

В.Л.Котов, М.Г.Донцов

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Электрические машины и аппараты. Основы промышленной
электроники*

Конспект лекций для студентов специальности 200503
«Стандартизация и сертификация»

Иваново 2009

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Ивановский государственный химико-технологический университет

В.Л.Котов, М.Г.Донцов

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Электрические машины и аппараты. Основы промышленной электроники

Конспект лекций для студентов специальности 200503
«Стандартизация и сертификация»

Иваново 2009

УДК 667.420

Электротехника и электроника. Электрические машины и аппараты. Основы промышленной электроники: Конспект лекций для студентов специальности 200503 «Стандартизация и сертификация» /Сост. В.Л.Котов, М.Г.Донцов; ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново, 2009 – 92 с.

Излагаются принципы работы магнитных цепей, трансформаторов, электрических машин и основ промышленной электроники в объеме, предусмотренном государственным образовательным стандартом по направлению «Метрология. Стандартизация и сертификация».

Конспект лекций предназначен для студентов дневного отделения, обучающихся по специальности 200503.

Рецензент:

кандидат технических наук, доцент Е.Л. Файн (Ивановская государственная текстильная академия)

Лекция 1. Магнитные цепи

Работа электрических машин и аппаратов, а также электроизмерительных приборов основана на использовании электромеханического и индукционного действий магнитного поля.

Чтобы использовать эти явления в рабочем объеме названных электротехнических устройств, необходимо создать магнитное поле заданной интенсивности и конфигурации.

Часть электротехнического устройства, содержащая ферромагнитные тела, предназначенная для создания магнитного поля, называется **магнитной цепью**.

Магнитная цепь состоит из элементов, возбуждающих магнитное поле, которые называются **источником магнитодвижущей силы (МДС)** и **магнитопровода**. Источниками магнитодвижущей силы могут быть постоянные магниты или катушки с током. Магнитопровод – ферромагнитный сердечник, который создает замкнутый путь для магнитных силовых линий поля.

Конструктивно магнитные цепи могут быть разветвленными и неразветвленными, однородными и неоднородными, с одним или несколькими источниками МДС (рис. 1.1).

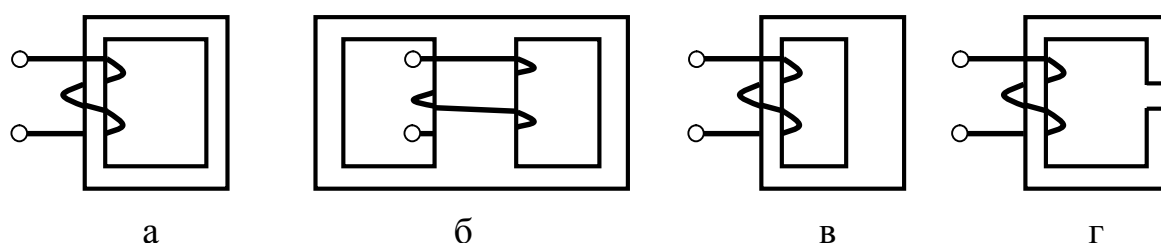


Рис. 1.1. Магнитная цепь с одним источником МДС:

а, в, г – неразветвленные; б – разветвленная; в – неоднородная (правый стержень магнитопровода имеет большее сечение); г – неоднородная (магнитная цепь имеет воздушный зазор).

1.1. Основные характеристики магнитного поля

Основной величиной, характеризующей интенсивность магнитного поля, является магнитная индукция ***B***. Величина магнитной индукции численно равна силе, с которой магнитное поле действует на проводник длиной 1 м, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям, по которому протекает ток в 1 А. В системе СИ магнитная индукция измеряется в теслах, 1

Тл (тесла) = $1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$. Магнитная индукция величина векторная, ее направление в любой точке магнитного поля совпадает с направлением касательной к магнитной силовой линии. Магнитная индукция определяет интенсивность поля в заданной точке пространства, поэтому она является точечной

характеристикой поля. При расчете электротехнических устройств наряду с точечной характеристикой магнитного поля пользуются, объемной характеристикой - **магнитным потоком Φ** .

