

Министерство образования и науки Республики Казахстан

**Костанайский государственный университет имени
А.Байтурсынова**

Кафедра электроэнергетики

Т.И.Глуценко

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ 2

ЧАСТЬ 2. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

Учебное пособие

Костанай, 2020

УДК 621.31 (075.8)
ББК 31.25я73
Г 55

Автор:

Глушенко Татьяна Ивановна, кандидат экономических наук

Рецензенты:

Шахнин Вадим Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электроэнергетики ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Гладов Юрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики КГУ имени А. Байтурсынова

Кошкин Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики КГУ имени А. Байтурсынова

Глушенко Т.И.

Г55 Теоретические основы электротехники 2. Часть 2 – Магнитные цепи.. Учебное пособие для образовательной программы 6В07101 – Электроэнергетика – Костанай, 2020. - 93 с.

ISBN 978-601-7597-92-4

В учебное пособие включены теоретические сведения на тему магнитных и электромагнитных явлений, методы расчета магнитных цепей с постоянным и переменным магнитными потоками, примеры решения задач, тесты и задания для самостоятельной работы студентов.

Предназначено для студентов электроэнергетических специальностей; оно может быть рекомендовано преподавателям высших учебных заведений при проведении занятий по теоретическим основам электротехники.

Утверждено и рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Костанайского государственного университета имени А. Байтурсынова, 27 февраля 2020 г., протокол № 2

ISBN 978-601-7597-92-4

© Глушенко Т.И., 2020

Содержание		стр.
Введение		4
Тема 1 Электромагнитные явления		5
1.1 Магнитное поле и его свойства		5
1.2. Магнитная индукция, напряженность магнитного поля и магнитный поток		8
...1.3 Магнитные свойства различных веществ.....		11
1.4 Постоянные магниты и электромагниты.....		18
1.5 Проводник с током в магнитном поле.....		25
1. 6 Электромагнитная индукция.....		28
1.6.1 Явление электромагнитной индукции.....		28
1.6.2 Возникновение э. д. с. индукции при движении разомкнутого проводника в магнитном поле. Правило правой руки.....		28
1.6.3 Опыты Фарадея.....		31
1.6. 4 Закон Ленца для электромагнитной индукции.....		35
1.6.5 Вихревые токи.....		39
1.6.6 Явление самоиндукции при замыкании цепи.....		43
1.6.7 Явление самоиндукции при размыкании цепи.....		45
Тема 2 Расчет магнитных цепей		47
2.1 Основные законы для магнитной цепи		49
2.2 Магнитные цепи с постоянным магнитным потоком		52
2.3 Неразветвленная магнитная цепь		56
2.3.1 Примеры расчета неразветвленной магнитной цепи...		57
2.4 Разветвленная магнитная цепь		65
2.4.1 Примеры расчета разветвленной магнитной цепи.....		66
2.5 Магнитные цепи с переменным магнитным потоком.....		71
2.5.1 Примеры расчета магнитной цепи с переменным магнитным потоком		74
3 Тесты		78
4 Индивидуальное домашнее задание №1.....		89
Заключение		92
Список использованных источников		93

Введение

«Теоретические основы электротехники 2» являются основной теоретической дисциплиной в системе подготовки специалистов в области электроэнергетики. Она базируется на знаниях, полученных студентами в результате изучения физики, математики и информатики и ТОЭ 1. В свою очередь, хорошее знание ТОЭ 2 значительно облегчает изучение специальных электротехнических дисциплин: электрических машин, информационно-измерительной техники, электроэнергетики и др.

Основная задача дисциплины - дать необходимую теоретическую подготовку по главным вопросам исследования и расчета магнитных цепей.

В основу расчета магнитных цепей положен графоаналитический расчет.

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров образовательной программы 6В07101 «Электроэнергетика». Учебное пособие содержит теоретический материал, примеры расчета магнитных цепей с постоянным магнитным потоком и переменным магнитным потоком, тесты и задание для самостоятельной работы.

1 Электромагнитные явления

1.1 Магнитное поле и его свойства

Учеными было установлено, что вокруг провода с электрическим током возникают магнитные силы, действующие на другие проводники и на различные вещества.

Особенно большое влияние магнитные силы оказывают на тела, состоящие из железа, стали и некоторых сплавов. Эти силы передаются с помощью материальной среды, которая находится в особом напряженном состоянии и называется магнитным полем.

Магнитное поле всегда создается движущимися электрическими зарядами. Неподвижные заряды не могут создать магнитного поля. Вокруг них, как известно, образуется электростатическое поле. Кроме того, магнитное поле возникает при изменении электрического поля. Само магнитное поле действует только на движущиеся электрические заряды. На неподвижные заряды магнитное поле не влияет.

Магнитное поле всегда создается движущимися электрическими зарядами. Неподвижные заряды не могут создать магнитного поля. Вокруг них, как известно, образуется электростатическое поле. Кроме того, магнитное поле возникает при изменении электрического поля. Само магнитное поле действует только на движущиеся электрические заряды. На неподвижные заряды магнитное поле не влияет.

Магнитное поле обладает способностью проникать через многие вещества, например, воздух, стекло, бумагу, картон, медь, воду, а также через разреженное (безвоздушное) пространство. Таким образом, вокруг провода с током магнитное поле образуется в любых веществах. По современным физическим воззрениям магнитное поле представляет собой вид материи. Так как магнитное поле действует на различные предметы и может приводить их в движение, то ясно, что оно обладает энергией.

Магнитные силы действуют в магнитном поле по определенным направлениям, которые называют *магнитными силовыми линиями*. С их помощью можно удобно и наглядно показывать магнитное поле. Изображение магнитного поля в виде совокупности некоторого числа силовых линий является довольно грубым и неточным. В действительности магнитное поле заполняет все пространство и через любую его точку проходит какая-то силовая линия. Однако для простоты изображают лишь небольшое число силовых линий, показывающих наиболее характерные особенности структуры поля.

Чтобы более точно изобразить магнитное поле, условились в тех местах, где поле сильнее, показывать силовые линии расположенными гуще, т. е. ближе друг к другу. И наоборот, в местах, где поле слабее, показывают силовые линии в меньшем количестве, т. е. расположенными реже. Взглянув на изображенное с помощью силовых линий магнитное поле, по густоте их расположения сразу, можно сказать, где поле сильнее и где слабее. Таким образом, силовые линии отображают реально существующее материальное магнитное поле.

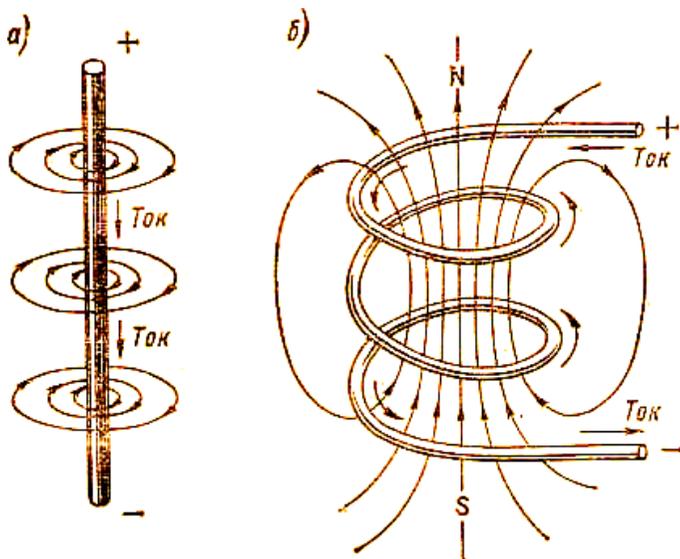


Рисунок 1.1 – Магнитное поле прямого провода и катушки

Иногда условно рассматривают магнитные силовые линии как некоторые упругие растянутые нити, которые стремятся сократиться, а также взаимно отталкиваются друг от друга (имеют взаимный боковой распор). Подобная аналогия помогает наглядно представить некоторые явления, происходящие в магнитном поле, но, конечно, не соответствует действительности.

У прямолинейного проводника силовые линии магнитного поля представляют собою концентрические окружности, охватывающие провод (рисунок 1.1, а). Эти линии имеются везде вокруг провода, но на рисунке 1.1, а они изображены лишь в

нескольких местах. Чем сильнее ток, тем сильнее магнитное поле вокруг провода. По мере удаления от провода с током магнитное поле постепенно ослабевает.

Направление магнитных силовых линий выбрано условно в соответствии с так называемым **правилом винта**: *если ввинчивать винт по направлению тока, то магнитные силовые линии будут направлены по ходу вращения винта*. Иначе говоря, *если смотреть вдоль провода так, чтобы ток шел от нас, то магнитные силовые линии будут направлены по часовой стрелке*. В соответствии с этим правилом показаны силовые линии на рисунке 1.1, а. Следует заметить, что при рассмотрении электромагнитных явлений направление тока принимается условное, т. е. от плюса к минусу.

Магнитные силовые линии всегда являются замкнутыми в отличие от электрических силовых линий, которые, как правило, начинаются на одном электрическом заряде и кончаются на другом (рисунок 1.1).

Чтобы получить более сильное магнитное поле, применяют катушки с обмоткой из проволоки. В этом случае магнитные поля отдельных витков катушки складываются, и их силовые линии сливаются в общий магнитный поток. Картина магнитного поля катушки показана на рисунке 1.1,6 (многие силовые линии на этом рисунке изображены не полностью, но, конечно, все они являются замкнутыми). На том конце катушки, где ток идет против хода часовой стрелки, магнитные силовые линии выходят из катушки. Этот конец катушки называют **северным магнитным полюсом** и обозначают буквой *N* (от слова *North* или *Nord* — север) или *C*. Другой конец катушки называют **южным магнитным полюсом** и обозначают буквой *S* (от слова *South* или *Süd* — юг) или *Ю*, на нем ток идет по ходу часовой стрелки и магнитные силовые линии входят в катушку. Если изменить направление тока в катушке, то направление магнитного поля и магнитные полюсы на концах катушки изменятся.

Взаимодействие катушек с током происходит по следующему правилу: **одноименные полюсы отталкиваются, а разноименные притягиваются**.

Чем больше число витков катушки и ток в ней, тем сильнее ее магнитное поле. Иначе говоря, магнитное поле катушки тем сильнее, чем больше произведение тока (в амперах) на число витков. Например, одинаковое магнитное поле возникает в случае, если через один виток провода протекает ток 1 А или если взять катушку с 50 витками и током 20 мА, или если ток 2 мА пропустить через катушку с 500 витками.

Во всех этих случаях через суммарное поперечное сечение проводников всех витков катушки проходит ток, равный 1000 мА.

Названия северный и южный полюс даны потому, что катушка с током, имеющая возможность легко вращаться вокруг вертикальной оси в горизонтальной плоскости, стремится занять такое положение, чтобы ее северный полюс смотрел на север, а южный — на юг. Это объясняется взаимодействием магнитного поля катушки с магнитным полем Земли.

Причины существования магнитного поля, пронизывающего и окружающего земной шар, пока еще точно не выяснены. Установлено, что магнитное поле Земли связано с электрическими явлениями в атмосфере. На высоте в десятки и сотни километров над поверхностью Земли имеются ионизированные слои воздуха (ионосфера), в которых часть атомов распалась на положительные ионы и электроны. Ионизация воздуха вызвана действием солнечного излучения и космических лучей, приходящих на Землю из удаленных частей Вселенной.

По одной из теорий земного магнетизма считается, что вследствие вращения земного шара вокруг своей оси находящиеся в атмосфере электрически заряженные частицы создают ток. Получается, что земной шар как бы окружен одним витком провода с током. Магнитное поле Земли создается этим атмосферным током, причем у северного географического полюса находится южный магнитный полюс, а у южного географического — северный магнитный. По другой теории основную роль играют токи, возникающие внутри Земли в результате ее вращения.

Следует отметить, что изменение солнечного излучения, вызванное различными процессами, происходящими на Солнце, оказывает значительное влияние на ионосферу. При этом изменяется и магнитное поле Земли. Иногда наблюдаются очень сильные его изменения, называемые магнитными бурями. Они вызываются резкими изменениями солнечной активности, например, появлением солнечных пятен, представляющих собой гигантские взрывы.

1.2. Магнитная индукция, напряженность магнитного поля и магнитный поток

Магнитное поле характеризуется *магнитной индукцией* B . Чем сильнее поле в данном месте пространства, тем гуще в нем расположены магнитные силовые линии и тем больше магнитная

индукция. Поэтому магнитные силовые линии также называют *линиями магнитной индукции*.

Если в некоторой области магнитные силовые линии расположены равномерно, то поле в этой области называют *однородным*. Магнитная индукция \mathbf{B} в нем везде одна и та же. Такое поле возникает внутри катушки, имеющей длину много больше диаметра. У концов катушки и вокруг нее поле неоднородно, а также слабее, нежели внутри катушки. В большинстве случаев только часть магнитного поля может быть однородной.

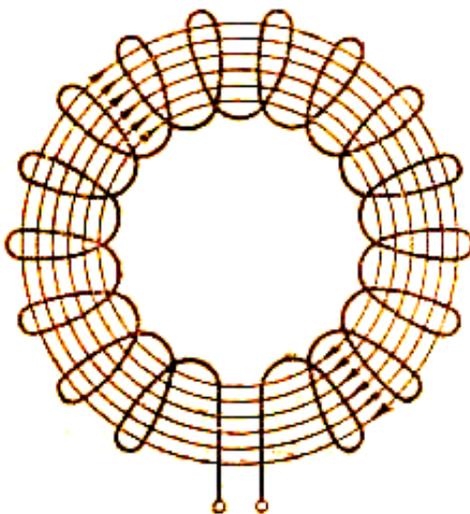


Рисунок 1.2 – Тороидальная катушка

Все поле приблизительно однородно у тороидальной катушки (рисунок 1.2). Подобные катушки имеют практическое применение. Их достоинством является то, что поле расположено только внутри катушки и не рассеивается в окружающем пространстве.

Для характеристики силы магнитного поля вместо магнитной индукции \mathbf{B} часто применяют *напряженность магнитного поля \mathbf{H}* , которая пропорциональна магнитной индукции и связана с ней следующим соотношением:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0. \quad (1.1)$$

Здесь μ_a есть так называемая **абсолютная магнитная проницаемость**. Она характеризует магнитные свойства среды, в которой создано магнитное поле. Подробнее о магнитной проницаемости рассказано в следующем параграфе.

В тороидальной катушке напряженность поля тем больше, чем больше произведение тока I на число витков w и чем меньше длина l окружности, вдоль которой выполнена намотка. Иначе говоря, l есть средняя длина силовой линии. Формула для расчета напряженности поля тороидальной катушки имеет следующий вид:

$$H = Iw/l. \quad (1.2)$$

По этой формуле можно установить единицу напряженности поля. Произведение Iw принято выражать в амперах, так как число витков не имеет размерности. Если произведение Iw равно одному амперу и l равно одному метру, то H также равно единице, следовательно, напряженность измеряется в **амперах на метр** (А/м).

Таким образом, напряженность поля 1 А/м получается внутри тороидальной катушки со средней длиной силовой линии, равной одному метру, если вдоль нее расположено, например, 100 витков, а ток равен 0,01 А, или если число витков составляет 1000, а ток равен 0,001 А и т. д.

Приведенная формула с некоторым приближением дает значение H и внутри цилиндрической катушки (рисунок 1.1, б), причем l есть длина намотки. Чем она больше по сравнению с диаметром витка, тем меньше погрешность в определении H .

Если поле создано не катушкой, а прямым проводом, то H в какой-либо точке поля зависит от тока в проводе и расстояния между данной точкой и проводом.

Иногда встречается применявшаяся ранее единица измерений напряженности магнитного поля в системе СГС. Она названа **эрстедом** (Э) в честь датского физика Х. К. Эрстеда, который в 1820 г. открыл влияние тока на магнитную стрелку компаса. Можно считать, что $1 \text{ Э} \approx 80 \text{ А/м}$.

Магнитное поле, пронизывающее какую-либо площадь, называют **магнитным потоком**. Если такую площадь пронизывают все силовые линии данного поля, то говорят о **полном магнитном потоке**. Очевидно, что можно рассматривать частичный магнитный поток, составляющий лишь часть полного потока. Магнитный поток обозначается буквой Φ и измеряется в веберах (Вб). Эта единица измерений названа в честь немецкого ученого В. Вебера. Ранее в системе СГС магнитный поток выражали в **максвеллах** (Мкс). Эта

единица измерений названа в честь английского физика Д. Максвелла, сделавшего выдающиеся исследования в теории электромагнетизма. Один максвелл составляет 10^{-8} вебера.

Поскольку магнитная индукция связана с плотностью магнитных силовых линий, то число силовых линий, проходящих через 1 см^2 площади поперечного сечения магнитного потока, пропорционально магнитной индукции B . Тогда общее число силовых линий, проходящих через площадь S перпендикулярно к ней, для однородного поля пропорционально произведению BS и определяет магнитный поток Φ , пронизывающий площадь S , т. е.

$$\Phi = BS, \quad (1.3)$$

отсюда $B=\Phi/S$, т. е. магнитная индукция представляет собой плотность магнитного потока. Если $\Phi=1 \text{ Вб}$ и $S=1 \text{ м}^2$, то и B будет равна единице. Эта единица измерений магнитной индукции в честь югославского ученого Н. Тесла названа *тесла* (Тл). Таким образом, $1 \text{ Тл}=1 \text{ Вб/м}^2$. Ранее в системе СГС применялась единица магнитной индукции *гаусс* (Гс), названная в честь немецкого математика К. Гаусса, причем $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$.

1.3 Магнитные свойства различных веществ

Если в магнитное поле, созданное в воздухе или в безвоздушном пространстве, поместить какое-либо тело, то поле будет изменяться. В некоторых телах магнитный поток усиливается по сравнению с потоком в окружающем пространстве. Это так называемые *парамагнитные* вещества. Другие вещества, наоборот, ослабляют магнитный поток. Они называются *диамагнитными*.

Величина, показывающая, во сколько раз изменяется магнитный поток в данном веществе по сравнению с магнитным потоком в воздухе, называется *относительной магнитной проницаемостью* или просто *магнитной проницаемостью* вещества и обозначается μ . Конечно, сравнивать следует магнитные потоки, проходящие через одинаковые площади.

Магнитная проницаемость является важной величиной, характеризующей магнитные свойства различных веществ. Для парамагнитных веществ $\mu > 1$, а для диамагнитных — $\mu < 1$. У большинства диамагнитных и парамагнитных веществ μ незначительно отличается от единицы. Строго говоря, $\mu = 1$ только для безвоздушного пространства (вакуум). Однако для воздуха можно считать, что $\mu = 1$

Как было указано ранее, магнитные свойства веществ характеризует также **абсолютная магнитная проницаемость** μ_a , связанная с относительной магнитной проницаемостью соотношением:

$$\mu_a = \mu_0 \mu \quad (1.4)$$

Здесь μ_0 представляет собой абсолютную магнитную проницаемость вакуума (воздуха). Ее называют **магнитной постоянной** и она равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Ом·с/м. Если ввести μ_0 в ранее приведенные формулы для основных магнитных величин, то получим

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad \text{и} \quad \Phi = \mu_0 \mu \mathbf{H} S \quad (1.5)$$

Среди парамагнитных веществ особое место занимают **ферромагнитные вещества**, у которых магнитная проницаемость доходит до сотен, тысяч единиц и выше. К ферромагнитным веществам, имеющим широкое применение в электротехнике и радиотехнике, относятся, в частности, сталь, никель, кобальт, а также некоторые сплавы.

Значительное увеличение магнитного потока в ферромагнитных телах объясняется тем, что такие тела под действием внешнего магнитного поля намагничиваются, т. е. создают собственное магнитное поле. Оно складывается с намагничивающим полем и результирующее поле становится более сильным.

Магнитная индукция результирующего поля \mathbf{B} является суммой индукции \mathbf{B}_0 внешнего намагничивающего поля и индукции $\mathbf{B}_{\text{внут}}$ внутреннего поля, возникшего под действием внешнего поля:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_{\text{внут}} \quad (1.6)$$

На рисунке 1.3 показано изменение магнитного поля, когда в него помещен ферромагнетик. Силовые линии поля втягиваются в этот предмет и в нем получается значительно более сильный магнитный поток, нежели в окружающем пространстве.

Современная физика объясняет магнитные свойства различных веществ следующим образом. Электроны, движущиеся вокруг ядра атома, представляют собой элементарные электрические токи, которые и создают магнитные поля. Если вещество не является ферромагнитным, то в нем элементарные магнитные поля расположены беспорядочно, т. е. имеют различные направления. В таком веществе не создается заметного результирующего поля, а сами

внутриатомные магнитные поля во внешнем пространстве не обнаруживаются.

