мост состоит из функционального модуля КНФ-20 с коммутационными элементами, функционального генератора ФГ, осциллографа, магазина сопротивлений, магазина емкостей и набора исследуемых двухполюсников. Блок-схема установки приведена на рис. 2.

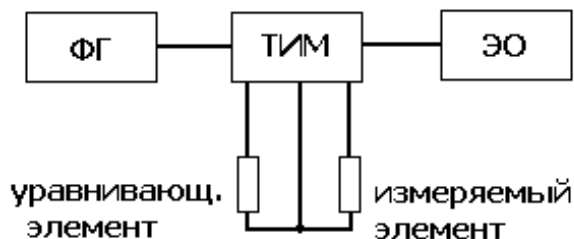


Рис. 2. Блок-схема измерительной установки с трансформаторным мостом

Проведение эксперимента

1. Измерение емкости конденсатора. Подключить к гнездам измерительного плеча конденсатор неизвестной емкости. Установить на функциональном генераторе напряжение 3...5 В и частоту 100 кГц. Электронный осциллограф настроить на развертку со временем полного хода развертки 1-2 мкс и чувствительность 10-20 мВ на деление. Изменяя емкость магазина, добиться минимальной ширины полосы на экране, что будет говорить об уравнивании моста. Произвести отсчет измеренной емкости.

2. Измерение сопротивления постоянного резистора. Вместо магазина емкостей подключить магазин сопротивлений. Произвести те же действия, что и в п.1. Вместо неизвестной емкости подключить неизвестное сопротивление и измерить его величину.



Общий вид установки

3. Измерение комплексного сопротивления. К установке прилагаются двухполюсники, внутри которых имеются конденсатор и резисторы. В этом случае уравнивание моста не может быть произведено только переменным резистором или переменным конденсатором. В измерительное плечо следует включить параллельно или последовательно магазины сопротивлений и емкостей. Уравнивание на одной частоте генератора производится методом последовательных приближений. Можно начать с любого элемента и изменять его величину до минимальной ширины светящейся полосы на экране осциллографа. Затем менять величину другого элемента до еще большего сужения полосы, и так до получения наилучшего уравнивания моста.

Примечание.

Если при смене частоты генератора измеренные значения сопротивления и емкости не изменятся, способ соединения их в двухполюснике совпадает с тем, который применен в уравнивающем плече. В противном случае параллельное соединение надо заменить на последовательное (или наоборот).

Результаты измерений обсудите с преподавателем.

ТРАНСФОРМАТОР КАК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИНДУКТОР

Трансформатор – это статическое (не содержащее движущихся частей) устройство, основанное на явлении электромагнитной индукции и служащее для преобразования действующих значений переменных напряжений и токов. В трансформаторе используются минимум две катушки индуктивности, связанных общим магнитным потоком, но гальванически отделенных друг от друга. Функционально в трансформаторе реализуются два преобразования энергии из одного вида в другой: энергия источника переменного тока, порождая ток в первичной обмотке (катушке), преобразуется в энергию возникающего при этом переменного магнитного поля. В свою очередь, переменное магнитное поле индуцирует ЭДС в витках вторичной обмотки.

За исключением информационных устройств, трансформатор призван передавать нагрузке определенную, зачастую значительную, мощность. Известно, что энергия магнитного поля пропорциональна произведению напряженности его на индукцию.

$$w = \frac{1}{2} BH$$

Поэтому для передачи трансформатором заданной мощности необходимо достигать максимально достижимых значений магнитной индукции. Технически это достигается размещением обмоток трансформатора на сердечнике из трансформаторной стали, современные сорта которой обеспечивают намагничивание до уровня 2...2,2 Тл.

В нулевом приближении свойства трансформатора можно описать следующим образом. Создаваемый в сердечнике первичной обмоткой магнитный поток Φ пронизывает поперечные сечения всех витков как первичной, так и вторичных обмоток. Это приводит к индуцированию ЭДС в каждом витке:

$$\varepsilon = S \frac{d\Phi}{dt}$$

Поскольку все витки каждой обмотки соединены в катушку последовательно, можно записать

$$\varepsilon_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\varepsilon_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

И отношение ЭДС вторичной обмотки к ЭДС первичной равно

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

По второму закону Кирхгофа ЭДС ε_1 уравнивает ЭДС источника. Следовательно, ЭДС ε_2 изменена по сравнению с ЭДС источника в k раз, поэтому k называют коэффициентом трансформации.