Магнитный поток Φ , пронизывающий площадку S , расположенную перпендикулярно силовым линиям поля, определяется как:

$$\Phi = BS. \quad (1.1)$$

В системе СИ магнитный поток измеряется в веберах (Вб), $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$. Магнитная индукция, создаваемая проводниками, по которым течет ток, зависит от величины токов, геометрических размеров проводников и от свойств среды, в которой создается поле.

$$B = \mu_a H, \quad (1.2)$$

где H – напряженность магнитного поля, величина, зависящая от тока и геометрических размеров проводников; μ_a – магнитная проницаемость – величина, характеризующая свойства среды, в которой создается магнитное поле. В системе СИ напряженность магнитного поля измеряется в амперах на метр, а магнитная проницаемость в генри на метр.

1.2. Намагничивание ферромагнитных материалов

Магнитная индукция, образованная данным током в вакууме, отличается от индукции, образованной тем же током в ферромагнитной среде из-за ее намагничивания:

$$B = B_0 + B_{\text{ср}}, \quad (1.3)$$

где B_0 – индукция, создаваемая током в вакууме; $B_{\text{ср}}$ – индукция, создаваемая намагниченной средой.

Сущность намагничивания среды состоит в ориентации спиновых магнитных моментов во внешнем поле. Степень намагничивания характеризуется вектором **намагниченности \mathbf{J}** – магнитным моментом элементарных токов, отнесенных к единице объема вещества.

Если магнитная индукция, создаваемая данным током в вакууме, равна:

$$B_0 = \mu_0 H, \quad (1.4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость вакуума, то магнитная индукция, создаваемая тем же током в ферромагнитной среде, будет:

$$B = \mu_0 (H + J) = \mu_0 H + \mu_0 J. \quad (1.5)$$

Следовательно, ферромагнитная среда при намагничивании усиливает магнитную индукцию, создаваемую током. Усиление индукции будет тем больше, чем больше намагниченность ферромагнетика. Свойство ферромагнитных материалов усиливать магнитное поле характеризуется относительной магнитной проницаемостью μ_r . Она показывает, во сколько раз магнитная индукция \mathbf{B} , создаваемая данным током в данном ферромагнитном материале, больше магнитной индукции \mathbf{B}_0 , создаваемой тем же током в вакууме:

$$\mu_r = \frac{B}{B_0}. \quad (1.6)$$

Иными словами, относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз ферромагнитный материал способен усилить магнитное поле.

В электротехнике для усиления магнитных полей используют ферромагнитные материалы с относительной проницаемостью 700 – 800 000. Их характерной особенностью является сильная зависимость магнитной индукции от напряженности внешнего поля.

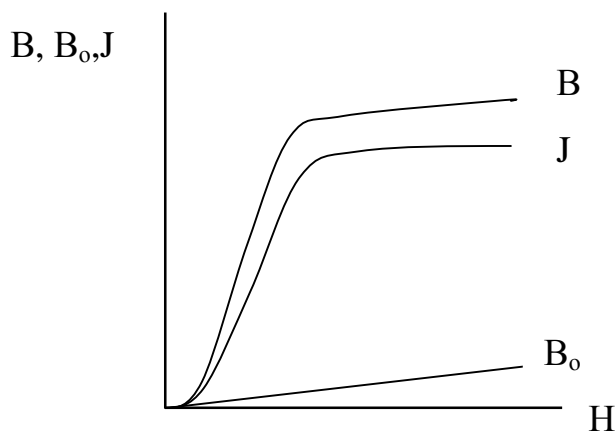


Рис. 1.2. Зависимость магнитной индукции в вакууме B_0 , намагниченности ферромагнетика J , и магнитной индукции B от напряженности H внешнего поля

Как видно из рис. 1.2, намагниченность ферромагнитного материала быстро растет в слабых полях, а когда все спиновые моменты будут сориентированы вдоль внешнего поля, ее рост прекращается.

Зависимость $B=f(H)$ называется кривой первоначального намагничивания. В слабых полях индукция B увеличивается за счет намагничивания ферромагнетика, а когда он намагнитится до насыщения, индукция растет только за счет B_0 , создаваемой внешним полем.