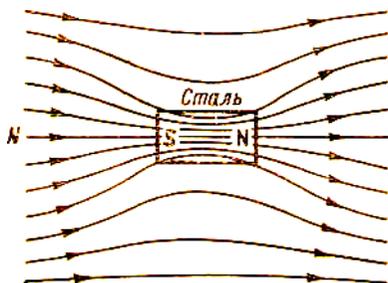


Рисунок 1.3 – Ферромагнитное вещество в магнитном поле

Под действием внешнего магнитного поля происходит изменение расположения элементарных магнитных полей. Но у веществ, имеющих значение μ , близкое к единице, такое изменение незначительно. При этом у парамагнитных веществ результирующее магнитное поле элементарных токов складывается с внешним полем. Получается незначительное усиление поля. В диамагнитных веществах, наоборот, результирующее поле элементарных внутриатомных токов направлено навстречу внешнему полю и происходит незначительное ослабление поля. После прекращения влияния внешнего поля элементарные токи снова располагаются в беспорядке и результирующее внутреннее поле исчезает.

Иные явления наблюдаются в ферромагнитных веществах. При нормальных температурах они имеют кристаллическое строение. Маленькие кристаллы ферромагнитных веществ состоят из отдельных намагниченных областей, называемых **доменами** и имеющих размеры около 10^{-2} — 10^{-3} см. В каждом домене магнитные поля атомов расположены в определенном порядке, т. е. имеют одинаковые направления. В ненамагниченном теле магнитные поля доменов имеют различные направления (рисунок 1.4, а). Под действием внешнего магнитного поля у части атомов, находящихся внутри доменов, магнитные поля получают направление вдоль внешнего поля. Иначе говоря, домены, имеющие свое поле, почти совпадающее по направлению с внешним полем, увеличиваются в размерах за счет соседних доменов (рисунок 1.4,б), Возникает сильное результирующее поле.

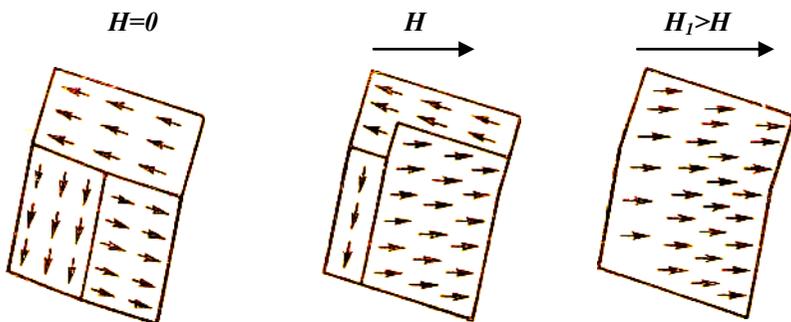


Рисунок 1.4 – Направление магнитных полей доменов в ферромагнитном веществе:
 а — при отсутствии внешнего поля;
 б — при наличии внешнего поля;
 в — при магнитном насыщении

Чем сильнее внешнее намагничивающее поле, тем более строгий порядок наблюдается в расположении элементарных магнитных полей доменов и тем сильнее общий магнитный поток. При достаточно сильном намагничивающем поле магнитные поля всех доменов принимают одинаковое направление (рисунок 1.4, а). Дальнейшее намагничивание становится невозможным. Такое состояние ферромагнитного тела называют *магнитным насыщением*.

Процесс намагничивания ферромагнитного вещества наглядно отражает *кривая намагничивания*. Она показывает зависимость магнитного потока Φ или магнитной индукции B от напряженности намагничивающего поля H (рисунок 1.5).

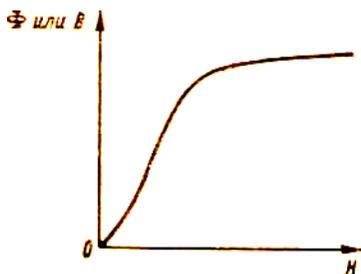


Рисунок 1.5 – Кривая намагничивания ферромагнитного вещества

Как видно из рисунка 1.5, сначала при увеличении H наблюдается значительный рост магнитного потока (при малых значениях H это возрастание происходит несколько медленнее). Но при некотором значении H рост магнитного потока замедляется и далее почти прекращается, т. е. наступает магнитное насыщение. Небольшое увеличение магнитного потока при насыщении происходит за счет того, что растет внешнее намагничивающее поле.

Из рассмотрения кривой намагничивания можно сделать вывод, что магнитная проницаемость у ферромагнитных веществ не является постоянной, а зависит от H . Действительно, магнитная проницаемость $\mu = B/(\mu_0 H)$ могла бы оставаться постоянной только тогда, когда величина B изменялась бы пропорционально H , т. е. если бы кривая намагничивания представляла собой прямую линию, проходящую через начало координат. Кривая намагничивания показывает, что B изменяется не пропорционально H , поэтому μ , при возрастании H сначала растет, а при переходе к магнитному насыщению она уменьшается (рисунок 1.6).

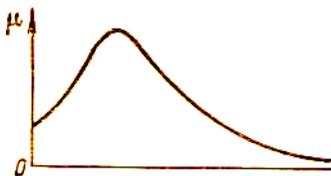


Рисунок 1.6 – Зависимость магнитной проницаемости от напряженности намагничивающего поля

Если ферромагнитное тело намагнитить с помощью внешнего магнитного поля, а затем уменьшать напряженность этого поля до нуля, то тело размагничивается не полностью. В нем обнаруживается остаточный магнетизм. Это объясняется тем, что не все домены под влиянием имеющегося в каждом теле теплового движения возвращаются к беспорядочному состоянию.

Остаточный магнетизм может быть показан с помощью *кривой намагничивания* (рисунок 1.7). Если тело вначале не было намагничено, то при возрастании H магнитный поток изменяется по кривой OA . Пусть теперь H уменьшается. Тогда магнитный поток Φ будет изменяться не по той же кривой OA , а по кривой AB , которая расположена выше OA . Изменение магнитного потока отстает от

изменений намагничивающего поля. Такое отставание называется **магнитным гистерезисом**.

При уменьшении H до нуля сохраняется некоторый остаточный поток Φ_0 и соответствующая ему остаточная магнитная индукция B_0 (отрезок OB). Они характеризуют остаточный магнетизм. Чтобы полностью размагнитить тело, т. е. добиться $\Phi=0$, нужно приложить внешнее магнитное поле обратного направления. Тогда при некотором отрицательном значении H_c получим $\Phi=0$. Величину H_c (отрезок OG) называют **задерживающей** или **коэрцитивной силой**. Если продолжать намагничивать тело, то можно довести его до насыщения (точка D), а при уменьшении H опять наблюдается гистерезис. Кривая размагничивания DE не совпадает с кривой намагничивания $ГД$. При $H=0$ снова наблюдаем остаточный магнетизм (отрезок OE), и для его устранения необходимо иметь H , соответствующее отрезку $OЖ$.

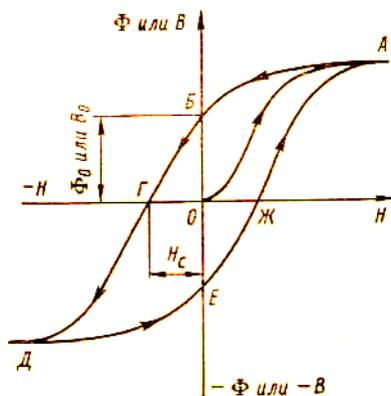


Рисунок 1.7 – Кривые намагничивания и перемагничивания ферромагнитного вещества

Таким образом, перемагничивание, т. е. намагничивание и размагничивание, будет происходить по кривой $ABГДЕЖA$, которую принято называть **петлей гистерезиса**. Форма и размеры этой кривой различны для разных ферромагнитных материалов.

Ферромагнитные вещества делятся на две группы. К **магнитомягким материалам** относятся железо, мягкая (незакаленная) сталь, а также другие материалы, которые легко намагничиваются. В них можно получить высокие значения магнитной

индукции при сравнительно небольших напряженностях намагничивающего поля. Но зато они легко размагничиваются, и поэтому в них наблюдается очень небольшой остаточный магнетизм.

Магнитотвердые материалы намагнитить труднее. К ним относятся закаленная сталь и стальные сплавы, содержащие вольфрам, хром, молибден, алюминий, никель, кобальт и другие металлы. Для их намагничивания необходимо значительно более сильное поле, но зато они характеризуются большей коэрцитивной силой, т. е. их труднее размагнитить. В таких материалах может существовать большой остаточный магнетизм. На рисунке 1.8, а показаны для сравнения гистерезисные петли магнитомягкого (кривая 1) и магнитотвердого (кривая 2) материалов.

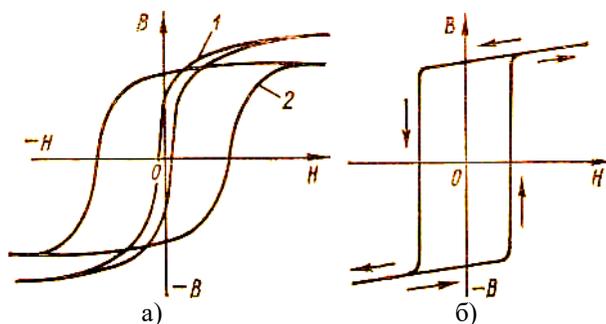


Рисунок 1.8 – Петли гистерезиса (а) магнитомягкого (кривая 1) и магнитотвердого (кривая 2) материалов; прямоугольная петля гистерезиса (б)

В радиоэлектронной аппаратуре находят все более широкое применение ферромагнитные материалы с **прямоугольной петлей гистерезиса** (ППГ). Пример такой петли показан на рисунке 1.8, б. Как видно, ее форма действительно приближается к прямоугольнику. Такие материалы характерны тем, что при изменении напряженности намагничивающего поля в них происходит резкий переход из одного намагниченного состояния в другое, при котором направление магнитного потока изменяется на противоположное.

Ферромагнитные сердечники с ППГ применяют в электронных вычислительных машинах, работающих по двоичной системе счисления, т. е. с двумя цифрами 0 и 1. Этим цифрам соответствуют два резко-различных магнитных состояния.

1.4 Постоянные магниты и электромагниты

Очень давно было установлено, что некоторые сорта железной руды обладают способностью притягивать стальные предметы. Это явление назвали *магнетизмом*, так как впервые подобные *естественные магниты* были обнаружены вблизи греческого города Магнезии. Если натереть естественным магнитом кусок закаленной стали, то он сам становится магнитом. На практике широко применяются *постоянные (искусственные) магниты*, которые изготавливают путем намагничивания стали с помощью электрического тока.

Каждый магнит притягивает ферромагнитные предметы наиболее сильно на своих концах — *полюсах*. Подобно катушке с током, магнит, имеющий возможность свободно вращаться на вертикальной оси, всегда стремится повернуться северным полюсом на север, а южным — на юг. На этом основано применение магнитной стрелки в качестве компаса, впервые осуществленное еще в древности.

Взаимодействие магнитов друг с другом всегда происходит так, что одноименные полюса *отталкиваются*, а разноименные *притягиваются*. Следует подчеркнуть, что в этих случаях взаимодействуют не полюсы, а магнитные поля обоих магнитов. Северный и южный полюсы имеются у каждого магнита. Отдельно получить один из магнитных полюсов невозможно.

Силовые линии магнитного поля постоянного магнита во внешнем пространстве направлены от северного полюса к южному (это направление выбрано условно). Они являются замкнутыми линиями и продолжаются внутри магнита. По современным воззрениям энергия постоянного магнита сосредоточена в его магнитном поле. Как видно, постоянный магнит по многим своим свойствам подобен катушке с током. На рисунке 1.9 показаны магнитные поля прямого и подковообразного магнитов. Такая их форма применяется наиболее часто, но встречаются и магниты другой формы. При изображении магнитных полей надо иметь в виду, что их силовые линии около поверхности ферромагнитных предметов всегда перпендикулярны к этой поверхности.

Для изготовления сильных постоянных магнитов в настоящее время используются особые сорта стали, содержащие значительное количество примесей других металлов. К ним относится, например, алюминий-никелевая сталь, называемая *альни*. Сплав альни с кобальтом получил название *альнико*. Применяются также сплав альни с кремнием, называемый *альнисси*, и сплав железа, никеля, алюминия,

кобальта и меди — *магнико*. Магниты из этих сплавов во много раз легче, чем магниты из обычной стали.

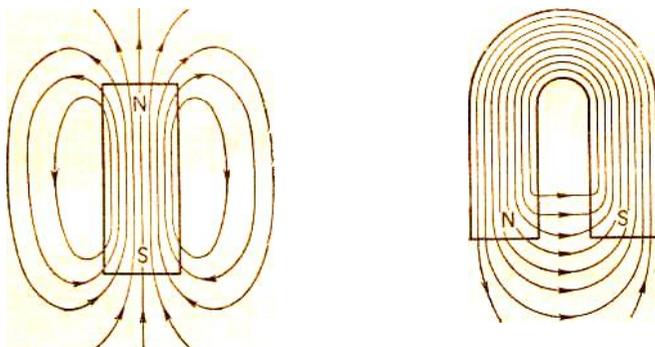


Рисунок 1.9 – Магнитные поля прямого и подковообразного магнитов

Сплавы для постоянных магнитов характеризуются большой коэрцитивной силой H_c и большой остаточной магнитной индукцией. В последнее время применяются также *металлокерамические магниты*. Их изготавливают путем спекания или прессования с последующим обжигом некоторых ферромагнитных порошков.

Постоянные магниты размагничиваются от ударов и толчков, так как при этом нарушается правильный порядок в расположении магнитных полей доменов. Ферромагнитные тела размагничиваются также при нагревании вследствие того, что тепловое движение приводит к нарушению упорядоченного состояния доменов. При высокой температуре кристаллическая структура стали и других ферромагнитных веществ разрушается, и эти вещества вообще не могут быть намагничены. Для сохранения постоянных магнитов в течение долгого времени необходимо, чтобы их магнитный поток не рассеивался в воздухе. С этой целью при хранении магнита полюсы замыкают каким-либо предметом из мягкой стали (якорем).

Магнитный поток катушки с током усиливается во много раз, если в катушку вставить сердечник из ферромагнитного материала. Это объясняется тем, что сердечник под действием поля катушки намагничивается и создает добавочный магнитный поток, более сильный, нежели у самой катушки (рисунок 1.10, а). Катушка с ферромагнитным сердечником называется *электромагнитом*. Чаще всего электромагниты имеют сердечники из магнитомягкого материала, например из мягкой стали. Такие сердечники сильно

намагничиваются сравнительно небольшим током, но после выключения тока почти полностью размагничиваются. Поэтому электромагниты, как правило, являются **временными магнитами**; они обладают магнитными свойствами только в течение того времени, пока в обмотке идет ток. Во многих случаях это свойство электромагнитов является весьма важным.

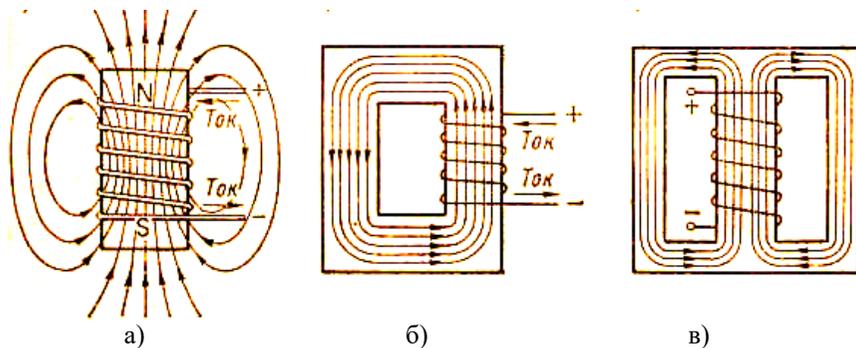


Рисунок 1.10 – Электромагниты с прямым и замкнутым сердечниками

В некоторых приборах применяются **поляризованные электромагниты**, имеющие сердечник из магнитотвердого материала, например, из закаленной стали. При выключении тока они лишь незначительно размагничиваются.

Магнитный поток в электромагните тем сильнее, чем сильнее намагничивающее поле, т. е. чем больше число витков обмотки и ток в ней, а также зависит от конструкции сердечника. Для увеличения магнитного потока нужно, чтобы он по возможности проходил не по воздуху, а по ферромагнитному веществу с большой магнитной проницаемостью. Наиболее сильный магнитный поток возникает в замкнутом сердечнике (рисунок 1.10,б и в). Сердечник и участки пространства, через которые проходит магнитный поток какого-либо электромагнита, принято называть **магнитной цепью**.

При рассмотрении магнитной цепи часто пользуются понятиями **магнитодвижущей силы** (МДС) и **магнитного сопротивления**. Они вводятся на основании следующих соображений.

Магнитный поток выражается формулой (1.5):

$$\Phi = \mu_a HS,$$

а напряженность поля равна по формуле (1.2):

$$H = Iw/l.$$

Поэтому можно написать

$$\Phi = \mu_a IwS/l \quad . \quad (1.7)$$

Если разделить числитель и знаменатель на $\mu_a S$, то получим

$$\Phi = Iw \left(\frac{l}{\mu_a S} \right)^{-1} \quad (1.8)$$

В этой формуле числитель Iw может быть назван *магнитодвижущей (намагничивающей) силой F* . Действительно, подобно тому, как в электрической цепи ток пропорционален ЭДС, в магнитной цепи магнитный поток пропорционален МДС. А величина $l/(\mu_a S)$, стоящая в знаменателе, является *магнитным сопротивлением R_m* , и тогда вся формула может быть названа *законом Ома для магнитной цепи*:

$$\Phi = F/R_m. \quad (1.9)$$

Однако эти представления являются условными. На самом деле магнитный поток не представляет собой движения каких-либо частиц вдоль магнитной цепи. Можно говорить лишь о некотором внешнем сходстве законов магнитной цепи с законами электрической цепи.

Тем не менее, понятие о магнитном сопротивлении оказалось весьма полезным. Значение R_m тем больше, чем больше длина, а также чем меньше магнитная проницаемость и площадь поперечного сечения сердечника. Выражение для магнитного сопротивления очень напоминает формулу для электрического сопротивления, причем по аналогии с удельной электрической проводимостью играет роль *удельной магнитной проводимости*.

Замкнутый ферромагнитный сердечник имеет малое магнитное сопротивление. Поэтому магнитный поток будет большим, и он проходит именно по сердечнику, так как магнитное сопротивление воздуха во много раз больше. Даже небольшой воздушный зазор в замкнутом сердечнике (рисунок 1.11) резко увеличивает магнитное

сопротивление и уменьшает магнитный поток. Формула для магнитного потока при наличии воздушного зазора толщиной $l_в$ примет вид

$$\Phi = Iw / \left(\frac{\ell}{\mu_a S} + \frac{\ell_в}{\mu_0 S} \right) \quad (1.10)$$

В этой формуле в знаменателе добавилось магнитное сопротивление воздушного зазора.

Чтобы получить возможно более сильный магнитный поток, воздушные зазоры в магнитной цепи делают возможно меньшими. Однако иногда в замкнутых сердечниках устраивают специально воздушные зазоры для того, чтобы сердечник не намагничивался до насыщения. Если площадь поперечного сечения сердечника имеет малое значение или если МДС велика, то может наступить магнитное насыщение, и при изменении тока в обмотке электромагнита магнитный поток уже почти не будет изменяться. Применение в сердечнике воздушного зазора уменьшает магнитный поток и насыщения не наступает. На рисунке 1.12 показаны для сравнения кривые намагничивания сердечника без зазора (кривая 1) и с зазором (кривая 2). При наличии зазора насыщение наступает при гораздо больших значениях МДС. Зазор фактически часто заполняется диамагнитным веществом (например, бумагой, картоном, алюминием, латунью и т. д.). Но это не устраняет его влияния, поскольку подобные вещества имеют $\mu \approx 1$ (как и воздух).

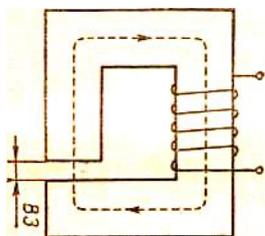


Рисунок 1.11 – Магнитная цепь с воздушным зазором (ВЗ)

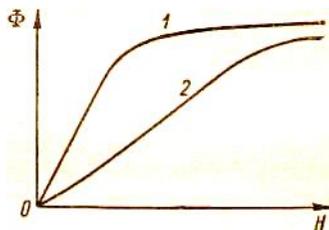


Рисунок 1.12 – Кривые намагничивания магнитопровода без зазора (1) и с зазором (2)

Как указывалось выше, в электромагнитах (за исключением поляризованных) для сердечников используют магнитомягкие

материалы. В простейшем случае используется мягкая отожженная сталь. Сердечники во многих электротехнических приборах и аппаратах делают из листовой электротехнической стали. Она представляет собой сплав стали с кремнием.