Каждое преобразование одного вида энергии в другой сопровождается переходом части этой энергии в другие виды, который может быть истолкован как потери энергии.

Ток первичной обмотки производит циклическое перемагничивание сердечника. Известно, что явление магнитного гистерезиса объясняется переходом части магнитной энергии в теплоту. Дополнительный нагрев сердечника вызывается вихревыми токами, величина которых зависит от размеров и формы деталей сердечника. Наконец, распределенное по всей длине обмотки активное сопротивление провода также поглощает часть электрической энергии, переводя ее также в тепло. Вторичная обмотка также обладает активным сопротивлением.

Серьезным фактором является и то обстоятельство, что не весь создаваемый первичной обмоткой магнитный поток пронизывает площадь витков вторичной обмотки, так как часть линий магнитной индукции замыкается по воздуху. Поэтому в реальном трансформаторе, кроме передачи во вторичную цепь основной части электрической энергии (90...95 %) имеют место выделение тепловой энергии и в проводах обмоток, и в магнитопроводе (сердечнике).

Известно, что реальные ферромагнетики, используемые для изготовления сердечников, обладают существенно нелинейной кривой намагничивания (зависимостью B от H). Поэтому синтез эквивалентной схемы трансформатора в виде набора элементов с фиксированными параметрами практически невозможен, а с учетом того, что главным образом трансформаторы применяются в силовых цепях с постоянной частотой надобность в такой схеме отпадает.

Поскольку двухобмоточный трансформатор может быть уподоблен четырехполюснику, представляет интерес рассмотреть крайние режимы его работы: режим холостого хода и режим короткого замыкания.

РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА

В этом режиме ток от вторичной обмотки не отбирается, и энергия электрической сети, поступающая в первичную обмотку, отдается сети при смене полярности напряжения, за исключением той ее части, которая нагревает обмотку. В соответствии со вторым законом Кирхгофа внешнее напряжение сети уравнивается в этом случае суммой ЭДС самоиндукции первичной обмотки и падением напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки. Учет потерь на вихревые токи в сердечнике в данном случае затруднителен, да и не нужен, так как роль магнитного поля в этом режиме сводится к существованию индуктивности первичной обмотки, практически запрещающей прохождение тока через обмотку. Ведь отбор энергии от сети равен работе на нагрев обмотки, а это всегда малая величина.

РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Режим короткого замыкания для исследования трансформатора – это не аварийный режим, когда трансформатор превращается в костер и не подлежит восстановлению. Его основным условием является обеспечение номинального по величине тока первичной обмотки при сопротивлении нагрузки во вторичной обмотке равном нулю. Естественно, напряжение сети придется для этого опыта снизить процентов на 90. В этом опыте трансформатор ведет себя как подлинный преобразователь мощности сети через мощность переменного магнитного потока в мощность вторичной обмотки. При проведении этого опыта магнитные потоки первичной и вторичной обмоток себя взаимно компенсируют в значительной мере, поэтому потери на гистерезис сердечника значительно снижаются. Опыт короткого замыкания дает возможность опытным путем определить потери энергии на нагрев обмоток трансформатора, в то время как опыт холостого хода показывает качество магнитопровода, заодно обнаруживая короткие замыкания в обмотках, если известен номинальный режим исправного трансформатора.

ПОРЯДОК РАСЧЕТА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Подготовка исходных данных

В качестве исходных данных необходимо определить напряжение вторичной обмотки E_2 , номинальный ток вторичной обмотки I_2 , частоту питающего напряжения f .

Кроме того, в исходные данные включаются нормативные параметры: коэффициент формы тока k_ϕ , коэффициент заполнения объема сердечника стальной k_c , допустимая плотность тока в проводах обмоток J , максимальная индукция магнитного поля в сердечнике B_m и плотность укладки обмоточного провода σ .

Расчет магнитопровода

Теория показывает, что мощность трансформатора пропорциональна произведению площади поперечного сечения магнитопровода (сердечника) S_c и площади окна, в котором размещены обмотки S_o . Иначе говоря, при заданной мощности можно варьировать количествами меди в обмотках и стали в сердечнике. Как правило, выбирают эти величины примерно равными.

$$S_c \cdot S_o = \frac{E_2 I_2 \cdot 10^2}{2 f k_\phi k_c \sigma J B_m},$$

где $E_2 u I_2$ – соответственно напряжение и ток вторичной обмотки соответственно, f – частота, Гц, k_ϕ – коэффициент формы питающего напряжения (для синусоиды =1,11), k_c – коэффициент заполнения сечения магнитопровода сталью (обычно 0,9), σ – коэффициент заполнения окна магнитопровода медью (в пределах 0,3...0,5), J – плотность тока в обмотках, А, (для медных проводов 2,5 А/кв.мм.), B_m – предельное значение магнитной индукции в сердечнике, Тл (до 1,6).