Кривая первоначального намагничивания позволяет определить абсолютную μ_a и относительную μ_r магнитные

проницаемости при заданной напряженности внешнего поля:

$$\mu_a = \frac{B}{H} \quad \text{и} \quad \mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_0} \quad (1.7)$$

знание которых, необходимо при практических расчетах электромагнитных устройств. Кривые первоначального намагничивания ферромагнитных

материалов, выпускаемых для электротехнической промышленности, можно найти в электротехнических справочниках.

Если после намагничивания ферромагнитного материала до насыщения и достижения максимальной индукции B_m уменьшать напряженность внешнего поля до 0, то магнитная индукция будет уменьшаться по кривой 1-2 и не будет совпадать с кривой первоначального намагничивания 0-1 (рис.1.3).

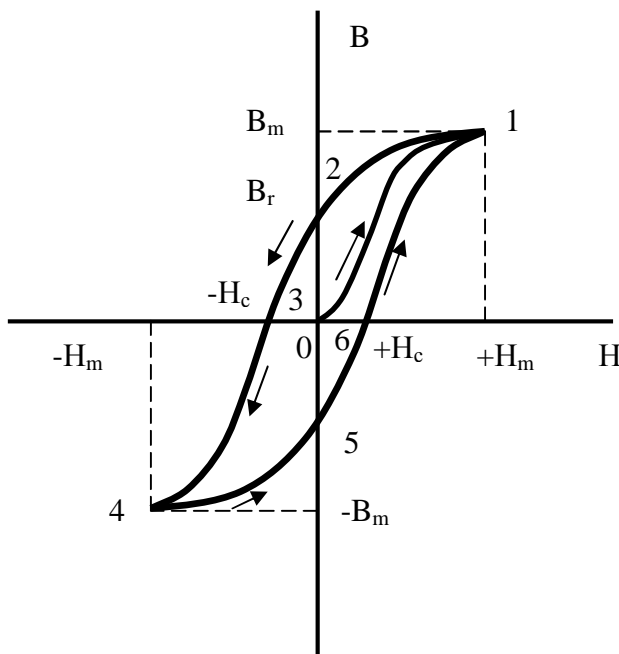


Рис. 1.3. Петля гистерезиса

При напряженности внешнего поля $H=0$ магнитная индукция $B \neq 0$, а достигает некоторого значения B_r , которое называется остаточной индукцией. Таким образом, размагничивание ферромагнитной среды отстает от изменения напряженности внешнего поля. Явление отставания изменения магнитной индукции от изменения напряженности внешнего поля называется **магнитным гистерезисом**.

Для того чтобы полностью размагнитить ферромагнитный материал, необходимо создать поле противоположного направления напряженностью $-H_c$.

Значение напряженности внешнего поля, при которой ферромагнетик полностью размагнитится, называется **коэрцитивной силой** $-H_c$. При изменении напряженности поля от $-H_c$ до $-H_m$ ферромагнетик будет опять намагничиваться по кривой 3-4, достигая максимальной индукции $-B_m$, а при изменении напряженности поля от $-H_m$ до 0 он вновь будет размагничиваться до значения индукции $-B_r$, а при достижении напряженности поля $+H_c$ он вновь будет полностью размагнитен. Дальнейшее намагничивание ферромагнитного материала пойдет по кривой 6-1.

Замкнутая кривая, характеризующая изменение магнитной индукции в зависимости от напряженности внешнего поля, называется **петлей гистерезиса**. Ее площадь пропорциональна энергии, которая затрачивается на один цикл перемагничивания единицы объема ферромагнитного материала.

1.3. Основные ферромагнитные материалы

В зависимости от величины коэрцитивной силы ферромагнитные материалы делят на магнитомягкие $H_c < 400$ А/м и магнитожесткие $H_c > 400$ А/м.

Магнитомягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса, что говорит о малых потерях на перемагничивание; индукция насыщения B_m у таких материалов велика и лишь незначительно отличается от остаточной

индукции B_r , а коэрцитивная сила H_c мала, поэтому они легко перемагничиваются.

Самым распространенным магнитомягким материалом является листовая **электротехническая сталь**, которая применяется для изготовления магнитопроводов электрических машин и аппаратов. Для уменьшения вихревых токов, возникающих в магнитопроводах при работе в переменных магнитных полях, вводят в ее состав при варке до 4,5% кремния.