Широко применяются для сердечников различные железоникелевые сплавы, например *пермаллой*, у которого магнитная проницаемость имеет начальное значение 10000—20000 и максимальное — до нескольких сотен тысяч. Примерно такими же значениями μ характеризуется *альсифер* — сплав алюминия с кремнием и железом. Сердечники катушек, предназначенных для переменных токов высокой частоты, делаются из *магнитодиэлектриков*. Они получают прессованием порошка ферромагнитного материала, например карбонильного железа, пермаллоя, альсифера, с каким-либо изолирующим связывающим веществом (шеллак, полистирол и др.).

В последнее время очень широкое применение в радиоэлектронике получили магнитодиэлектрики, называемые *ферритами* (или *оксиферами*) и представляющие собой ферромагнитные полупроводники. Они являются керамическими материалами и изготовляются путем прессования и последующего обжига смеси порошкообразных окислов железа и окислов ряда других металлов (никеля, лития, цинка, марганца, магния). Многие типы ферритов обладают прямоугольной петлей гистерезиса.

К магнитомягким материалам относятся также некоторые сорта чугуна и стали, применяемые в качестве конструкционного материала для корпусов и крепежных деталей в электрических машинах, аппаратах и приборах. В некоторых случаях конструкционные детали, наоборот, не должны обладать магнитными свойствами и их выполняют из специальных немагнитных (или антимагнитных) чугунов и сталей, у которых магнитная проницаемость близка к единице.

Магнитомягкие материалы применяются также для защиты от действия магнитного поля, т. е. для изготовления *магнитных экранов*. Когда нужно какой-либо прибор защитить от внешнего магнитного поля, то этот прибор заключают в экран из магнитомягкого материала (рисунок 1.13, а). Подобный экран втягивает в себя магнитные силовые линии, которые проходят по экрану и почти не попадают в пространство внутри него. Поэтому внутри экрана поле получается весьма ослабленным.

Магнитный экран может также устранять влияние магнита или электромагнита на окружающие предметы. Для этого источник магнитного поля окружают магнитным экраном. Тогда магнитный поток проходит по экрану и почти не проникает во внешнее

пространство за пределами экрана (рисунок 1.13,б). Практически магнитные экраны часто делают из мягкой листовой стали.

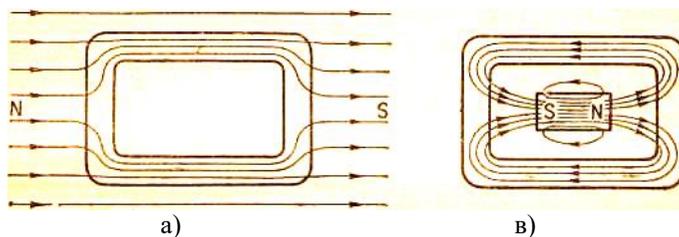


Рисунок 1.13 – Ферромагнитные экраны для защиты от магнитного поля

Постоянные магниты и электромагниты имеют широкое применение. Они являются основной составной частью большинства громкоговорителей и телефонов. Возникновение и исчезновение магнитного поля электромагнитов при замыкании и размыкании тока используется в электрических звонках, зуммерах и вибропреобразователях, которые периодически автоматически прерывают электрическую цепь. На подобном же принципе основана работа электромагнитных реле, служащих для включения и выключения электрических цепей.

Принцип устройства и действия реле поясняет следующий пример. Пусть нужно замкнуть электрическую цепь с сильным током, находясь на известном удалении от нее. Для этого применяется реле, схема включения которого показана на рисунке 1.14.

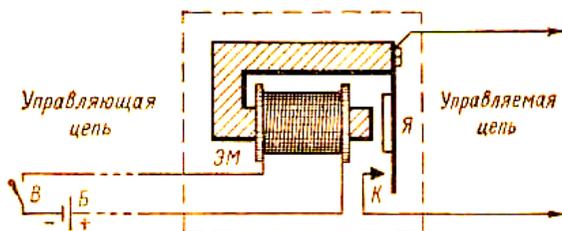


Рисунок 1.14 – Принцип устройства и схема включения электромагнитного реле

Цепь сильного тока (управляемая цепь) присоединена к якорю Я и к контакту К, а обмотка электромагнита ЭМ включена в

управляющую цепь, имеющую маломощный источник тока, например батарею Б, и выключатель В. Если замкнуть выключатель В, то электромагнит притянет якорь и управляемая цепь замкнется. При размыкании управляющей цепи якорь, укрепленный на пружине, отходит от контакта К, и управляемая цепь разрывается. Ток в управляющей цепи может быть малым. Поэтому батарея Б имеет низкое напряжение и провода этой цепи берутся тонкими. Подобное устройство выгоднее, нежели подводка толстых проводов высокого напряжения управляемой цепи к выключателю В.

Реле широко используются в радиоаппаратуре, автоматике и телемеханике, проводной связи, на электростанциях, в различном электрооборудовании. Электромагниты и постоянные магниты также применяются в электрических машинах, трансформаторах, электроизмерительных приборах и во многих других устройствах.

1.5 Проводник с током в магнитном поле

К важным электромагнитным явлениям относится взаимодействие магнитного поля с проводником, по которому идет ток. Такой проводник испытывает со стороны поля действие механической силы F , которая стремится двигать проводник под прямым углом к магнитным силовым линиям (рисунок 1.15).

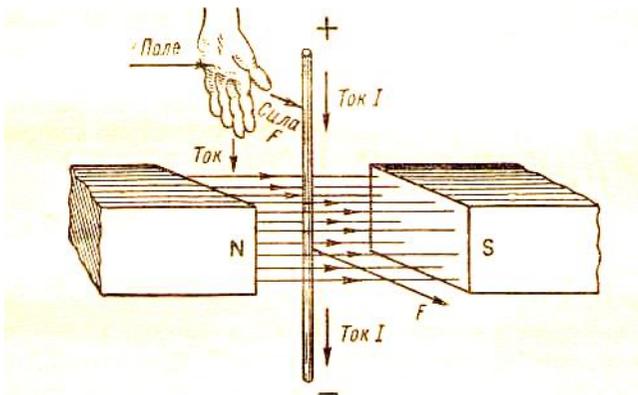


Рисунок 1.15 – Действие магнитного поля на проводник с током

Это объясняется тем, что основное магнитное поле взаимодействует с магнитным полем тока; в результате возникает

механическая сила подобно тому, как и при взаимодействии двух магнитов или двух катушек с током.

Сила F , действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле, тем больше, чем больше магнитная индукция B , ток I в проводнике и длина l той части проводника, которая находится в магнитном поле. Кроме того, сила будет наибольшей, когда проводник расположен перпендикулярно к магнитным силовым линиям. В этом случае сила (в ньютонах) определяется формулой

$$F_{max}=BIl, \quad (1.11)$$

в которой B выражена в теслах, l — в метрах, а I — в амперах.

Если проводник расположен вдоль силовых линий, то поле не оказывает на него механического действия. При расположении проводника под некоторым углом α к магнитным силовым линиям сила F меньше, чем F_{max} :

$$F = F_{max} \sin \alpha \quad - \quad (1.12)$$

Направление действия силы зависит от направления тока и магнитных силовых линий. Оно может быть определено по **правилу левой руки**, которое гласит: *если расположить левую руку так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь перпендикулярно к ней, а ток выходил из пальцев, то отогнутый в сторону большой палец покажет направление силы, действующей на проводник* (рисунок 1.15).

Это правило придумано для удобного определения направления действия силы. В действительности, конечно, нет никакой связи между электромагнитными явлениями и левой рукой человека.

Возникновение механической силы, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле, поясняет рисунок 1.16.

На нем изображен проводник с током в случае, когда ток идет в направлении от нас (крестик показывает хвост стрелки). Справа от проводника силовые линии основного магнитного поля и поля, создаваемого током, совпадают по направлению. Здесь поле стало сильнее. А слева от провода произошло ослабление поля вследствие того, что силовые линии поля тока и основного поля направлены навстречу друг другу. Учитывая боковой распор магнитных силовых линий и их стремление сократить свою длину, нетрудно убедиться в появлении механической силы, выталкивающей провод влево, что вполне совпадает с правилом левой руки.

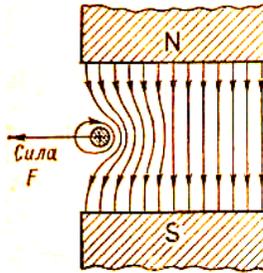


Рисунок 1.16 – Проводник с током в магнитном поле

Взаимодействие магнитных полей двух проводников с током также создает механическую силу. Когда направление токов одинаково (рисунок 1.17, а), провода притягиваются друг к другу. Это можно понять, если рассмотреть магнитное поле вокруг таких проводников и учесть стремление силовых линий сократить свою длину. Если же токи имеют противоположные направления, то провода испытывают силы взаимного отталкивания. Это объясняется боковым распором магнитных силовых линий в промежутке между проводами (рисунок 1.17,б).

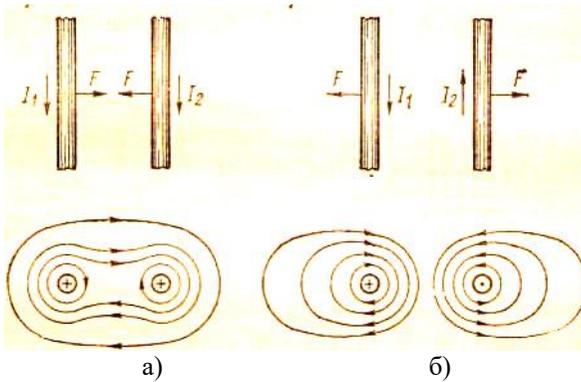


Рисунок 1.17 – Взаимодействие двух проводников с током

Сила взаимодействия между проводами тем больше, чем сильнее токи в проводах и чем меньше расстояние между ними, а также зависит от того, как расположены провода. Параллельные провода взаимодействуют с наибольшей силой F_{max} . Провода,

перекрещивающиеся под прямым углом, вообще не взаимодействуют. При каком-либо ином расположении проводов сила взаимодействия меньше F_{max} .

Движение проводников с током в магнитном поле магнита или электромагнита положено в основу устройства наиболее распространенных магнитоэлектрических измерительных приборов, электродвигателей и др. Работу электродвигателей можно также рассматривать как результат взаимодействия проводников с током.

1. 6 Электромагнитная индукция

1.6.1 Явление электромагнитной индукции

В предыдущем параграфе было установлено наличие связи между электрическим и магнитным полями. Тесная связь электрического тока с магнитным полем позволяет предположить, что с помощью магнитного поля можно создать в замкнутом проводнике электрический ток. Такую идею впервые выдвинул великий английский ученый М. Ф а р а д е й (1791—1867 гг.). Он в 1831 г. экспериментально установил, в каких случаях магнитное поле создает в замкнутом проводнике электрический ток.

Явление возникновения в замкнутом проводнике электрического тока, обусловленного изменением магнитного поля, получило название э л е к т р о м а г н и т н о й и н д у к ц и и , а возникающую при этом в проводнике электродвижущую силу стали называть э. д. с. и н д у к ц и и . Создаваемый этой э. д. с. ток называется и н д у к ц и о н н ы м (н а в е д е н н ы м) . Открытие явления электромагнитной индукции и его всестороннее исследование имело огромное значение для развития электротехники, так как оно лежит в основе принципа устройства индукционных генераторов, вырабатывающих электроэнергию для промышленности. Поэтому 1831 г. можно считать годом рождения электротехники.

1.6.2 Возникновение э. д. с. индукции при движении разомкнутого проводника в магнитном поле. Правило правой руки

Если неподвижное металлическое тело находится в постоянном магнитном поле, то на каждый свободный электрон тела действует магнитная сила. Ее направление зависит от направлений внешнего поля и скорости движения электрона, т. е. может быть определено по правилу *левой руки*. Так как свободные электроны в

металле движутся хаотически, то изменения их движения под влиянием магнитного поля оказываются самыми различными и никакой э. д. с. индукции в покоем проводнике возникнуть не может.

Иное положение создается, если незамкнутый проводник *А Б* движется в магнитном поле перпендикулярно его силовым линиям (рисунок 1.18). Вместе с проводником *А Б* в том же направлении перемещаются и находящиеся в нем свободные электроны. При этом возникают магнитные силы, которые смещают все свободные электроны внутри проводника по направлению к *А*.

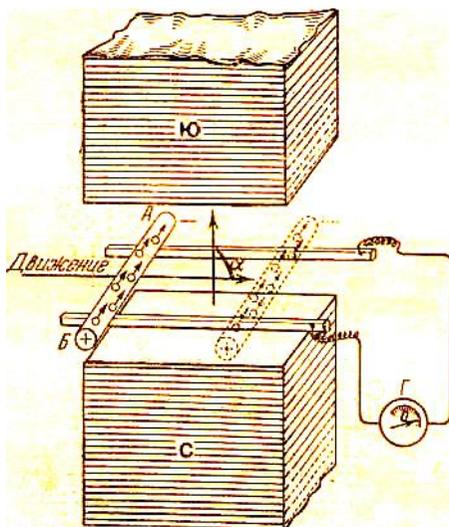


Рисунок 1.18 – Движение проводника *А Б* в магнитном поле вызывает перемещение свободных электронов в этом проводнике к концу *А*

Направление смещения электронов можно установить по правилу левой руки, учитывая, что четыре пальца должны указывать в сторону, обратную движению электронов (заряженных отрицательно) вместе с проводником, т. е. движению самого проводника. В результате смещения электронов конец проводника *Б* зарядится положительно, а конец *А* — отрицательно, так что между ними возникнет разность потенциалов. Если концы проводника *А Б* замкнуть каким-либо проводником, то в нем возбудится **индукционный ток**, который можно обнаружить по показанию

гальванометра Γ . Это означает, что в проводнике $АБ$ имеется э. д. с. *индукции*.

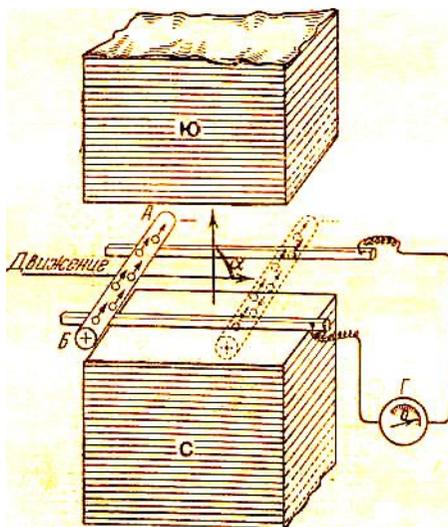


Рисунок 1.18 – Движение проводника $АБ$ в магнитном поле вызывает перемещение свободных электронов в этом проводнике к концу $А$

Сторонними силами, создающими э. д. с. индукции, здесь служат магнитные силы, действующие на свободные электроны проводника при его движении в магнитном поле.

Если проводник $АБ$ перемещать параллельно силовым линиям, например вертикально вверх, то магнитных сил это движение не вызовет и эдс индукции не возбудится.

Оказалось, что эдс индукции зависит от угла α между направлением магнитных силовых линий и направлением движения проводника (рисунок 1.18); эдс имеет наибольшую величину, когда этот угол составляет 90° . При отклонении угла α от этого значения э. д. с. индукции уменьшается.

Следовательно, когда разомкнутый проводник движется, пересекая магнитные силовые линии, т. е. так, что угол α отличен от 0 или 180° , то внутри проводника возникает эдс индукции. Направление тока, создаваемого этой эдс удобно определять по правилу правой руки: если правую руку положить вдоль проводника так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а отогнутый

большой палец указывал направление движение проводника, то вытянутые четыре пальца укажут направление тока, создаваемого эдс индукции (рисунок 1.19).

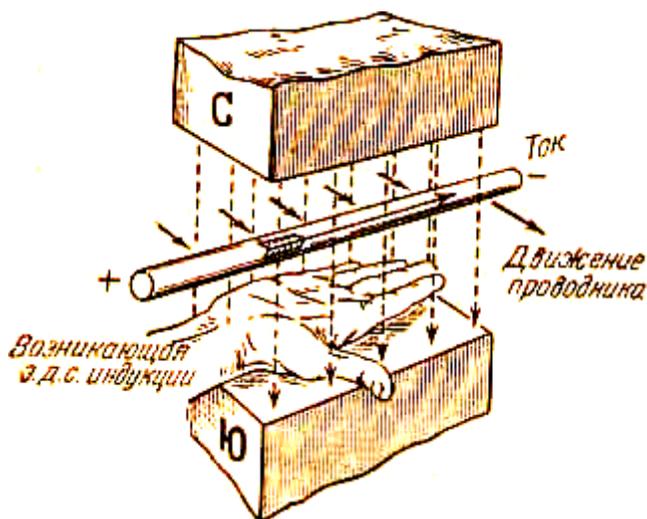


Рисунок 1.19 – Правило правой руки

Величина эдс индукции, возникающей в прямолинейном проводнике I , движущемся с постоянной скоростью v в однородном магнитном поле с индукцией B , прямо пропорциональна I , v , B и $\sin \alpha$:

$$e = B I v \sin \alpha \quad (1.13)$$

где α — угол между векторами v и B :

1.6.3 Опыты Фарадея

Фарадей с помощью простых опытов показал, что индукционный ток может возникать не только при пересечении проводником магнитных силовых линий. *Индукционный ток возникает во всех тех случаях, когда изменяется магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур из проводников.*

Первый опыт. Возьмем замкнутую цепь без источника электрической энергии, например соединенную с гальванометром

катушку. Если опускать в катушку магнит северным полюсом, одновременно наблюдая за стрелкой гальванометра, то обнаружим, что стрелка гальванометра отклоняется (рисунок 1.20, а). Это означает, что в катушке идет ток. Однако, если прекратить движение магнита, то ток в катушке исчезнет. Следовательно, катушка становится источником эдс только во время движения магнита.

Если вынимать магнит из катушки, в цепи снова пойдет ток (рисунок 1.20, б), но в обратном направлении. Перевернем магнит и будем опускать его в катушку южным полюсом (рисунок 1.20, в). Ток в ней будет иметь то же направление, что и в предыдущем случае. Наконец, если опять вынимать магнит, то снова можно обнаружить ток такого же направления, как в первом случае (рисунок 1.20, г).

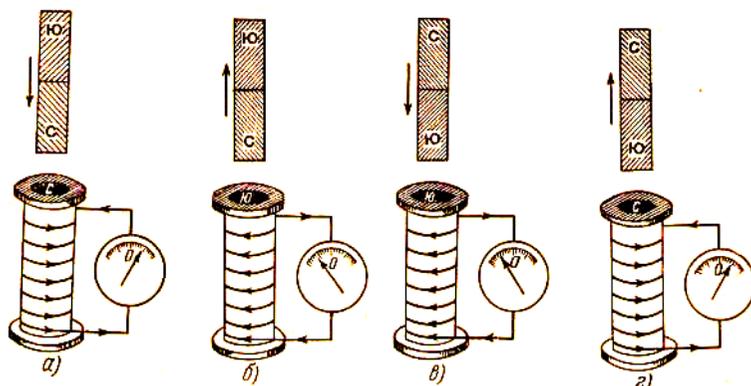


Рисунок 1.20 – При движении магнита относительно катушки в ней возникает индукционный ток, создающий свое магнитное поле, полюсы которого указаны в отверстии катушки

Из этого опыта можно сделать вывод, что индукционный ток появляется только при перемещении магнита относительно катушки. Индукционный ток возникает и тогда, когда магнит неподвижен, а перемещается катушка. Кроме того, направление тока, очевидно, связано с направлением движения магнита и с направлением силовых линий.

Второй опыт. Вместо магнита будем опускать в катушку **Б** другую катушку **А** с постоянным током, представляющую собой электромагнит (рисунок 1.21). Как и в предыдущем опыте, индукционный ток возникает в этом случае только при относительном перемещении катушек, причем направление тока

зависит от того, удаляется или приближается одна катушка к другой, а также от направления тока в катушке *A* (т. е. от направления ее магнитного поля).

Третий опыт. Вставим катушку *A* в катушку *B* и на протяжении опыта оставим их неподвижными, но в цепь катушки *A* введем реостат *R* и ключ *K* (рисунок 1.22).