Пользуясь данной формулой, можно подобрать параметры сердечника оптимальным образом. Проще это сделать для витого сердечника, так как все – в руках разработчика. Если подбирается Ш-образный сердечник, необходимо воспользоваться справочником по размерам трансформаторной стали и выбрать размеры окна с учетом возможности размещения в нем всех обмоток и изоляции.

Расчет электрических параметров

Для каждого сорта трансформаторной стали приводятся данные по потерям мощности на перемагничивание P_{y0} , которые указываются в ваттах на килограмм массы G. Для рассчитываемого трансформатора

$$P_c = P_{y0} G$$

Обычно удельные потери этого вида имеют порядок 3 Вт/кг.

Кроме того, рассчитываются потери мощности на вихревые токи. Аналогично предыдущему

$$Q = Q_{y0} G$$

Поскольку эти мощности идут на нагрев сердечника, они образуются за счет активной составляющей тока первичной обмотки I_a

$$I_a = P_c / E_1$$

Ток намагничивания в номинальном режиме I_H рассчитывается исходя из мощности суммарных потерь и рабочего напряжения первичной обмотки.

$$I_H = Q / E_1$$

Рабочий ток первичной обмотки рассчитывается по сумме полезных мощностей, отбираемых вторичными обмотками, деленной на напряжение первичной.

$$I_{p1} = \frac{E_2 I_2 + E_3 I_3}{E_1}$$

Найденные величины позволяют определить модуль полного тока первичной обмотки с учетом как активной, так и реактивной составляющей этого тока.

$$I_1 = \sqrt{(I_{p1} + I_a)^2 + I_H^2}$$

Расчет сечения проводов обмоток

Расчет производится по найденным и требуемым значениям токов и допустимой плотности тока в проводах.

$$s_i = \frac{I_i}{J}$$

Расчет чисел витков в обмотках

Число витков в первичной обмотке рассчитывается по формуле

$$w_1 = \frac{E_1 10^4}{4k_\phi f s_c B_m}$$

Остальные числа рассчитываются по коэффициентам трансформации пропорционально.

Проверка размещения обмоток в окне магнитопровода

Эта часть расчета в значительной степени зависит от предыдущего опыта конструктора.

Иногда приходится продвигаться к цели методом последовательных приближений, чтобы минимизировать расход стали и меди, либо обеспечить некоторый производственный запас на возможные допуски в процессе производства.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. М.: Наука, 1983.
2. А.Н. Матвеев. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
3. Э. Парселл. Электричество и магнетизм. БКФ. Т. 2. М.: Наука, 1983.

Дополнительная

1. Е.С. Боровик, А.С. Мильнер. Лекции по магнетизму. Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1966.
2. С. Тикадзуми. Физика ферромагнетизма. М.: Мир, 1988.
3. П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Некоторые сведения из теории магнитных явлений:	
– вектор магнитной индукции и электромагнитная сила	3
– терминология и метрология	6
– поле в среде	7
– магнитная проницаемость	7
– ферромагнетики	9
– гистерезис намагничивания ферромагнетиков	10
– эффект Баркгаузена и магнитострикция	12
– эффект Холла	13
– законы Кирхгофа для расчета магнитных цепей	14
– релятивистские силы и магнетизм	15
Практические работы по магнитным явлениям:	
1. Исследование магнитного поля соленоида	17
2. Измерение коэффициента взаимной индукции	20
3. Исследование магнитного гистерезиса	22
4. Нелинейные эффекты в реактивных катушках	26
5. Оценка значения магнитной индукции методом магнетрона	29
6. Оценка значения магнитной индукции с помощью электронно-лучевого индикатора	31
7. Измерение переменного тока токоизмерительными клещами	33
8. Определение основной кривой намагничивания	35
9. Демонстрация вихревого характера индукционного электрического поля	38
10. Исследование трансформаторного измерительного моста	40
Приложения	
1. Трансформатор, основные понятия и соотношения	43
2. Литература	47