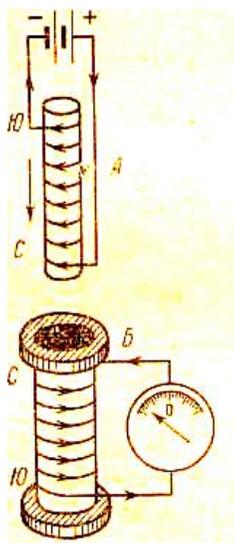


Рисунок 1.21 – При движении катушек *A* и *B* относительно друг друга в катушке *B* возникает индукционный ток

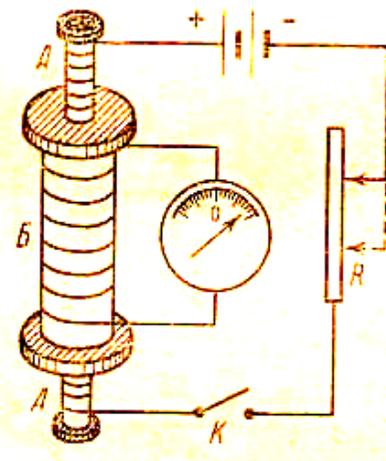


Рисунок 1.22 – При замыкании и размыкании ключом *K* цепи катушки *A* или при изменении ее сопротивления *R* в катушке *B* появляется индукционный ток

При размыкании и замыкании цепи катушки *A* ключом *K* в катушке *B* возникает индукционный ток. При усилении или ослаблении тока в катушке *A* (путем изменения сопротивления реостата *R*) в катушке *B* также появляется индукционный ток.

В дальнейшем катушку *A*, соединенную с источником электрической энергии, будем называть **первичной**, а катушку *B*, в которой под действием магнитного поля первичной катушки возникает индукционный ток, — **вторичной**.

Четвертый опыт. Включим первичную катушку в цепь переменного тока, а вторичную соединим с электрической лампочкой

(рисунок 1.23). Лампочка будет гореть все время, пока в первичной катушке идет переменный ток. Это означает, что *переменный ток всегда создает индукционный ток во вторичной катушке*.

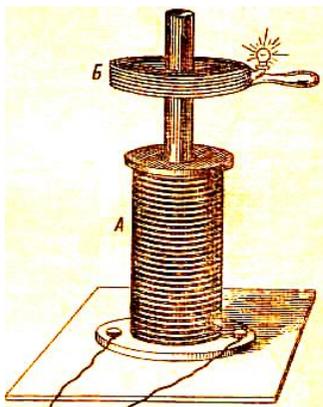


Рисунок 1. 23 – При питании первичной катушки *A* переменным током во вторичной катушке *B* появляется индукционный ток; лампочка при этом загорается

Таким образом, индукционный ток возникает в замкнутом проводнике в следующих случаях:

- 1) при перемещении проводника относительно магнита;
- 2) при перемещении проводника относительно второго проводника с током;
- 3) при замыкании или размыкании цепи первичного проводника и при изменении тока в нем.

Так как общим для всех рассмотренных случаев является изменение магнитного поля, то можно заключить, что *индукционный ток в замкнутом проводнике возникает только при изменении магнитного поля, в котором находится проводник*.

Однако индукционный ток возникает в замкнутом проводнике не при всяком изменении магнитного поля. Чтобы доказать это, сделаем следующий опыт. Поместим в поле магнита рамку из провода (рисунок 1.24, а), соединенную с гальванометром *Г*, так, чтобы силовые линии магнитного поля проходили вдоль ее плоскости. Оказывается, что при перемещении рамки вдоль плоскости рисунка стрелка гальванометра не отклоняется. Следовательно, в данном случае индукционный ток в замкнутом проводнике не возникает, хотя

он и перемещается в магнитном поле. Но если ту же рамку поворачивать вокруг оси OO' (рисунок 1.24, б), то в рамке возбуждается индукционный ток.

На основании подобных опытов было установлено следующее: индукционный ток возникает в замкнутом проводнике только при изменении магнитного потока, проходящего через площадь, охватываемую этим проводником.

Вспомним, что без эдс не может быть тока. Следовательно, *меняющийся магнитный поток создает в замкнутом проводнике эдс индукции, которая в свою очередь возбуждает индукционный ток.*

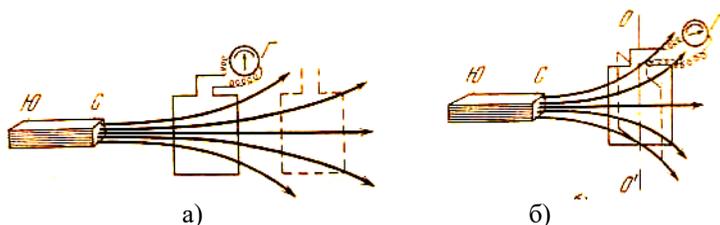


Рисунок 1. 24 – а) При движении рамки магнитный поток, пронизывающий охваченную рамкой площадь, не изменяется, так как силовые линии идут в плоскости рамки, и тока в ней нет;
б) При повороте рамки вокруг оси OO' магнитный поток внутри рамки возрастает, и в ней возникает ток

1.6. 4 Закон Ленца для электромагнитной индукции

В предыдущем параграфе отмечалось, что направление индукционного тока может быть различным. Связь между индуцирующим магнитным полем и направлением э. д. с. индукции впервые исследовал русский ученый Э. Х. Ленц (1804—1865 гг.).

Индукционный ток создает собственное магнитное поле. Поэтому у катушек, изображенных на рисунке 1.20, возникают магнитные полюсы, расположение которых можно определить непосредственно из опыта. Поле движущегося магнита и поле катушки взаимодействуют между собой. Анализ этого взаимодействия показывает, что во всех четырех положениях магнитное поле индукционного тока препятствует движению магнита, т. е. причине, вызывающей ток в катушке. Эту закономерность и установил Ленц. Разберем для примера положение, показанное на рисунке 1.20, а.

Магнит вводится в катушку северным полюсом. Возникающий при этом индукционный ток создает на верхнем конце катушки тоже северный полюс, так что ток своим магнитным полем отталкивает магнит, т. е. препятствует его движению.

Следовательно, **закон Ленца** можно сформулировать так: *эДС индукции вызывает в замкнутом проводнике такой индукционный ток, который своим магнитным полем противодействует причине, возбуждающей эДС.*

При использовании закона Ленца для определения направления индукционного тока следует:

- 1) отыскать причину, вызывающую индукционный ток;
- 2) определить направление магнитного поля индукционного тока, считая, что оно должно препятствовать действию этой причины;
- 3) по направлению магнитного поля индукционного тока найти направление самого индукционного тока.

Рассмотрим два примера.

1. Из катушки, замкнутой через гальванометр, вынимается магнит, как показано на рисунке 1.20,г. Выясним, в каком направлении течет индукционный ток в катушке.

Магнитный полюс катушки со стороны магнита должен быть разноименным с полюсом самого магнита, так как индукционный ток, мешая движению магнита, должен втягивать его в катушку. Следовательно, индукционный ток, если смотреть на отверстие катушки со стороны магнита, должен быть направлен против часовой стрелки.

2. Определим направление индукционного тока, возникающего во вторичной катушке при изменении величины тока в первичной (рисунок 1.22). Рассмотрим момент замыкания цепи первичной катушки.

Индукционный ток во вторичной катушке вызывается нарастающим магнитным полем первичной катушки, поэтому магнитные линии индукционного тока должны быть направлены противоположно линиям поля первичной катушки, препятствуя нарастанию поля. Таким образом, *индукционный ток во вторичной катушке будет направлен противоположно току в первичной катушке.* То же будет наблюдаться при усилении тока в первичной катушке.

При размыкании цепи первичной катушки индукционный ток, мешая исчезновению магнитного поля первичной катушки, должен создавать магнитное поле того же направления, как у исчезающего поля, поэтому и сам должен течь в том же направлении, что и ток в первичной катушке.

Если попеременно замыкать и размыкать цепь первичной катушки, то индукционный ток во вторичной катушке будет переменным. Если первичную катушку питать переменным током, то индукционный ток во вторичной катушке будет также переменным (рисунок 1.23).

На основании закона Ленца можно объяснить явление *диамагнетизма*. При внесении вещества в магнитное поле в молекулах вещества возникают индукционные токи. Эти токи создают свое магнитное поле, которое направлено навстречу внешнему полю; поэтому поле внутри вещества ослабляется. Это явление возникает во всех веществах. Но если у частиц вещества имеется еще и природный магнитный момент, то они располагаются таким образом, что их магнитные моменты поворачиваются по направлению внешнего поля и этим усиливают его.

Следовательно, при внесении такого вещества во внешнее магнитное поле возникают два эффекта: *магнитные моменты частиц вещества усиливают внешнее поле, а индукционный эффект ослабляет его. Если первый эффект более значителен, то вещество парамагнитно, в противоположном же случае вещество диамагнитно.* В частности, диамагнетиками являются все вещества, частицы которых не имеют собственного магнитного момента. Явление диамагнетизма было объяснено французским физиком П. Ланжевеном (1872—1946 гг.).

Закон Ленца представляет собой следствие закона сохранения энергии. В самом деле, представим себе, что в опыте, изображенном на рисунке 1.20, магнит вводится в катушку и вынимается из нее при разомкнутой цепи. При этом движении магнита выполняется некоторая работа. Пусть теперь то же движение магнита повторяется при замкнутой цепи катушки. Работа, совершенная в этом случае, больше, чем в первом, так как теперь вокруг катушки образуется магнитное поле индукционного тока, мешающее движению магнита. За счет дополнительной работы, затраченной во втором случае, и создается электрическая энергия индукционного тока.

Таким образом, из закона Ленца следует, что *энергия индукционного тока получается за счет энергии, затрачиваемой на преодоление противодействия магнитного поля индукционного тока.*

С помощью электромагнитной индукции можно превращать механическую энергию в электрическую или передавать электрическую энергию из одной цепи в другую. Если индукционный ток создается каким-либо механическим движением, то электрическая энергия получается за счет механической энергии. Если же индукционный ток создается другим током, когда оба проводника на-

ходятся в покое относительно друг друга, то электрическая энергия передается из одной замкнутой цепи в другую. В технике широко используется и то и другое явление.

Закон Ленца имеет глубокий физический смысл. Индуцированный ток возникает в результате затраты энергии, например механической. Но расход энергии представляет собой работу, а работа не может совершаться без преодоления сил сопротивления. Такое сопротивление или противодействие именно и создает своим магнитным полем индуцированный ток.

Для одного витка проволоки индуцированная ЭДС зависит только от скорости изменения магнитного потока внутри витка, т. е. от числа пересечений провода магнитными силовыми линиями в одну секунду. Увеличение числа этих пересечений вызывает соответствующее возрастание ЭДС. Если магнитный поток изменяется в обмотке, имеющей несколько витков, то в каждом витке возникает ЭДС. Все витки соединены последовательно, и поэтому общая ЭДС равна сумме ЭДС отдельных витков, т. е. тем больше, чем больше число витков. Например, если обмотка имеет 50 витков, а скорость изменения магнитного потока такова, что в одном витке индуцируется ЭДС, равная 0,1 В, то полная ЭДС составит 5 В.

Итак, *чем быстрее изменяется магнитный поток в обмотке и чем больше в ней витков, тем больше индуцированная ЭДС.*

Индуцированная ЭДС, возникающая в одном витке провода, определяется по формуле

$$e = - \Delta\Phi / \Delta t, \quad (1.13)$$

где e — ЭДС, В;

$\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока, Вб;

Δt — промежуток времени в секундах, в течение которого произошло изменение магнитного потока $\Delta\Phi$.

Для катушки, имеющей число витков w , значение e соответственно увеличивается в w раз:

$$e = - w \Delta\Phi / \Delta t. \quad (1.14)$$

Иногда индуцированная ЭДС получается при движении прямолинейного проводника в однородном магнитном поле. Тогда наибольшее значение ЭДС e_{max} получается при расположении проводника перпендикулярно силовым линиям и его движении под прямым углом к силовым линиям. Эта ЭДС (в вольтах) равна

$$e_{max} = Bvl. \quad (1.15)$$

где B — магнитная индукция, Тл;

v — скорость движения, м/с;

l — длина той части провода, которая находится в магнитном поле, м.

Если провод расположен вдоль силовых линий или движется вдоль них, то ЭДС индукции не возникает. Когда провод расположен под острым углом относительно силовых линий или движется не перпендикулярно к ним, ЭДС получается меньше, чем e_{max} .

Следует отметить, что на основе явления электромагнитной индукции определяется единица магнитного потока вебер. Если в одном витке провода магнитный поток изменяется на один вебер в секунду, то возникает индуцированная ЭДС, равная одному вольту.

1.6.5 Вихревые токи

Включим мощный электромагнит с выступающим сердечником в цепь переменного тока. Вокруг магнита образуется переменное магнитное поле. Поместим в это поле какой-либо металлический предмет, положив его на сердечник. Спустя некоторое время этот предмет нагреется. Убрав предмет, наденем на выступающий конец сердечника алюминиевое кольцо K . (рисунок 1.25). Если его не удерживать, то оно соскакивает с сердечника. Если же задержать кольцо рукой, то оно нагревается столь сильно, что обжигает пальцы.

Чем объяснить эти явления? Кольцо или предмет находится в переменном магнитном поле электромагнита, а поскольку каждый из них можно рассматривать как замкнутую цепь, в них должен идти индукционный ток; этот ток циркулирует по окружности кольца или по замкнутым линиям внутри сплошного металлического предмета.

Энергия индукционного тока целиком превращается во внутреннюю энергию теплового движения частиц предмета или кольца, что и вызывает их нагревание.

Соскакивает с сердечника кольцо потому, что индукционный ток в кольце в каждый момент времени направлен противоположно току в обмотке электромагнита, а такие токи отталкиваются друг от друга.

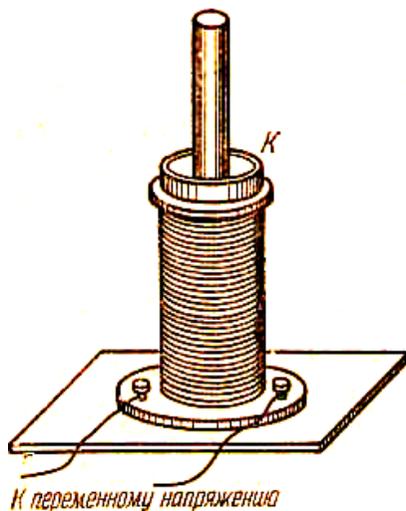


Рисунок 1. 25 – Надетое на сердечник кольцо K соскакивает с сердечника при включении катушки в цепь переменного тока, а если его удерживать, то оно нагревается вихревыми токами

Индукционные токи, возникающие в сплошном металлическом предмете, находящемся в переменном магнитном поле, и замыкающиеся внутри этого предмета, называются вихревыми токами или токами Фуко.

На практике вихревые токи получаются, например, в барабане якоря электродвигателя и в сердечнике трансформатора. В этих случаях вихревые токи приносят вред, так как, во-первых, энергия вихревых токов получается за счет энергии тока, питающего электродвигатель или трансформатор, что снижает их КПД, а во-вторых, эти токи сильно нагревают якорь и сердечник трансформатора и могут вывести их из строя.

Для устранения вредного действия вихревых токов металлические предметы, которые должны находиться в переменном магнитном поле (например, сердечник электромагнита, питаемого переменным током), изготавливают из отдельных листов или стержней, изолированных друг от друга с помощью лакового покрытия или каким-либо другим способом (рисунок 1.26).

В каждом отдельном листе вихревые токи оказываются во много раз слабее, чем в сплошном предмете. Чем тоньше лист, тем меньше площадь сечения, по которой циркулирует ток, а так как при

этом увеличивается сопротивление, то вихревые токи в тонких листах ослабевают. Их вредное действие при этом становится столь незначительным, что почти не имеет практического значения.

Чем больше удельное сопротивление материала, находящегося в переменном магнитном поле, тем меньше потери энергии, обусловленные вихревыми токами в этом материале. Вообще говоря, потери энергии в периодически перемагничиваемом ферромагнетике вызываются двумя причинами: явлением гистерезиса и возникновением вихревых токов.

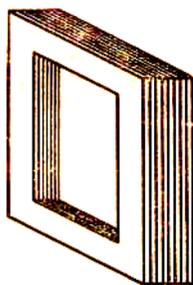


Рисунок 1.26 – Так как при работе трансформатора в сердечнике изменяется магнитное поле, то для ослабления вихревых токов сердечник трансформатора делают из отдельных изолированных друг от друга листов трансформаторной стали

У ферритов потери энергии, обусловленные гистерезисом, ничтожны. Оказывается, что после специальной термической обработки ферриты приобретают большое удельное сопротивление (от 1 до 10^5 ом·м), что значительно уменьшает потери энергии в них и на вихревые токи. Таким образом, применение ферритов в различного рода приборах значительно повышает КПД последних.

Вихревые токи могут возникать и в проводах при прохождении по ним переменного тока. В центре провода вихревые токи направлены навстречу основному току, а снаружи — в сторону основного тока; поэтому плотность тока в поперечном сечении провода больше по краям и уменьшается к центру провода. Чем быстрее меняется магнитное поле, тем значительнее вихревые токи и тем заметнее это явление. *При большой частоте весь ток практически идет по внешней поверхности проводника.* Такое явление называется **скин-эффектом** (от английского слова «скин» — кожа).

Для подобных токов иногда применяют провода в виде полых медных трубок.

Вихревые токи могут возникать также в металлическом теле при его движении в постоянном магнитном поле. В этом случае, согласно закону Ленца, они должны препятствовать движению, т. е. тормозить тело.

Подвесим между полюсами электромагнита M , питаемого постоянным током (рисунок 1.27), алюминиевую или медную (не стальную!) пластинку P в виде маятника. Приведем эту пластинку в колебательное движение при отсутствии тока в электромагните и отметим число ее качаний за небольшой промежуток времени. Повторив тот же опыт при включенном электромагните, мы увидим, что колебания пластинки почти сразу прекращаются. Объясняется это тем, что во втором опыте пластинка движется в магнитном поле электромагнита и возникающие в ней *вихревые токи тормозят ее движение*.

Тормозящее действие вихревых токов применяется в измерительных приборах для ослабления колебаний стрелок (рисунок 1.28).

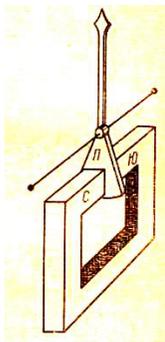


Рисунок 1.28 – Схема устройства электромагнитного успокоителя

Если прикрепить к нижнему концу стрелки (указателя) измерительного прибора небольшую металлическую пластинку Π так, чтобы она находилась между полюсами магнита, то вихревые токи, возникающие в пластинке при колебаниях стрелки, быстро прекращают эти колебания.

В электроизмерительных приборах для постоянного тока нужды в такой пластинке нет, так как подвижная катушка прибора наматывается на алюминиевый каркас, в котором циркулируют вихревые токи, способствующие успокоению колебаний указателя прибора. Аналогичное устройство имеется и в электрическом счетчике. Диск электросчетчика вращается между полюсами магнита; возникающие в нем вихревые токи тормозят его движение, не давая ему вращаться по инерции. В настоящее время вихревые токи используются в промышленности для закалки металлических изделий и для плавления металлов.

1.6.6 Явление самоиндукции при замыкании цепи

Соберем электрическую цепь (рисунок 1.29), в которую включены последовательно батарея *Б*, ключ *К*, лампочка *Л* и катушка с сердечником *М*. При замыкании цепи можно заметить, что лампочка загорается в полную силу не сразу, а с некоторым запозданием. Чем это объяснить?

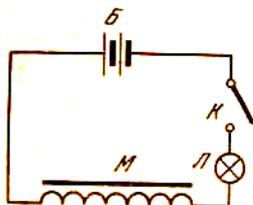


Рисунок 1.29 – Электродвижущая сила самоиндукции замедляет увеличение тока в лампочке в момент замыкания цепи

Возникающий в момент замыкания цепи ток создает нарастающее магнитное поле, особенно сильное вокруг электромагнита. При этом в обмотке электромагнита наводится эдс индукции, которая направлена навстречу эдс батареи и препятствует росту тока в лампочке. Здесь следует обратить внимание на то, что катушка служит источником эдс только до тех пор, пока магнитное поле в ней переменное, т. е. пока растет ток от батареи.

Возникающая при замыкании цепи эдс индукции замедляет нарастание тока батареи, она служит в этом случае своего рода

тормозом, который изменяет время нарастания тока в цепи и перестает действовать при установлении постоянного режима в цепи. График зависимости тока от времени после замыкания цепи показан на рисунке 1.30.

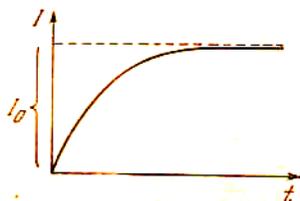


Рисунок 1.30 – График возрастания тока в цепи рисунок 1.29 после ее замыкания

Явление, при котором переменное магнитное поле, созданное током в какой-либо цепи, возбуждает эдс индукции в той же самой цепи, называется самоиндукцией, а возникающая электродвижущая сила называется э. д. с. самоиндукции.

Электродвижущую силу самоиндукции, как и всякую эдс индукции, можно найти по формуле $e = - \Delta \psi / \Delta t$, подразумевая под $\Delta \psi$ изменение собственного потокосцепления той цепи, в которой создается эдс. Включенный в цепь генератор (в нашем примере батарея **Б**) во время нарастания тока преодолевает противодействие эдс самоиндукции, затрачивая на это часть своей энергии. Одновременно магнитное поле вокруг электрической цепи делается все сильнее, т. е. растет потокосцепление магнитного поля с цепью. В этом магнитном поле и накапливается энергия, затраченная генератором на преодоление противодействия эдс самоиндукции.

Энергия магнитного поля цепи остается неизменной, пока в цепи идет постоянный ток.

Она зависит не только от силы тока в цепи, но и от характера самой цепи. При одинаковом токе энергия магнитного поля плоского контура значительно меньше, чем провода, свитого в катушку (в которой имеется большее потокосцепление). Особенно большую величину может иметь энергия магнитного поля сильных электромагнитов.

1.6.7 Явление самоиндукции при размыкании цепи

При размыкании цепи постоянного тока запасенная в магнитном поле этой цепи энергия превращается в энергию тока самоиндукции. Возникающий при размыкании цепи ток самоиндукции можно обнаружить с помощью следующего опыта. Составим замкнутую цепь из батареи B и параллельно соединенных катушки с сердечником M и лампочки L (рисунок 1.31).

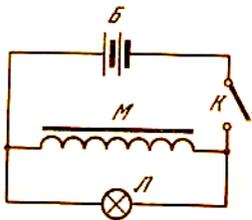


Рисунок 1.31 – При размыкании цепи ключом K лампочка сначала ярко вспыхивает, а затем гаснет

В момент размыкания цепи ключом K батарея B перестанет давать ток, однако лампочка L гаснет не сразу. Исчезающее магнитное поле катушки M делает катушку на короткое время источником эдс, создающим в ней ток прежнего направления.

Магнитное поле вокруг катушки исчезает очень быстро, поэтому эдс самоиндукции, возникающая хотя и на короткое время, может достичь очень большой величины, в несколько раз превышающей эдс того генератора, который питал цепь до ее размыкания. Чтобы убедиться в этом, включим в цепь, изображенную на рисунке 1.31, лампочку L , которая не будет гореть при замкнутой цепи (например, если эдс батареи 1,6 В, а лампочка рассчитана на напряжение 12 В). При размыкании цепи ключом K лампочка ярко вспыхивает и может даже перегореть. Это происходит потому, что цепь, составленная катушкой и лампочкой, остается замкнутой, а эдс самоиндукции в ней превышает 12 В.

Ток самоиндукции, возникающий в цепи в момент ее размыкания, называется *экстраток*ом размыкания. Его графическая зависимость от времени изображена на рисунке 1.32. Так как напряжение на катушке в момент размыкания цепи резко возрастает (возникает большая эдс самоиндукции), то ток в лампочке меняет

направление и скачком возрастает до величины тока в катушке, а затем падает в соответствии с графиком.

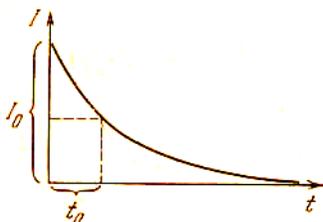


Рисунок 1.32 – График спадающего тока в катушке M (рисунок 1.31) после размыкания цепи ключом K

Вследствие явления самоиндукции размыкание электрической цепи всегда сопровождается искрой, возникающей в месте разрыва цепи. Искра появляется потому, что в момент разрыва цепи между концами разомкнутых проводов возникает большое напряжение, так как общая эдс, действующая в этот момент в цепи, равна сумме эдс самоиндукции и эдс генератора, питающего цепь.

В зависимости от количества запасенной в цепи магнитной энергии мощность тока размыкания может быть различной. При большой мощности тока между разорванными концами цепи возникает дуговой разряд, который может расплавить контакты рубильника. При размыкании электрических цепей, по которым течет ток очень большой мощности, возникает электрическая дуга длиной в метр и больше. При небольшой мощности тока размыкания возникает искра, под действием которой рубильники покрываются окалиной. На электростанциях для ослабления вредного действия дуги применяют рубильники, смонтированные в баках с маслом («масляные выключатели»), а также применяется ряд других мер предосторожности.

Контрольные вопросы

1. Как влияет число витков катушки и сила тока в ней на магнитное поле?
2. Какое магнитное поле называют однородным?
3. Какие величины характеризуют силу магнитного поля?
4. Какая величина характеризует магнитные свойства среды?

5. Чему равна магнитная постоянная?
6. Какую цепь называют магнитной?
7. Какую кривую называют петлей гистерезиса?
8. Какую силу называют коэрцитивной силой?
9. В чем отличие магнитомягких материалов от магнитотвердых материалов?
10. Какой ток называют индуцированным током?
11. По какому правилу определяется направление индуцированной ЭДС?

Тема 2 Расчет магнитных цепей

В практике возбуждаемое током магнитное поле создается обычно так, чтобы большая часть магнитных силовых линий сосредоточивалась в известном ограниченном пространстве вдоль замкнутого пути. Устройство, представляющее собой путь, по которому замыкаются магнитные силовые линии, называется **магнитной цепью**. Сердечник, на котором размещены катушки с током, выполняется обычно из ферромагнитных материалов, магнитное сопротивление которых много меньше магнитного сопротивления воздуха (так как ферромагнитные материалы обладают магнитной проницаемостью $\mu \gg \mu_0$). Поэтому основная доля магнитного потока проходит по пути, определяемому магнитным сердечником. Доля потока, замыкающаяся по воздуху помимо сердечника, называется потоком рассеяния и обозначается Φ_s . Поток Φ_s обычно настолько меньше основного потока, что им можно пренебречь. Форма силовых линий практически определяется формой сердечника.

Сложная магнитная цепь может состоять из различных по сечению и материалу участков.

При расчете магнитной цепи встречается *два вида задач*:

определение намагничивающего тока по заданной магнитной индукции или потоку (*прямая задача*) и определение магнитного потока по заданному току (*обратная задача*). В обеих задачах должны быть заданы геометрические размеры всех участков цепи, их материал (а следовательно, и кривые намагничивания, причем гистерезисом обычно пренебрегают) и число витков катушек.

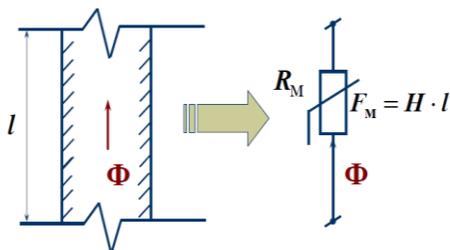
Так как магнитная проницаемость ферромагнитных материалов $\mu = f(B) \neq const$, то зависимость магнитного потока от тока оказывается нелинейной, поэтому магнитная цепь рассчитывается *графоаналитическими методами*, принятыми для расчета нелинейных цепей.

При этом следует иметь в виду, что между *электрической* и *магнитной* цепями существует вполне определенная аналогия (правда, не физическая, а только математическая), известная из курса физики: магнитный поток аналогичен току, намагничивающая сила — напряжению или эдс и запись основных законов магнитной цепи подобна записи соответствующих законов цепи электрической (таблица 2.1).

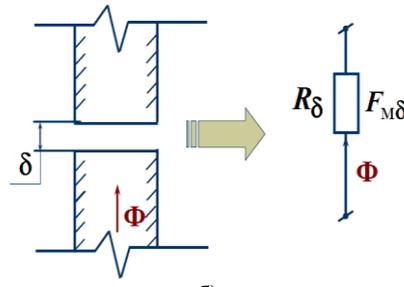
Таблица 2.1 – Аналогия между электрической и магнитной цепью

Электрическая цепь			Магнитная цепь		
Величина	Единица измерения	Формула	Величина	Единица измерения	Формула
E	В	$E=IR$ $\sum E=\sum IR$	F	А	$F=Iw$ $\sum F=\sum HI$
U	В	$U=IR$	U_M	А	$U_M=HI$
I	А	$I=U/R$	Φ	Вб	$\Phi=U_M/R_M$ $\Phi=BS$
R	Ом	$R=U/I$	R_M	1/Гн	$R_M=U_M/\Phi$ $R_M=l/(\mu\mu_0 S)$

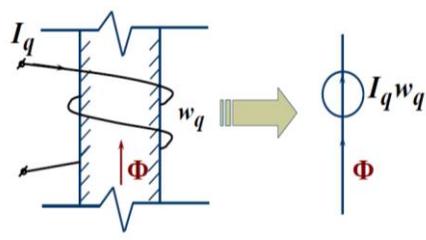
Поэтому и методика расчета магнитной цепи подобна методике расчета нелинейных электрических цепей с применением различных методов расчета. Приведенная аналогия позволяет заменить магнитную цепь аналогичной схемой, где магнитные участки цепи заменяются нелинейными сопротивлениями (рисунок 2.1, а), воздушный зазор линейным сопротивлением (рисунок 2.1, б), а мдс (по аналогии) условным обозначением эдс (рисунок 2.1, в). Такая замена более удобная для расчета магнитной цепи (рисунок 2.2).



а)

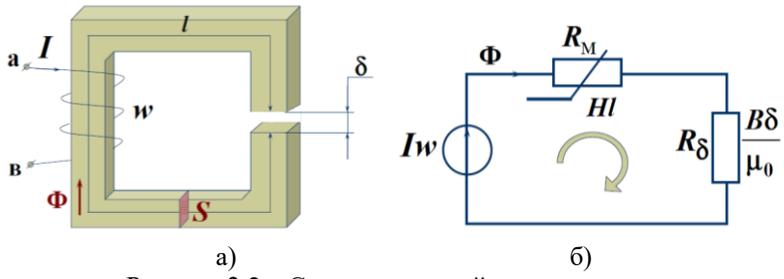


б)



с)

Рисунок 2.1 – Схемы замещения магнитной цепи



а)

б)

Рисунок 2.2 – Схема магнитной цепи и ее аналог

Применительно к разветвленным магнитным цепям используют понятия ветвь и узел.

2.1 Основные законы для магнитной цепи

Примером магнитных цепей являются сердечники трансформаторов, магнитных усилителей, электрических машин и т. д. (рисунок 2.3). Задача расчета магнитной цепи сводится к определению

намагничивающей силы (мдс) катушки или системы катушек, необходимой для создания заданного магнитного потока.

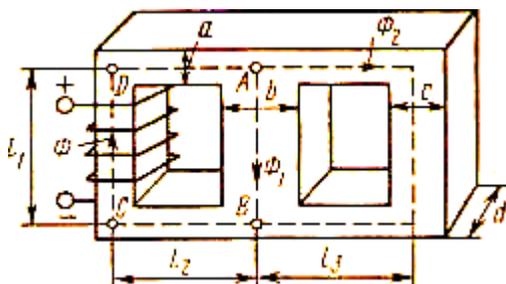


Рисунок 2.3 – Схема магнитной цепи

Часто встречается и обратная задача, когда по заданной намагничивающей силе необходимо определить магнитные потоки. Расчет магнитной цепи производят с помощью **законов для магнитных цепей**. Рассмотрим эти законы.

Первый закон Кирхгофа.

За счет тока, протекающего через катушку, показанную на рисунке 2.2, возникает магнитное поле и в левом стержне создается магнитный поток Φ . Этот поток в точке A сердечника разветвляется на потоки Φ_1 и Φ_2 . Так как силовые линии магнитного поля непрерывны и замкнуты, должно выполняться соотношение

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \text{ или } \Phi - \Phi_1 - \Phi_2 = 0. \quad (2.1)$$

Следовательно, алгебраическая сумма магнитных потоков для любого узла магнитной цепи равна нулю.

Это уравнение выражает **первый закон Кирхгофа** для магнитной цепи.

Второй закон Кирхгофа.

Применим закон полного тока к контуру ABCD (рисунок 2.2). Полный ток, проходящий через поверхность, ограниченную этим контуром, $\sum I = Iw$. Намагничивающая сила вдоль этого контура

$$F = H(l_1 + 2l_2) + Hl_1 \quad (2.2)$$

где H —напряженность магнитного поля на участке BCDA, в пределах которого оно однородно, так как магнитный поток Φ и

площадь поперечного сечения сердечника S на этом участке неизменны;

H_1 — напряженность магнитного поля на участке АВ.

На основании закона полного тока

$$Iw = H(l_1 + 2l_2) + HI_1 \quad (2.3)$$

т. е. для данного контура намагничивающая сила катушки равна сумме магнитных напряжений на отдельных участках. Если имеется не одна, а несколько катушек и во всех стержнях напряженность поля различна, то уравнение приобретает вид

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 + \dots + I_n w_n = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \dots + H_m l_m \quad (2.4)$$

Таким образом, *алгебраическая сумма намагничивающих сил для любого замкнутого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений на отдельных его участках.*

Это определение является **вторым законом Кирхгофа** для магнитной цепи. Знак намагничивающей силы катушки определяют по правилу буравчика, а знак магнитного напряжения — по направлению напряженности поля; если направление напряженности совпадает с выбранным направлением обхода контура, то магнитное напряжение берут со знаком плюс, и наоборот.

Закон Ома.

Магнитное напряжение на данном участке цепи $U_M = HI$. Если учесть, что $H = B/(\mu\mu_0)$, $B = \Phi/S$, то $U_M = \Phi l / (\mu \mu_0 S)$, $\Phi = U_M / (l \mu \mu_0 S)$.

Введем обозначение

$$R_M = l / (\mu \mu_0 S) \quad (2.5)$$

где R_M — магнитное сопротивление участка цепи.

Тогда окончательное выражение **закона Ома** для участка магнитной цепи примет вид

$$\Phi = U_M / R_M \quad (2.6)$$

Магнитный поток для участка цепи прямо пропорционален магнитному напряжению на этом участке.

Из выражения для R_M следует, что магнитное сопротивление ферромагнитных материалов мало. Необходимо отметить, что закон Ома справедлив только для линейных участков магнитной цепи.

2.2 Магнитные цепи с постоянным магнитным потоком

Магнитные свойства материалов, используемых для построения магнитной цепи, принято характеризовать зависимостью магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H .

Для диа- и парамагнитных материалов эта зависимость практически линейна

$$B \approx \mu_0 H, \quad (2.7)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Для ферромагнитных материалов зависимость $B=f(H)$ сложна, нелинейна и многозначна из-за присущих им явлений гистерезиса и насыщения. Абсолютная магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{B}{H} = f(H) \quad (2.8)$$

и в области сравнительно слабых магнитных полей во много раз больше μ_0 . В справочниках обычно приводится однозначная зависимость — основная кривая намагничивания, определяемая как геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель.

Магнитный поток в цепи постояен, если он образуется либо за счет введения в цепь постоянных магнитов, либо за счет использования в ней обмоток, обтекаемых постоянным током. При расчете таких цепей широко пользуются следующими допущениями:

- 1) для магнитомягких (с узкой гистерезисной петлей) материалов явление гистерезиса не учитывается и в расчете используется основная кривая намагничивания; что касается постоянных магнитов, изготавливаемых из магнитотвердых материалов (с широкой петлей гистерезиса), то для них расчетной является кривая размагничивания — нисходящая ветвь предельного гистерезисного цикла;
- 2) предполагается, что при наличии сердечника из ферромагнитного материала весь поток замыкается по сердечнику, т. е. не учитываются потоки рассеяния;
- 3) магнитная цепь разбивается на участки (в узком смысле этого слова: части цепи, выполненные из однородного материала, имеющие одинаковое сечение по всей длине, по которым проходит один и тот же поток) и при этом предполагается, что а) на участке магнитной цепи магнитная индукция одинакова во всех точках поперечного сечения и нормальна к нему,

б) напряженность магнитного поля не изменяется по длине участка, которая принимается равной длине средней линии магнитной индукции и практически измеряется вдоль оси участка, в) если участком является воздушный зазор, то его расчетное сечение принимается равным сечению соседних участков сердечника.

При этих допущениях магнитный поток сквозь сечение k -го участка площадью S_k .

$$\Phi_k = \int_{S_k} \overline{B} ds \approx B_k S_k, \quad (2.9)$$

а разность скалярных магнитных потенциалов (или, по аналогии с соответствующей электрической величиной, магнитное напряжение) на участке длиной l_k .

$$U_{Mk} = \int_{l_k} \overline{H} dl \approx H_k l_k. \quad (2.10)$$

Принцип непрерывности магнитного потока (рисунок 2.4) $\int_S \overline{B} ds = 0$ позволяет получить *первый закон Кирхгофа* (рисунок 2.5) для магнитной цепи (*алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равна нулю*)

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0 \quad (2.11)$$

где n — число ветвей, образующих узел.

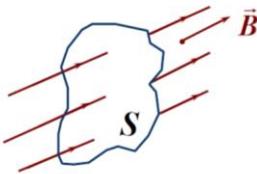


Рисунок 2.4 – Принцип непрерывности магнитного потока

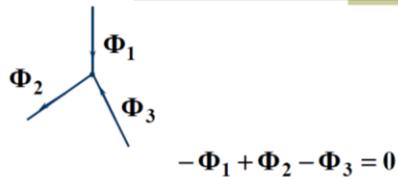


Рисунок 2.5 – Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи

А закон полного тока (рисунок 2.6) $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum i$ — второй закон Кирхгофа для магнитной цепи (алгебраическая сумма магнитных напряжений в контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме мдс в том же контуре):

$$\sum_{k=1}^m U_{Mk} = \sum_{k=1}^m F_k \quad (2.12)$$

где m — число участков в контуре;

F_k — магнитодвижущая сила (мдс), равная произведению тока I_k в обмотке на число витков w .

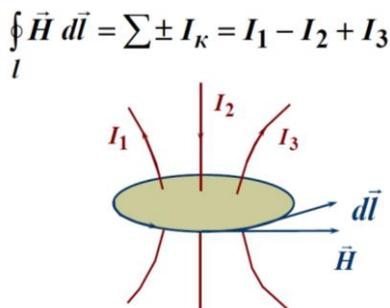


Рисунок 2.6 – Закон полного тока

Очевидна формальная аналогия этих выражений с соответствующими законами электрической цепи (аналоги- U и U_M , I и Φ). Продолжая эту аналогию, вводят понятие магнитного сопротивления участка

$$R_{Mk} = \frac{U_{Mk}}{\Phi_k} = \frac{H_k l_k}{B_k S_k} = \frac{H_k l_k}{H_k \mu_k S_k} = \frac{l_k}{\mu_k S_k} \quad (2.13)$$

(сравните $R = \frac{l}{\gamma S}$).

Магнитное сопротивление участка из неферромагнитного материала постоянно:

$$R_M = \frac{U_M}{\Phi} = \frac{l}{\mu_0 S} \quad (2.14)$$

(закон Ома для магнитной цепи), сопротивление же участка из ферромагнитного материала нелинейно и в расчете, учитывается веберамперной характеристикой (вб. а.х.) $\Phi=f(U_M)$, которая получается изменением масштаба кривой намагничивания и является аналогом вольтамперной характеристики нелинейного омического сопротивления.

Отмеченная аналогия с электрическими цепями позволяет и для магнитной цепи составить *схему замещения*, в которой *каждый участок будет представлен магнитным сопротивлением, а каждая обмотка с током — магнитодвижущей силой, направление которой определяется по правилу буравчика*. В ветвях такой схемы протекают магнитные потоки, а на элементах существуют магнитные напряжения.

Очевидно, расчет таких схем подобен расчету схем замещения нелинейных цепей постоянного тока и может быть проведен любым из методов.

Кривые намагничивания для литой стали и листовой электротехнической стали Э-31, используемые в нижеприведенных задачах, даны на рисунке 2.7.

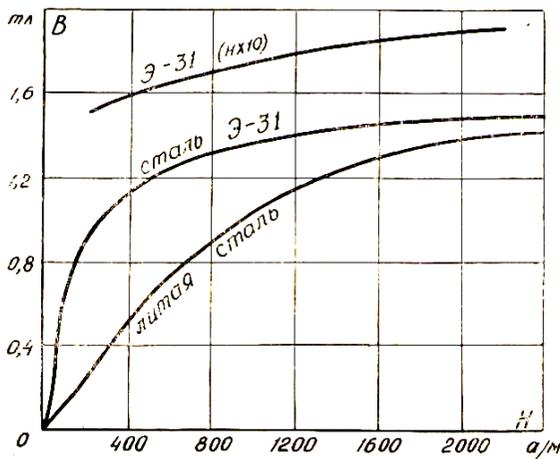


Рисунок 2.7 – Кривые намагничивания

2.3 Неразветвленная магнитная цепь

При расчете такой цепи обычно бывают известны геометрические размеры и материалы участков, рассматриваются две задачи: прямая и обратная.

Прямая задача состоит в определении намагничивающей силы по заданному магнитному потоку. Магнитный поток во всех участках одинаков, следовательно, можно найти магнитную индукцию

в каждом из них $B_k = \frac{\Phi}{S_k}$, затем по кривым намагничивания

определить напряженность магнитного поля $H_k=f(B_k)$, далее вычислить магнитные напряжения на участках — $U_{Mk}=H_k l_k$ и по второму закону

Кирхгофа подсчитать мдс — $F = \sum_{k=1}^n U_{Mk}$.

Сложнее **обратная задача**, когда по заданной намагничивающей силе нужно определить магнитный поток. Она решается с помощью веберамперной характеристики (вб.а.х.) цепи $\Phi = f(U_M)$, для построения которой приходится решить несколько прямых задач для ряда произвольно выбранных значений магнитного потока Φ . Только для однородной магнитной цепи с неизменным сечением прямая и обратная задачи по сложности одинаковы.

Если в цепи существуют сравнительно слабые магнитные поля (используется начальный, практически линейный участок кривой намагничивания), то, приняв $\mu=const$, можно ввести в расчет

постоянные магнитные сопротивления $R_M = \frac{l}{\mu S}$ и проводить его в

соответствии с законом магнитной цепи $\Phi = \frac{U_M}{R_M}$, аналогичным

закону Ома для цепи электрической.

Примером неразветвленной цепи служит электромагнит, для которого важно определить силу тяги. Она равна частной производной энергии магнитного поля в зазоре

$$f = \frac{\partial W_M}{\partial l} \approx \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{BH}{2} S l \right) = \frac{BHS}{2} = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (2.15)$$

Эта же формула применима и для определения силы тяги постоянного магнита.

Иногда бывает нужно вычислить статическую индуктивность обмотки (если она одна в магнитной цепи). По определению

$$L = \frac{\Psi}{I} = w^2 \frac{\Phi}{F} = \frac{w^2}{R_M} = w^2 G_M \quad (2.16)$$

где w — число витков обмотки,

G_M — магнитная проводимость.

В этом случае энергия магнитного поля

$$W_M = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Psi I}{2} = \frac{\Phi F}{2} \quad (2.17)$$

2.3.1 Примеры расчета неразветвленной магнитной цепи

Задача 2.1. На кольцо (рисунок 2.8) из литой стали намотана обмотка с числом витков $w=500$. Наружный диаметр кольца $D_n = 8$ см, внутренний — $D_b = 6$ см, высота $h=2$ см. В кольце сделан радиальный зазор толщиной $\delta = 0,8$ мм. Определить:

- постоянный ток в обмотке, при котором магнитный поток в кольце будет равен $\Phi = 1,8 \cdot 10^{-4}$ Вб;
- магнитный поток в кольце при токе в обмотке $I=1$ А.

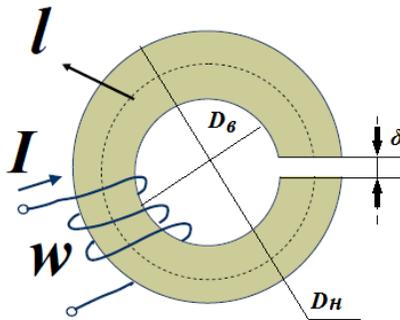


Рисунок 2.8 – К задаче 2.1

Решение.

Площадь сечения кольца (m^2)

$$S = h \frac{D_H - D_B}{2} = 2 \cdot \frac{8-6}{2} = 2 \cdot 10^{-4}.$$

Длина средней линии (м)

$$l = \pi \frac{D_H + D_B}{2} - \delta = 3,14 \cdot \frac{8+6}{2} - 0,08 = 0,219$$

а. Прямая задача.

Зная поток, находим магнитную индукцию

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{1,8 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}} = 0,9 \text{ Тл}$$

и по кривой намагничивания (рисунок 2.7) определяем напряженность магнитного поля в кольце

$$H = f(B) = f(0,9) = 800 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение на кольце

$$U_M = Hl = 0,219 \cdot 800 = 175 \text{ А,}$$

а на воздушном зазоре

$$U_{M\delta} = \Phi R_{M\delta} = \Phi \frac{\delta}{\mu_0 S} = \frac{1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{4\pi 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 575 \text{ А.}$$

По второму закону Кирхгофа для магнитной цепи

$$F = U_M + U_{M\delta} = 175 + 575 = 750 \text{ А,}$$

тогда ток в обмотке

$$I = \frac{F}{w} = \frac{750}{500} = 1,5 \text{ А.}$$

б. Обратная задача.

Для ее решения используем аналогию магнитных цепей с электрическими. Схема замещения рассматриваемой цепи приведена на рисунке 2.9, а.

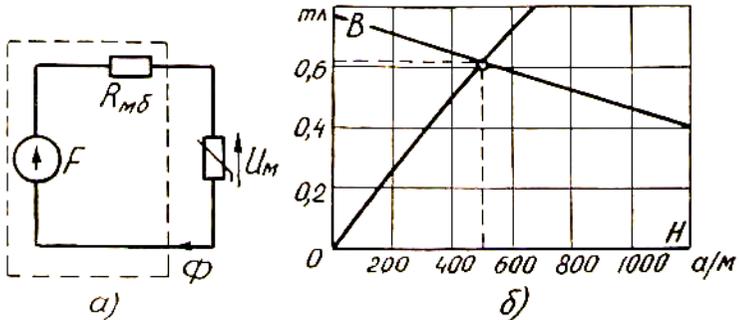


Рисунок 2.9 – Схема замещения к задаче 2.1

Здесь

$$F = Iw = 1 \cdot 500 = 500 \text{ A},$$

$$R_{M\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S} = \frac{0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{4\pi 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 3,18 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1}.$$

Внешняя (веберамперная) характеристика активного линейного двухполюсника (ограничен пунктиром на рисунке 2.9, а) описывается выражением

$$U_M = F - \Phi R_{M\delta} = F - S\Phi R_{M\delta},$$

откуда

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{S \cdot R_{M\delta}} (F - U_M) = \frac{1}{S \cdot R_{M\delta}} (F - H \cdot l) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 10^{-4} \cdot 3,18 \cdot 10^6} (500 - H \cdot 0,219) = (0,785 - 0,344 \cdot 10^{-3} H) \text{ Тл} \end{aligned}$$

Точка пересечения этой прямой отсекающей на осях B и H отрезка $B = 0,785$ Тл и $H = 2280$ А/м, с кривой намагничивания литой стали (рисунок 2.9, б), дает искомые величины $B = 0,61$ Тл и $H = 500$ А/м.

Тогда $\Phi = BS = 0,61 \cdot 2 \cdot 10^4 = 1,22 \cdot 10^4$ Вб.

Кстати, задачу можно было решить достаточно точно, полагая магнитную цепь линейной (слабые магнитные поля). Действительно, на начальном участке кривой намагничивания литой стали $B = \mu H$, где $1,25 \cdot 10^{-3}$ Гн/м, тогда магнитное сопротивление кольца

$$R_M = \frac{l}{\mu \cdot S} = \frac{0,219}{1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0,88 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1}.$$

По закону магнитной цепи

$$\Phi = \frac{F}{R_M + R_{M\delta}} = \frac{500}{0,88 \cdot 10^6 + 3,18 \cdot 10^6} = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Разница с полученным ранее результатом не превышает погрешности при графических построениях.

Ответ: а) 1,5 А; б) $1,22 \cdot 10^4$ Вб.

Задача 2.2. Решить предыдущую задачу при отсутствии воздушного зазора в кольце и сохранении прочих условий.

Ответ: а) 0,352 А; б) $2,85 \cdot 10^4$ Вб.

Задача 2.3. Определить статическую индуктивность обмотки и силу тяги электромагнита, изображенного на рисунке 2.10, а, если в его обмотке с числом витков $w=400$ протекает ток $I = 0,5$ А. Материал сердечника — листовая электротехническая сталь Э-31, материал якоря — литая сталь. Площадь сечения каждого из участков $S = 4 \text{ см}^2$. Длина средней линии магнитной индукции в сердечнике $l_c = 20$ см, в якоря $l_{\text{я}} = 6$ см; толщина зазора $\delta = 0,2$ мм.

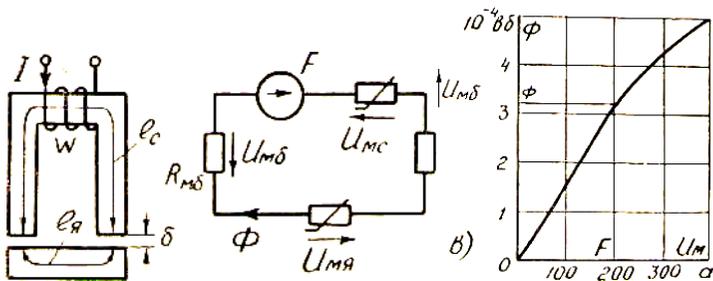


Рисунок 2.10 – К задаче 2.3

Ответ: 0,256 Гн, 102 н.

Решение.

Схема замещения магнитной цепи изображена на рисунке 2.10, б. Здесь $F = Iw = 200$ А. Магнитное сопротивление зазора

$$R_{M\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-4}} \approx 0,4 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1}$$

Магнитные сопротивления сердечника R_{Mc} и якоря $R_{Mя}$ — нелинейные магнитные сопротивления.

Это один из вариантов обратной задачи и для решения необходимо построить веберамперную характеристику цепи $\Phi = f(U_M)$. Порядок расчета следующий. Задавшись некоторым значением потока Φ , находим магнитную индукцию $B = \Phi/S$, затем по соответствующим кривым намагничивания (рисунок 2.7) — напряженности магнитного поля в сердечнике и якоре H_c и $H_я$, потом магнитные напряжения $U_{Mc} = H_c l_c$ и $U_{Mя} = H_я l_я$. Магнитные напряжения на зазорах определяем по формуле $U_{M\delta} = \Phi R_{M\delta}$. Суммарное магнитное напряжение, соответствующее данному потоку, равно $U_M = U_{Mc} + U_{Mя} + 2 U_{M\delta}$. Результаты вычислений сведены в таблицу 2.2.

Поскольку сопротивление зазора обычно составляет значительную часть всего сопротивления магнитной цепи, поэтому наибольшее значение магнитного потока принимается равным

$$\Phi_{Max} = \frac{E}{R_{M\delta}} = \frac{200}{0,4 \cdot 10^6} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$$

Таблица 2.2 – Результаты вычислений к задаче 2.3

Φ , $\times 10^{-4}$ Вб	B , Тл	H_C , А/м	$H_{ж}$, А/м	$U_{мс}$ А	$U_{мв}$ А	$U_{мд}$ А	$U_{м}$ А
5	1,25	590	1435	118	86	200	404
4	1	230	920	46	55	160	261
3	0,75	125	635	25	38	120	183
2	0,5	80	400	16	24	80	120

Посчитаем для этого потока суммарное магнитное напряжение цепи $U_m=404$ А. По второму закону Кирхгофа суммарное напряжение должно равняться мдс $F=200$ А. Сравнив 200 и 404 А, задаемся меньшими значениями потока 4, 3, 2×10^{-4} Вб. По табличным данным строим веберамперную характеристику цепи $U_m=f(\Phi)$ (рисунок 2.10,в). Искомый поток $\Phi=3,2 \cdot 10^{-2}$ Вб соответствует на характеристике точке $U_m=F=200$ А.

$$\text{Магнитная индукция } B = \frac{\Phi}{S} = \frac{3,2 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-4}} = 0,8 \text{ Тл.}$$

Сила тяги электромагнита на два зазора

$$f = 2 \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{0,8^2 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 204 \text{ н.}$$

Статическая индуктивность обмотки

$$L_{ст} = \frac{w\Phi}{I} = \frac{400 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4}}{0,5} = 0,256 \text{ Гн.}$$

Задача 2.4. Для электромагнита задачи 2.3 построить зависимости

а) статической индуктивности от тока в обмотке при воздушном зазоре $\delta=0,2$ мм (числовой ответ дать для $I=1,2$ А);

б) силы тяги от величины зазора при токе $I=0,5$ А (числовой ответ дать для $\delta=0,05$ мм).

Ответ: а) 0,18 Гн; б) 430 н.

Задача 2.5. Определить энергию магнитного поля дросселя, в обмотке которого с числом витков $w = 1000$ протекает ток $I = 0,75$ А. Сердечник дросселя изготовлен из листовой стали Э-31. Толщина пакета сердечника — 25 мм, воздушный зазор 0,5 мм. Остальные размеры сердечника в мм заданы на рисунке 2.11.

Ответ: 0,225 Дж.

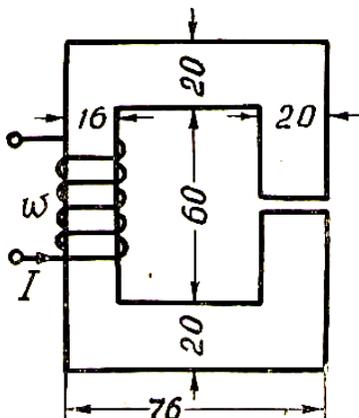


Рисунок 2.11 – Магнитная цепь к задаче 2.5

Задача 2.6. Кольцевой постоянный магнит с воздушным зазором $\delta = 21$ мм изготовлен из сплава АНК01 (кривая размагничивания приведена на рисунке 2.12). Размеры кольца: внутренний диаметр $D_B = 50$ мм, внешний диаметр $D_H = 70$ мм, высота $h = 10$ мм. Определить магнитный поток.

Ответ: $0,4 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Решение.

Полагая магнитную индукцию в теле магнита и в зазор: одинаковой, определим расчетные размеры цепи: площадь сечения

$$S = h \frac{D_H - D_B}{2} = 10 \cdot \frac{70 - 50}{2} = 100 \text{ мм}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2,$$

длина средней линии

$$\ell \approx \pi \frac{D_H + D_B}{2} - \delta = \pi \cdot \frac{70 + 50}{2} - 21 = 167 \text{ мм} = 0,167 \text{ м}.$$

Из второго закона Кирхгофа для магнитной цепи следует, что напряженность магнитного поля в теле магнита

$$H = -\frac{-H_{\delta}\delta}{l} = -\frac{B_{\delta}}{\mu_0 l} = -B \frac{21 \cdot 10^{-3}}{10^{-7} \cdot 0,167} = 10^{-5} \text{ В.}$$

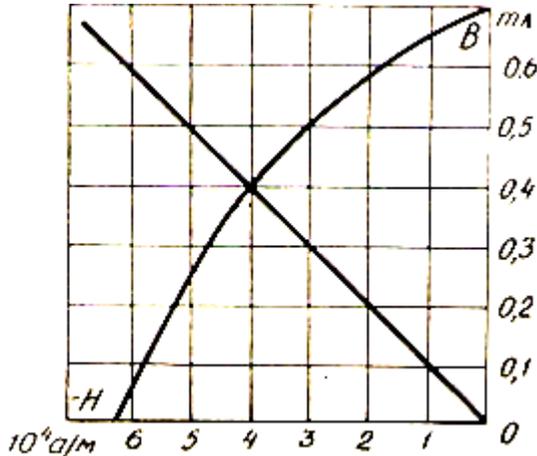


Рисунок 2.12 – Кривая размагничивания к задаче 2.6

Точка пересечения этой прямой с кривой размагничивания определяет значение индукции $B=0,4$ Тл. Тогда магнитный поток $\Phi=BS = 0,4 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Задача 2.7. На рисунке 2.13 изображена магнитная система гальванометра. Постоянный магнит ее изготовлен из сплава АНК01, кривая размагничивания которого приведена на рисунке 2.12. Расчетные длина и сечение магнита и воздушного зазора $l_M = 88$ мм, $l_B = 2 \times 1 = 2$ мм, $S_M = 1$ мм², $S_B = 2$ мм².

Определить магнитную индукцию в воздушном зазоре, пренебрегая рассеянием и магнитным сопротивлением полюсных наконечников якоря.

Ответ: 0,42 Тл.

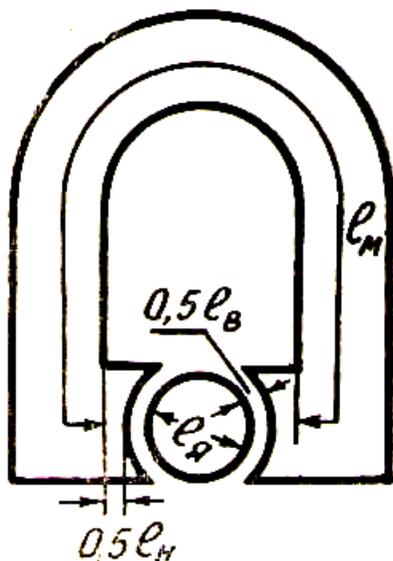


Рисунок 2.13 – Магнитная система гальванометра

2.4 Разветвленная магнитная цепь

Среди разветвленных магнитных цепей наиболее часто встречаются трехстержневые устройства, аналогом которых является двухконтурная нелинейная электрическая цепь, рассчитываемая обычно методом двух узлов. Подобным же образом ведется расчет магнитной цепи с использованием веберамперных характеристик (вб.а.х.) ветвей $\Phi=f(U_m)$, которые строятся на основе известных кривых намагничивания так же, как и вб.а.х. неразветвленной цепи в обратной задаче.

Однократный расчет (без построения вб.а.х.) возможен лишь в некоторых частных случаях (например, для цепи, в которой каждая ветвь имеет одинаковые сечение и магнитную проницаемость по всей длине, соединение ветвей последовательно-параллельное, магнитный поток задан в одном из крайних стержней, а единственная обмотка находится на другом, или для некоторых цепей, обладающих симметрией).

Во всех же остальных случаях придерживаются следующего примерного порядка расчета.

- 1) магнитная цепь разбивается на (участки с одинаковым сечением, выполненные из однородного материала;
- 2) определяются геометрические размеры этих участков — средняя длина l и сечение S (в случае неферромагнитного материала может быть подсчитано и магнитное сопротивление $R_M = \frac{l}{\mu_0 S}$);
- 3) составляется схема замещения магнитной цепи (каждый участок — магнитное сопротивление, каждая обмотка — м. д. с.);
- 4) для каждой ветви составляется уравнение, связывающее магнитное напряжение на ее зажимах с ее магнитным потоком;
- 5) в соответствии с этими уравнениями строятся вб.а.х. ветвей (вспомогательные вычисления сводятся в таблицы);
- 6) если известна схема замещения магнитной цепи и вб.а.х. ветвей, то дальнейший расчет аналогичен расчету соответствующей нелинейной электрической цепи и проводится графоаналитическим или численным способом.

В зависимости от условия задачи построение вб.а.х. некоторых ветвей может оказаться излишним и это следует предусмотреть.

2.4.1 Примеры расчета разветвленной магнитной цепи

Задача 2.8. Сердечник, изображенный на рисунке 2.14, а, собран из листовой электротехнической стали Э-31. Площади сечения всех участков одинаковы, $S = 20 \text{ см}^2$, а длины указаны в мм на рисунке. При каком тоне I в обмотке с числом витков $w = 2000$ магнитная индукция в воздушном зазоре составит $B_0 = 0,05 \text{ Тл}$?

Ответ: $I = 3 \text{ а}$.

Решение.

Задача допускает однократный расчет, причем в силу равенства сечений всех участков первый закон Кирхгофа для узла магнитной цепи для узла данной магнитной цепи $\sum \Phi_k = 0$ можно переписать в виде $\sum B_k = 0$.

Схема замещения магнитной цепи показана рисунке 2.14, б. В расчете используется кривая намагничивания листовой стали Э-31 (рисунок 2.7).

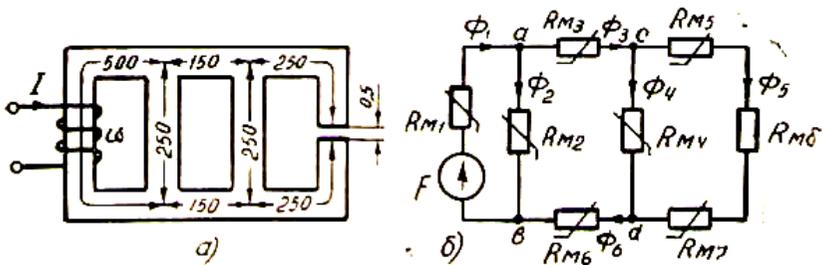


Рис. 4-8

Рисунок 2.14 – Магнитная цепь и схема замещения к задаче 2.8

Напряженность магнитного поля в правом стержне $H_5 = f(B_0) = 20$ А/м, а в зазоре

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0,05}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 4 \cdot 10^4 \text{ А/м.}$$

Тогда

$$U_{M.cd} = H_5 (l_5 + l_7) + H_0 l_0 = 20(0,25 + 0,25) + 4 \cdot 10^4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ А,}$$

$$\text{и } H_4 = \frac{U_{M.cd}}{l_4} = \frac{30}{0,25} = 120 \quad \text{– } 120 \text{ А/м,}$$

чему соответствует $B_4 = 0,70$ Тл.

Затем находим

$$B_3 = B_6 = B_4 + B_5 = 0,7 + 0,05 = 0,75 \text{ Тл}$$

$$\text{и } H_3 = H_6 = 133 \text{ А/м,}$$

тогда $U_{M.ab} = U_{M.cd} + H_3 l_3 + H_6 l_6 = 30 + 2 \cdot 133 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} = 70 \text{ А.}$

$$\text{Далее } H_2 = \frac{U_{M.ab}}{l_2} = \frac{70}{0,25} = 280 \text{ А/м, } B_2 = f(H_2) = 1,05 \text{ Тл,}$$

$$B_1 = B_2 + B_3 = 1,05 + 0,75 = 1,8 \text{ Тл.}$$

При этом $H_1=12000 \text{ А/м}$ и $F=U_{\text{МаВ}} + H_1 l_1=70+12000 \cdot 0,5=6070 \text{ А}$.

Отсюда
$$I = \frac{F}{w} = \frac{6070}{2000} = 3,035 \text{ А}.$$

Задача 2.9. Определить статическую индуктивность обмотки дросселя задачи 2.8 при токе 1,3 А и отсутствии воздушного зазора.

Указание. Предварительно следует построить веберамперную характеристику цепи, задаваясь различными значениями магнитной индукции в правом стержне и повторяя расчеты предыдущей задачи.

Ответ: 2,5 мГн.

Задача 2.10. Определить магнитные потоки в стержнях магнитной цепи, изображенной на рисунке 2.15, а, если $I=2,5 \text{ А}$, $w=3000$, $I_2 = 2 \text{ А}$, $w = 500$, а геометрические размеры сердечника указаны на рисунке в мм (материал — листовая сталь Э-31, толщина пакета 50 мм).

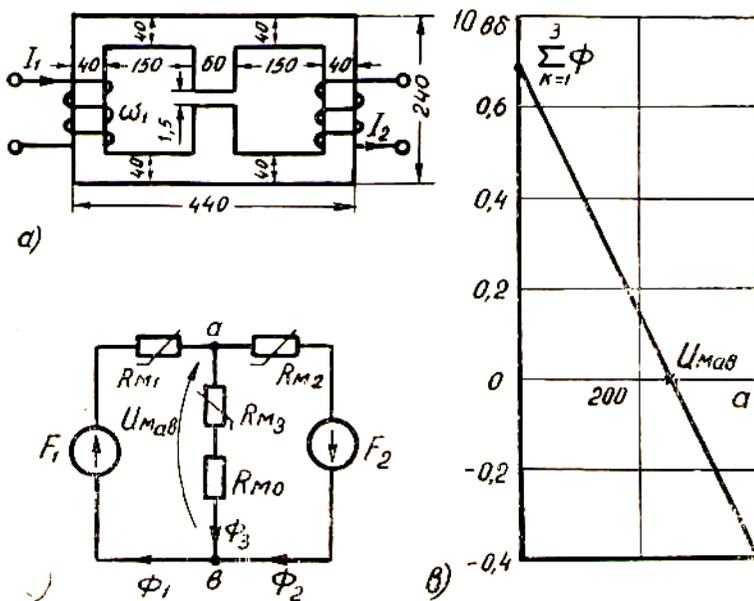


Рис. 4-10

Рисунок 2.15 – Магнитная цепь и схема замещения к задаче 2.10

Решение.

В левом и правом стержне всего по одному участку с одинаковой площадью поперечного сечения $S_1=S_2=40 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ и одинаковой средней длиной $l_1=l_2 \approx 10^{-3} [(240-2 \cdot 20)+2(150+20+30)]=0,6 \text{ м}$. В среднем — три: воздушный зазор ($l_0=1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) и два примыкающих к нему участка с общей длиной $l_3 \approx (240 - 2 \cdot 20) \cdot 10^{-3} = 0,2 \text{ м}$; площадь сечения $S_3=S_0=60 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Магнитодвижущие силы $F_1=w_1 I_1=3000 \cdot 2,5=7500 \text{ А}$ и $F_2=w_2 I_2=500 \cdot 2=1000 \text{ А}$.

Схема замещения, в которой каждому участку соответствует магнитное сопротивление (лишь одно из них, характеризующее зазор, линейно

$$R_{M0} = \frac{\ell_0}{\mu_0 S_0} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 4 \cdot 10^5 \text{ Гн}^{-1};$$

два другие участка среднего стержня представлены одним эквивалентным магнитным сопротивлением (R_{M3}), а каждой обмотке — мдс, показана на рисунке 2. 15, б.

Схема может быть рассчитана методом двух узлов путем графического решения системы функциональных уравнений:

$$U_{Mab}(\Phi_1) = F_1 - U_{M1}(\Phi_1),$$

$$U_{Mab}(\Phi_2) = U_{M2}(\Phi_2) - F_2,$$

$$U_{Mab}(\Phi_3) = U_{M3}(\Phi_3) + R_{M0} \Phi_3,$$

$$\Phi_1(U_{Mab}) - \Phi_2(U_{Mab}) - \Phi_3(U_{Mab}) = 0.$$

где $\Phi_k = B_k S_k$, $U_{Mk} = H_k l_k$ ($k=1, 2, 3$, причем соответствующие значения B_k и H_k определяются по кривой намагничивания для стали Э-31 на рисунке 2.7).

Учитывая, что только в одном 3-м стержне имеется два магнитных сопротивления, в решении можно обойтись построением лишь одной кривой $\sum \Phi_k(U_{Mab})$, если произвольно задаваться потоком Φ_3 и находить соответствующие ему величины: индукцию $B_3 = \Phi_3 / S_3$, напряженность $H_3 = f(B_3)$ по кривой намагничивания, магнитные напряжения

$$U_{Mab} = U_{M0} + U_{M3} = R_{M0} \Phi_3 + H_3 l_3, \quad (2.18)$$

$$U_{M1}=F_1-U_{Mab}, \quad U_{M2}=F_2+U_{Mab}, \quad (2.19)$$

затем $H_1=U_{M1}/l_3$, $H_3=U_{M2}/l_3$;

$B_1=f(H_1)$, $B_2=f(H_2)$ — по кривой намагничивания, далее потоки $\Phi_1=B_1S_1$, $\Phi_2=B_2S_2$, и, наконец, $\sum\Phi_K = \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3$.

Начав с $\Phi_3 = 0$ и получив при этом в результате расчета $\sum\Phi_K > 0$ (это очевидно, так как цепь симметрична, а $F_1 > F_2$), увеличиваем постепенно Φ_3 до тех пор, пока не окажется $\sum\Phi_K < 0$. Имея в этом диапазоне несколько расчетных точек, строим кривую $\sum\Phi_K(U_{Mab})$.

Точка пересечения этой кривой с осью магнитных напряжений (условие $\sum\Phi_K=0$) определяет искомую величину U_{Mab} зная которую, нетрудно по формулам (2.18-2.19) определить действительные напряжения и затем магнитные потоки.

Результаты вычислений сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты вычислений

$\Phi_3, 10^{-3}$ Вб	0	0,45	0,9	0,6
$B_3, \text{Тл}$	0	0,15	0,3	0,2
$H_3, \text{А/м}$	0	40	60	50
$U_{M3}, \text{А}$	0	8	12	10
$\Phi_3 \cdot R_{M0}, \text{А}$	0	180	360	240
$U_{Mab}, \text{А}$	0	188	372	250
$U_{M1}, \text{А}$	7500	7320	7140	7250
$H_1, \text{А/м}$	12500	12200	11900	12083
$B_1, \text{Тл}$	1,81	1,805	1,795	1,8
$\Phi_1, 10^{-3}$ Вб	3,62	3,61	3,59	3,6
$U_{M2}, \text{А}$	1000	1188	1372	1250
$H_2, \text{А/м}$	1667	1980	2290	2083
$B_2, \text{Тл}$	1,47	1,49	1,505	1,5
$\Phi_2, 10^{-3}$ Вб	2,94	2,98	3,01	3,0
$\sum\Phi_K, 10^{-3}$ Вб	0,68	0,18	-0,32	0

Вб.а.х. пересекает ось абсцисс в точке $U_{Mab}=250$ А, соответствующие значения остальных величин помещены в крайнем правом столбце таблицы. Итак, $\Phi_1=3,6 \cdot 10^{-3}$ Вб, $\Phi_2=3 \cdot 10^{-3}$ Вб, $\Phi_3=0,6 \cdot 10^{-3}$ Вб.

Замечание. Если бы в крайних стержнях оказалось также более одного участка, то пришлось бы составить три таблицы

вспомогательных вычислений для построения трех вб.а.х. $\Phi_K=f(U_{Mab})$, а характеристику $\sum\Phi_K(U_{Mab})$.получить графическим их сложением.

Ответ: $3,6 \cdot 10^{-3}$ Вб; $3 \cdot 10^{-3}$ Вб, $0,6 \cdot 10^{-3}$ Вб.

2.5 Магнитные цепи с переменным магнитным потоком

В периодических и переходных режимах параметры нелинейных элементов определяются динамическими характеристиками. Характеристики даже для одного элемента при разной частоте и форме воздействия различны.

Важнейшим признаком с точки зрения расчета является инерционность и безынерционность элемента.

Сопротивление элементов, нелинейность которых обусловлена тепловыми процессами (ламп накаливания, термистов и т. п.), может быть либо неизменным, либо может меняться в зависимости от вида протекающего тока, условий охлаждения и тепловой предыстории.

Если постоянная времени нагрева термосопротивления значительно больше периода установившегося переменного тока в нем, то сопротивление элемента в течение периода практически не меняется. Элемент в таком режиме является существенно инерционным. Вольтамперная характеристика его для мгновенных величин линейна; при синусоидальном токе напряжение на элементе также синусоидально. Поэтому для расчета режимов цепи с инерционными элементами может быть использовано комплексное (символическое) исчисление. Переход от одного установившегося режима к другому сопровождается изменением наклона характеристики. Между мгновенными значениями токов и напряжений зависимость линейна, между действующими значениями— нелинейна. Эти элементы иногда называют условно нелинейными. Если постоянная времени нагрева термосопротивления соизмерима с периодом источника питания, то сопротивление элемента успевает периодически меняться с некоторым запаздыванием по фазе от протекающего тока. При синусоидальном токе напряжение на элементе оказывается несинусоидальным, -сопротивление для основной гармонике тока — комплексным.

Если же период источника питания много -больше постоянной времени нагрева термoeлемента, то инерционностью тепловых процессов можно пренебречь. В таких условиях динамическую характеристику можно считать совпадающей со статической. При синусоидальном токе напряжение на элементе несинусоидально.

Примером инерционной индуктивности является электромагнит, изменение индуктивности которого связано с изменением воздушного зазора в магнитопроводе и с перемещением механических масс.

Инерционной емкостью является конденсатор, пластины которого перемещаются под действием приложенного напряжения (электростатический вольтметр).

Емкости и индуктивности, не имеющие подвижных частей, практически безынерционны.

Природа нелинейности безынерционных элементов весьма разнообразна. В цепях с безынерционными элементами даже при синусоидальных источниках возникают несинусоидальные токи и напряжения.

Магнитный материал катушки с железным сердечником обладает гистерезисом. На переориентацию магнитного поля вещества при переменных токах расходуется энергия источника, пропорциональная площади петли гистерезиса. Активная энергия расходуется также на нагревание проводов обмотки основным током и на нагревание сердечника вихревыми токами. Активные потери учитываются в схеме замещения активными сопротивлениями. Магнитное поле катушки учитывается в схеме замещения индуктивностями основной (нелинейной), связанной с основным магнитным потоком в сердечнике, и индуктивностью рассеяния (линейной при не очень сильных насыщениях материала), связанной с потоком рассеяния, который замыкается по воздуху.

Во многих задачах допустимо пренебрегать гистерезисом и активными потерями. Тогда катушка в схеме замещения учитывается идеальной нелинейной индуктивностью с однозначной веберамперной характеристикой $\psi(i)$, соответствующей основной кривой намагничивания материала $B(H)$.

$$\psi = w\Phi = w \int \bar{B} \cdot d\bar{S} \approx wBS \cdot wi = \oint \bar{H} \cdot d\bar{\ell} \approx \sum H \cdot \ell.$$

Конденсаторы с сегнетоэлектрическим материалом между обкладками во многом аналогичны катушкам с ферромагнитными сердечниками. У сегнетоэлектриков существует диэлектрический гистерезис, обусловленный электрическим полем вещества. Имеются тепловые потери от токов утечек по несовершенной изоляции. Эти потери учитываются в схеме замещения активными сопротивлениями. Если потери малы, то такой конденсатор в схеме замещения изображается идеальной емкостью с однозначной кулонвольтной

характеристикой $q(u)$, определяемой материалом диэлектрика и геометрией конденсатора.

Для анализа периодических режимов в нелинейных цепях с синусоидальными источниками используются аналитические, графические и численные методы. Если интересуются в основном энергетическими параметрами (ток, напряжение, мощность), то для цепей с термосопротивлениями, нелинейными катушками и конденсаторами используется метод расчета по характеристикам для действующих значений.

Анализ нелинейных цепей по характеристикам для мгновенных величин значительно сложнее. Упрощенные методы возможны лишь в частных случаях. Так, для однородных цепей (цепей, состоящих только из активных, только из индуктивных или только из емкостных элементов) может использоваться метод преобразования характеристик, аналогичный применявшемуся для цепей постоянного тока.

Упрощенный графический и аналитический расчет возможен для несложных цепей, содержащих элементы с полным насыщением и идеальные выпрямители (элементы с прямоугольными характеристиками).

В цепи с несколькими нелинейными элементами реакция каждого элемента зависит от реакции остальных. И только в частных случаях реакция нелинейных элементов цепей взаимно независима, и суммарная реакция находится простым графическим или аналитическим сложением. Это случаи параллельного подсоединения элементов к идеальному источнику эдс (источнику без внутреннего сопротивления) и случаи последовательного соединения элементов с идеальным источником тока.

Для нелинейных цепей переменного и постоянного тока в установившемся и в переходном режиме неприменим принцип независимости воздействий и составляющих реакции цепи, то есть **неприменим принцип независимого наложения**. Однако принцип зависимого наложения справедлив. В частности, периодические токи и напряжения в нелинейной цепи могут быть представлены суммой гармонических составляющих, амплитуды и фазы которых взаимно зависимы. На этом основан метод гармонического баланса.

2.5.1 Гармонический анализ реакции нелинейных элементов

Графические методы разложения периодических функций в ряд Фурье, могут быть использованы для нахождения гармонического состава реакции нелинейных элементов.

Для определения амплитуд и фаз n гармонических составляющих периодической кривой в общем случае необходимо иметь значения ординат кривой в $2n$ точках. Однако, если по виду периодической кривой заранее можно указать соотношение фаз гармоник, то для определения амплитуд n гармоник достаточно иметь значения ординат кривой только в n точках. На этом основаны методы 2-х, 3-х и 5 ординат.

Метод двух ординат

Если кривая $y(\omega t)$ имеет вид, подобный кривым на рисунке 2.16 и 2.17, то гармонический состав этой кривой приближенно можно искать в виде суммы 1-й и 3-й гармоник.

$$y(\omega t) = Y_{1m} \sin \omega t \pm Y_{3m} \sin 3\omega t. \quad (2.20)$$

Определяя из графика ординаты при любых двух аргументах, например $\omega t = 30^\circ$ и 90° и используя равенство (2.20), записываем систему:

$$\begin{aligned} y(30^\circ) &= 0,5 Y_{1m} \pm Y_{3m}, \\ y(90^\circ) &= Y_{1m} \mp Y_{3m}, \end{aligned}$$

из которой нетрудно найти амплитуды 1-й и 3-й гармоник разложения.

Задача 2.11. Веберамперная характеристика индуктивности $\psi(i)$, задана графически на рисунке 2.16. Потокосцепление изменяется по синусоидальному закону $\psi(t) = \psi_m \sin \omega t = 2 \sin \omega t$ мВб.

Определить графически ток и найти его гармонический состав методом двух, ординат.

Решение. Строим график $\psi(t)$ на рисунке 2.16. Отображая точки $\psi(t)$ относительно характеристики $\psi(i)$, получаем график $i(t)$. График $i(t)$ оказался вытянутым вдоль оси i и симметричным относительно начала и оси ωt , следовательно, его можно представить приближенно в виде суммы 1-й и 3-й гармоник с указанными на рисунке 2.16 начальными фазами. Согласно рисунку 2.16 записываем уравнения:

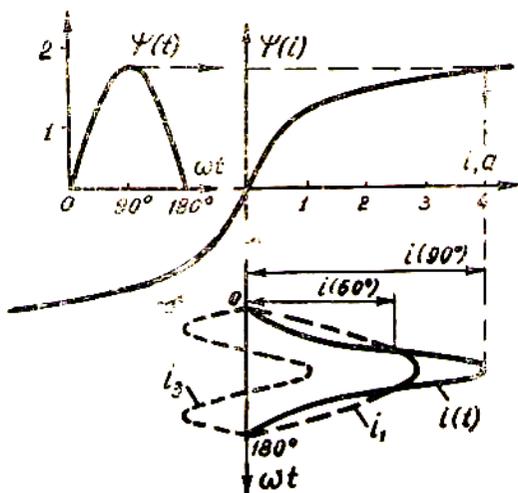


Рисунок 2.16 – К задаче 2.11

$$\left. \begin{aligned} i(60^\circ) &= I_{1m} \sin 60^\circ \\ i(90^\circ) &= I_{1m} + I_{3m} \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

Измерения на графике дают $i(60^\circ) = 2,51$ А, $i(90^\circ) = 4$ А. Тогда из (2.21) $I_{1m} = 2,51 : \sin 60^\circ = 2,9$ А, $I_{3m} = i(90^\circ) - I_{1m} = 4 - 2,9 = 1,1$ А. Учитывая фазы гармоник согласно графику, окончательно имеем

$$i(t) = 2,9 \sin \omega t - 1,1 \sin 3\omega t, \text{ А.}$$

Задача 2.12. Вольтамперная характеристика нелинейного сопротивления $u(i)$ задана на рисунке 2.17. Через сопротивление протекает синусоидальный ток $i(t) = I_m \sin \omega t = 4 \sin \omega t$, А.

Определить графически напряжение на сопротивлении и найти его гармонический состав методом двух ординат.

Ответ: $u(t) \approx 110 \sin \omega t + 10 \sin 3\omega t$ В.

Указание. Построить $i(t)$ и затем с помощью $u(i)$ — кривую $u(t)$, которая окажется симметричной приплюснутой. В данном случае основная система уравнений согласно рисунку 2.17 имеет вид

$$\left. \begin{aligned} u(60^\circ) &= U_{1m} \sin 60^\circ, \\ u(90^\circ) &= U_{1m} - U_{3m}. \end{aligned} \right\}$$

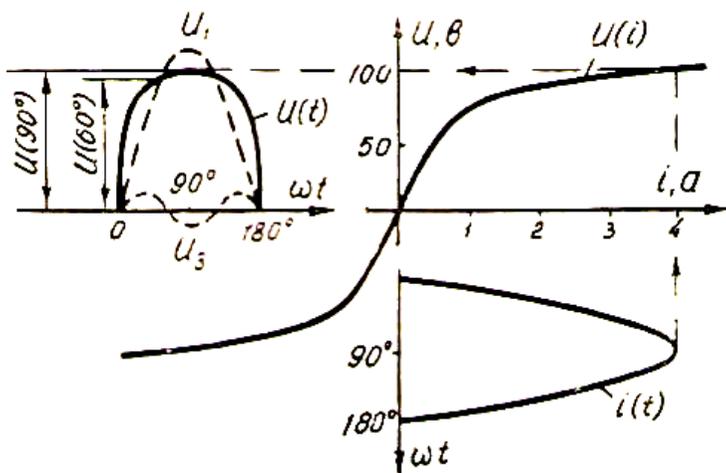


Рисунок 2.17 – К задаче ...

Метод трех (пяти) ординат.

Применяется для определения амплитуд первых трех (пяти) гармоник, включая нулевую, если кривая $y(\omega t)$ симметрична относительно оси y и параллельной ей прямой, удаленной на полпериода по оси ωt . Такие кривые представляют реакцию на гармоническое воздействие элементов с характеристикой, подобной характеристике диода (рисунок 2.18). В данном случае при воздействии $u(t) = U_0 + U_m \cos \omega t$ -реакцию можно искать в виде $i(t) = I_0 + I_{1m} \cos \omega t + I_{2m} \cos 2 \omega t$. Удобно использовать ординаты при $\omega t = 0^\circ, 90^\circ$ и 180° , $u = U_0 + U_m, U_0, U_0 - U_m$. Тогда можно записать систему уравнений

$$\begin{aligned} i(0^\circ) &= I_0 + I_{1m} + I_{2m}, \\ i(90^\circ) &= I_0 + 0 - I_{2m}, \\ i(180^\circ) &= I_0 - I_{1m} + I_{2m}. \end{aligned}$$

Из этой системы нетрудно найти амплитуды I_0, I_{1m}, I_{2m} . Если нужно учесть дополнительно 3-ю и 4-ю гармонику, то ординаты следует брать через $\Delta \omega t = 45^\circ$ и решение искать в виде

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \cos \omega t + I_{2m} \cos 2 \omega t + I_{3m} \cos 3 \omega t + I_{4m} \cos 4 \omega t.$$

(метод пяти ординат).

Задача 2.13. Характеристика диода $i(u)$ задана на рисунке 2.18. На зажимах диода действует напряжение $u(t) = 10 + 15 \cos \omega t$, В.

Построить кривую тока $i(t)$ и определить гармонический состав тока методом трех ординат.

Решение. Строим временной график напряжения $u(t)$, отображая его относительно характеристики $i(u)$, находим график тока $i(t)$ (рисунок 2.18).

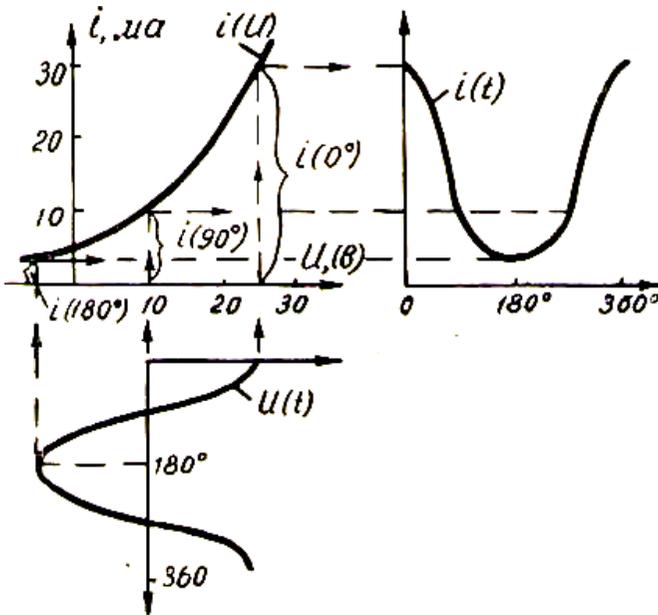


Рисунок 2.18 – К задаче 2.13

По методу трех ординат будем искать гармонический состав тока в виде

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \cos \omega t + I_{2m} \cos 2\omega t.$$

Из графика и по записанной формуле имеем

$$i(0^\circ) = I_0 + I_{1m} + I_{2m} = 30 \text{ мА},$$

$$i(90^\circ) = I_0 - I_{2m} = 10 \text{ мА},$$

$$i(180^\circ) = I_0 - I_{1m} + I_{2m} = 4 \text{ мА}.$$

Решая эту систему, находим: $I_0 = 13,5$ мА, $I_{1m} = 13$ мА, $I_{2m} = 3,5$ мА, следовательно, $i(t) = 13,5 + 13 \cos \omega t + 3,5 \cos 2\omega t$, мА.

Контрольные вопросы

1. Какие законы электротехники применяют к расчету магнитных цепей?
2. Как определяются участки магнитной цепи?
3. На чем основана аналогия между магнитной и электрической цепью?
4. Каков порядок расчета магнитных цепей?
5. В чем суть прямой и обратной задач?
6. В чем заключается особенность расчета разветвленных магнитных цепей?
7. Как осуществляется расчет магнитных цепей с переменным магнитным потоком?

3 Тесты

1. Устройство, представляющее собой путь, по которому замыкаются магнитные силовые линии, называется:

- А) электрической цепью
- В) магнитной цепью
- С) электромагнитной цепью
- Д) электронной цепью
- Е) правильный ответ отсутствует

2. Относительная магнитная проницаемость магнитных материалов ...

- А) 0
- В) 1
- С) больше 1
- Д) меньше 1
- Е) правильный ответ отсутствует

3. Магнитная постоянная составляет:

- А) 0
- В) 4
- С) 4π
- Д) $4\pi \cdot 10$
- Е) $4\pi \cdot 10^{-7}$

4. Единица измерения напряженности магнитного поля:

- А) В/м
- В) А
- С) Вб
- Д) Тл
- Е) А/м

5. Единица измерения мдс:

- А) В/м
- В) А
- С) Вб
- Д) Тл
- Е) А/м

6. Единица измерения магнитного напряжения:

- А) В/м
- В) А
- С) Вб

- D) Тл
- E) А/м

7. Единица измерения магнитного потока:

- A) В/м
- B) А
- C) Вб
- D) Тл
- E) А/м

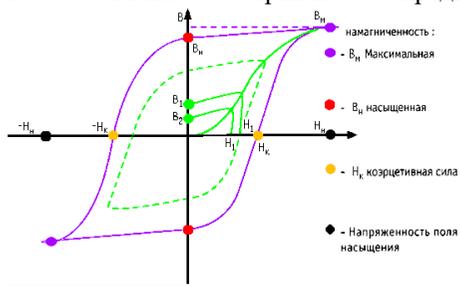
8. Единица измерения магнитной индукции:

- A) В/м
- B) А
- C) Вб
- D) Тл
- E) А/м

9. Единица измерения магнитной постоянной:

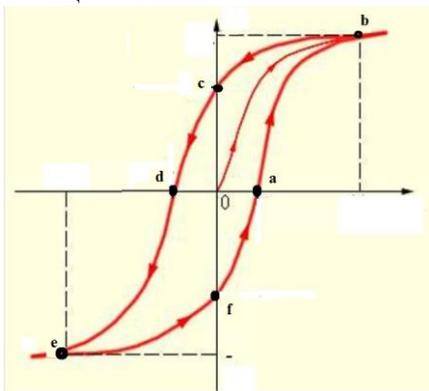
- A) Гн/м
- B) А
- C) Вб
- D) Тл
- E) А/м

10. Какая кривая представлена на рисунке?



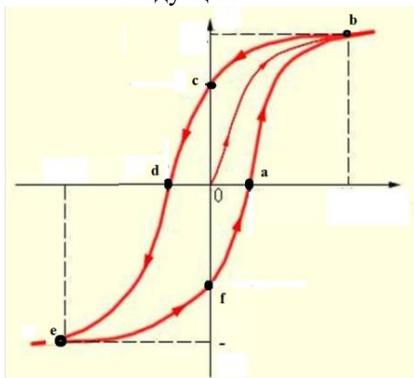
- A) Потенциальная диаграмма
- B) Вольт-амперная характеристика
- C) Петля гистерезиса
- D) Кривая размагничивания
- E) Векторная диаграмма

11. Какие точки на кривой намагничивания соответствует магнитному насыщению?



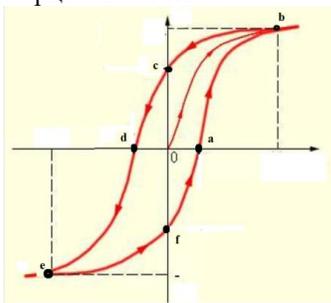
- A) a, d
- B) c, f
- C) b, e
- D) a, c
- E) d, f

12. Какие точки на кривой намагничивания соответствует остаточной магнитной индукции?



- A) a, d
- B) c, f
- C) b, e
- D) a, c
- E) d, f

13. Какие точки на кривой намагничивания соответствует коэрцитивной силе?



- A) a, d
- B) c, f
- C) b, e
- D) a, c
- E) d, f

14. Какую кривую называют петлей гистерезиса?

- A) Потенциальная диаграмма
- B) Вольт-амперная характеристика
- C) Кривую намагничивания
- D) Кривую размагничивания
- E) Векторная диаграмма

15. Какой буквой принято обозначать магнитный поток?

- A) B
- B) H
- C) Ф
- D) F
- E) μ

16. Какой буквой принято обозначать магнитную индукцию?

- A) B
- B) H
- C) Ф
- D) F
- E) μ

17. Какой буквой принято обозначать напряженность магнитного поля?

- A) B
- B) H

- C) Φ
- D) F
- E) μ

18. Какой буквой принято обозначать магнитную постоянную?

- A) B
- B) H
- C) Φ
- D) F
- E) μ

19. Какой буквой принято обозначать мдс?

- A) B
- B) H
- C) Φ
- D) F
- E) μ

20. Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи:

- A) $\sum \Phi = 0$
- B) $\sum F = \sum NI$
- C) $\sum \Phi = \sum BI$
- D) $\sum E = \sum F\omega$

21. Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи:

- A) $\sum \Phi = 0$
- B) $\sum F = \sum NI$
- C) $\sum \Phi = \sum BI$
- D) $\sum E = \sum F\omega$

22. Произведение числа витков катушки ω и протекающего по ней тока I называют:

- A) магнитодвижущая сила
- B) электродвижущая сила
- C) магнитный поток
- D) магнитная индукция
- E) магнитная проницаемость

23. Какой закон записан выражением $\sum \Phi = 0$?

- A) первый закон Кирхгофа

- В) второй закон Кирхгофа
- С) закон Джоуля- Ленца
- Д) закон полного тока
- Е) закон Ома

24. Какой закон записан выражением $\sum U_m = \sum I\omega$:

- А) первый закон Кирхгофа
- В) закон Джоуля- Ленца
- С) закон Ома
- Д) второй закон Кирхгофа
- Е) закон полного тока

25. Какая величина определяется по выражению $H = \frac{F}{l}$?

- А) напряжённость магнитного поля
- В) магнитодвижущая сила
- С) магнитный поток
- Д) магнитная индукция
- Е) магнитная проницаемость

26. Какая величина определяется по выражению $\Phi = BS$?

- А) напряжённость магнитного поля
- В) магнитодвижущая сила
- С) магнитный поток
- Д) магнитная индукция
- Е) магнитная проницаемость

27. Алгебраическая сумма магнитных потоков для любого узла магнитной цепи равна нулю.

- А) первый закон Кирхгофа
- В) закон Джоуля- Ленца
- С) закон Ома
- Д) второй закон Кирхгофа
- Е) закон полного тока

28. Алгебраическая сумма магнитного напряжения вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме м.д.с. вдоль того же контура:

- А) второй закон Кирхгофа

- В) закон Ома
- С) первый закон Кирхгофа
- Д) закон Джоуля- Ленца
- Е) нет правильного ответа

29. Алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна:

- А) падению магнитного напряжения
- В) алгебраической сумме м.д.с.
- С) нулю
- Д) сумме м.д.с вдоль того же контура
- Е) нет правильного ответа

30. Длина участка магнитной цепи определяется

- А) по внешней длине
- В) по внутренней длине
- С) по средней линии
- Д) произвольно
- Е) нет правильного ответа

31. Определить намагничивающую силу , если $H_1 \ell_1 = 800 \text{ A}$,

$$H_2 \ell_2 = 120 \text{ A}$$

- А) 0
- В) 360 A
- С) 920 A
- Д) 460 A

32. Какое выражение позволяет вычислить намагничивающую силу?

А) $U_m = H\ell$

В) $F = I\varpi$

С) $B = \frac{\Phi}{S}$

Д) $R_m = \frac{\ell}{\mu_0 \mu S}$

Е) $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$

33. Какое выражение позволяет вычислить магнитное напряжение?

A) $U_m = H\ell$

B) $F = I\varpi$

C) $B = \frac{\Phi}{S}$

D) $R_m = \frac{\ell}{\mu_0\mu S}$

E) $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$

34. Какое выражение позволяет вычислить напряженность магнитного поля в воздушном зазоре?

A) $U_m = H\ell$

B) $F = I\varpi$

C) $B = \frac{\Phi}{S}$

D) $R_m = \frac{\ell}{\mu_0\mu S}$

E) $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$

35. Какое выражение позволяет вычислить магнитное сопротивление?

A) $U_m = H\ell$

B) $F = I\varpi$

C) $B = \frac{\Phi}{S}$

D) $R_m = \frac{\ell}{\mu_0\mu S}$

E) $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$

36. Какое выражение позволяет вычислить магнитную индукцию?

A) $U_m = H\ell$

B) $F = I\varpi$

C) $B = \frac{\Phi}{S}$

D) $R_m = \frac{\ell}{\mu_0\mu S}$

E) $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$

37. Данное выражение позволяет вычислить $U_m = H\ell$:

A) магнитный поток

B) мдс

C) магнитное напряжение

D) магнитное сопротивление

E) магнитную индукцию

38. Данное выражение позволяет вычислить $R_m = \frac{\ell}{\mu_0\mu S}$:

A) магнитный поток

B) мдс

C) магнитное напряжение

D) магнитное сопротивление

E) магнитную индукцию

39. Данное выражение позволяет вычислить $B = \frac{\Phi}{S}$:

A) магнитный поток

B) мдс

C) магнитное напряжение

D) магнитное сопротивление

E) магнитную индукцию

40. Данное выражение позволяет вычислить $H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0}$:

- А) магнитный поток
- В) напряженность магнитного поля в воздушном зазоре
- С) магнитное напряжение
- Д) магнитное сопротивление
- Е) магнитную индукцию

4. Индивидуальное домашнее задание №1

Тема: Расчет магнитных цепей.

Цель работы: Получить навыки расчета магнитных цепей графо-аналитическим методом.

Задание: В магнитной цепи (рисунок 2.19) магнитная индукция в воздушном зазоре, имеющемся в правом стержне, равна

Во. Длинна воздушного зазора — ℓ_0 , число витков катушки — w .

Материал сердечника — электротехническая сталь.

1. Определить магнитные потоки во всех трех стержнях и магнитодвижущую силу катушки для двух случаев:

- а) с воздушным зазором;
- б) без воздушного зазора.

2. Определить магнитную индукцию в воздушном зазоре для заданного тока I .

Результаты вычислений оформить в виде таблицы.

Указание. Воспользоваться кривой намагничивания на рисунке 2.20. Исходные данные принять из таблицы 2.4

Таблица 2.4 – Исходные данные к индивидуальному заданию

Предпоследняя цифра варианта	C , мм	ℓ_0 , мм	Последняя цифра варианта	Bo , Т	I , А	w
1	35	0,4	1	0,2	4	100
2	40	0,4	2	0,3	1,5	200
3	45	0,5	3	0,4	4	300
4	50	0,5	4	0,2	1	400
5	55	0,6	5	0,3	0,5	500
6	60	0,6	6	0,4	20	100
7	65	0,7	7	0,2	2	200
8	70	0,7	8	0,3	1,3	300
9	75	0,8	9	0,4	5	400
10	80	0,8	0	0,1	0,2	500

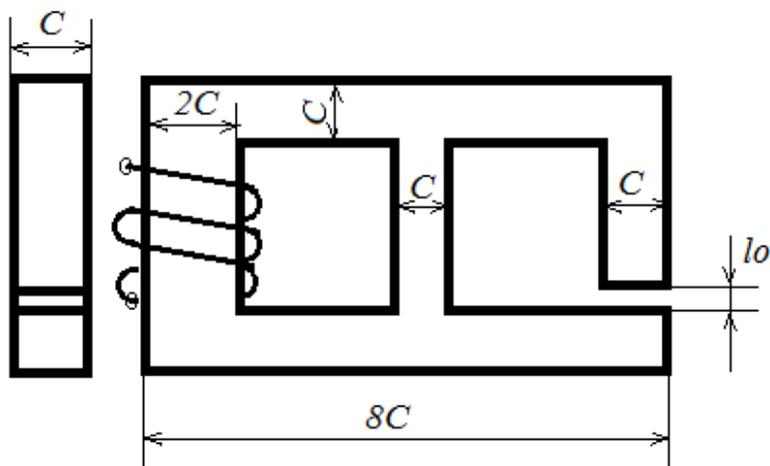
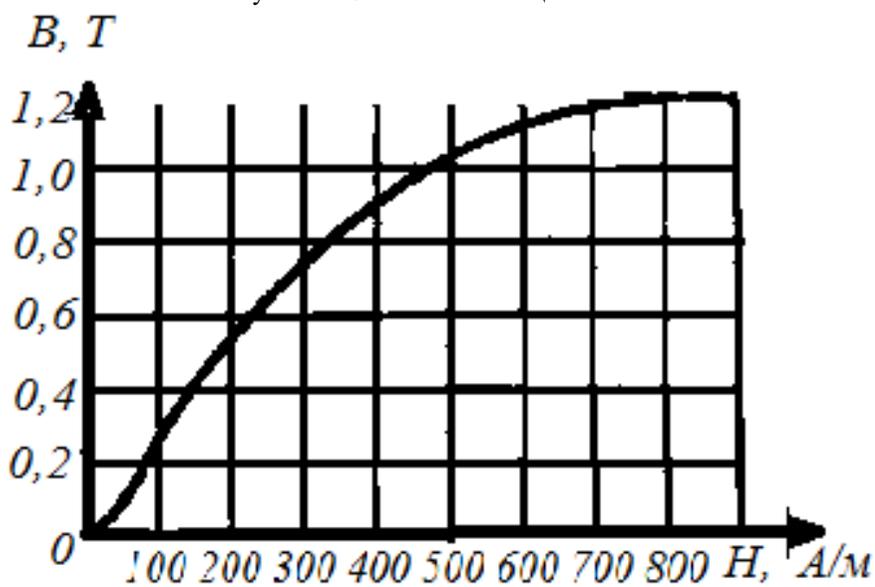
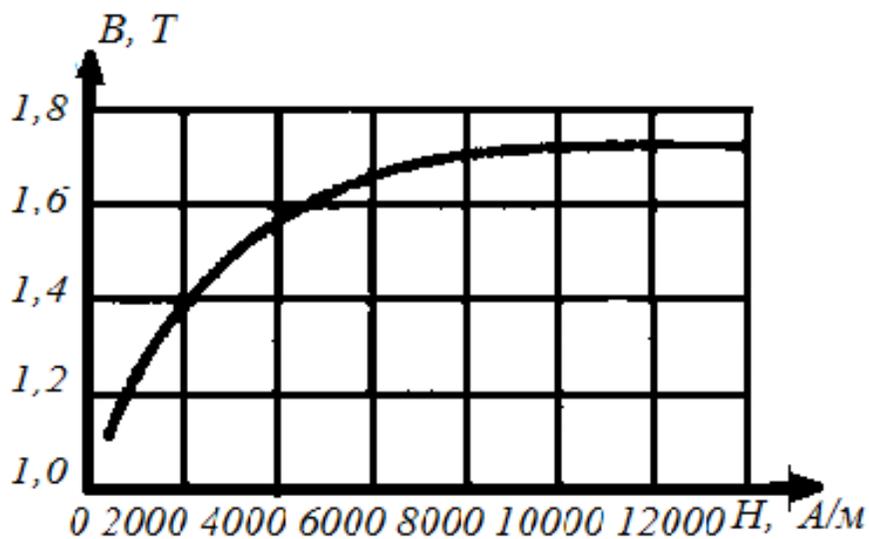


Рисунок 2.19 – Магнитная цепь



a)



б)
рис. 2.2 Кривая намагничивания

Заключение

Отрасль науки и техники, определяемая термином «электротехника», связана с применением электрических и магнитных явлений для практических целей. Эта отрасль охватывает очень широкий круг вопросов и задач, из числа которых можно выделить теоретические и прикладные, четкую границу между ними провести не просто.

Учебный курс «Теоретические основы электротехники 2» (ТОЭ 2) входит в учебные планы большой группы электроэнергетических и других технических образовательных программ. При подготовке бакалавров по образовательной программе 6В07101-Электроэнергетика изучением курса ТОЭ создается теоретическая база для изучения последующих прикладных учебных курсов, которые вместе составляют содержание образовательной программы.

Закончив изучение курса ТОЭ, можно приступить к изучению прикладных курсов по образовательной программе. Но, как показывает опыт, курс ТОЭ еще долго остается настольной книгой студентов, а затем и специалистов. Изучение электротехники, как и многих других технических наук, дается нелегко.

Список использованных источников

Основная:

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей.- М.: Энергоатомиздат., 1989,-528с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. -М.: Гардарики, 1999.-638 с.
3. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. – т.1.- СПб.: Питер, 2003.-463 с.
4. Теоретические основы электротехники. – т.1. Основы теории цепей. –М.: Высшая школа, 1976.-544 с.
5. Шебес М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей.- М.: Выш. Шк., 1990,-544 с.
6. Сборник задач по теоретическим основам электротехники/ Л.А. Бессонов, И.Г. Демидова, М.Е. Заруди и др. . –М. Высш.шк.,2003.-528 с.
7. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники. Под ред. П.А. Ионкина.- М.: Энергоиздат, 1982-768 с.

Дополнительная:

- 1 Попов В. С. Теоретическая электротехника.— М.: Энергоатомиздат, 1990. 544 с.
- 2 Нейман Р. Л., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники М.—Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд., 1981.—416 с.
- 3 Зевеке Г. В., Ионкин П. А. и др. Основы теории цепей. — М.: Энергия. 1975.—752 с.
- 4 Зернов Н.В. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 1972.—816 с.
- 5 Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 2001. —750 с.