Магнитопроводы, работающие в слабых магнитных полях, должны иметь большую относительную магнитную проницаемость на начальном участке кривой намагничивания - $\mu_{a \text{ нач}}$. Этому требованию в наибольшей степени удовлетворяют железо-никелевые сплавы с добавками молибдена или ванадия, которые называются **пермаллоями**.

Для получения очень сильных магнитных полей применяют железо-кобальтовые сплавы, называемые **пермендюррами**. Они позволяют получать магнитные поля с индукцией насыщения до 2,5 Тл.

Магнито жесткие материалы имеют высокую остаточную индукцию и коэрцитивную силу и применяются для изготовления постоянных магнитов. Наиболее распространены магнито жесткие сплавы Fe-Ni-Al (альни), Fe-Ni-Al-Co (альнико), Fe-Ni-Al-Si (альнисии), которые обладают коэрцитивной силой до 200 кА/м и магнитной энергией в зазоре между полюсами магнита свыше 80 кДж/м³. Для работы в ответственной аппаратуре применяют постоянные магниты из сплавов кобальта с самарием, гадолинием и диспрозием, которые обладают высочайшими магнитными характеристиками, но очень дороги. Широкое распространение получили также магниты из порошков, которые получают прессованием порошков сплавов альни, альнико и кобальт-самарий, а также магниты из ферритов бария и кобальта.

Особую группу магнитных материалов составляют магнитомягкие материалы со специальными свойствами. Наиболее распространены в этой группе материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, которые применяют в вычислительной технике, т. к. они четко и быстро переходят из одного магнитного состояния $-B_m$ в другое $+B_m$. К этой группе относятся также **термомагнитные и магнитострикционные материалы**. Термомагнитные материалы (сплавы никеля с медью) изменяют свои свойства при изменении температуры и применяются в измерительной технике для компенсации влияния температуры на показания приборов. Магнитострикционные материалы изменяют геометрические размеры под действием внешнего магнитного поля и применяются в генераторах акустических колебаний звуковой и ультразвуковой частот.

1.4. Закон полного тока

Свойство тока создавать магнитное поле называется **намагничивающей силой тока Θ** . В системе СИ намагничивающая сила измеряется в амперах.

Закон полного тока гласит: интеграл от напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру равен алгебраической сумме токов, пронизывающих этот контур.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i = \Theta, \quad (1.8)$$

где i – номер тока; n – количество токов; l – средняя длина силовой линии.

Положительными считаются токи, направления магнитных полей которых совпадают с направлением обхода контура. Положительные направления тока и магнитного поля, создаваемого этим током, связаны правилом правостороннего винта. Если положительное направление тока совпадает с направлением поступательного движения винта, то направление его вращения совпадает с положительным направлением магнитного поля.

В большинстве электромагнитных устройств напряженность поля вдоль силовой линии изменяется в зависимости от свойств участков, по которым она проходит. В таких случаях магнитная цепь разбивается на ряд однородных участков, в пределах которых условия прохождения магнитных силовых линий не меняются (рис. 1.4).

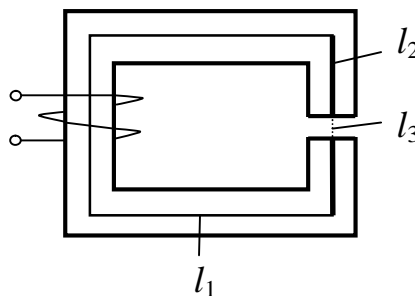


Рис. 1.4. Неоднородная магнитная цепь
(выделены однородные участки: l_1, l_2, l_3).

В этом случае интеграл по замкнутому контуру можно заменить суммой интегралов по отдельным участкам. Учитывая, что в реальных устройствах для создания полей используются катушки с токами, намагничивающая сила которых:

$$\Theta = I w \quad (1.9)$$

где w – число витков катушки,
закон полного тока может быть записан следующим образом:

$$I w = \int_0^{l_1} H_1 dl_1 + \int_0^{l_2} H_2 dl_2 + \int_0^{l_3} H_3 dl_3. \quad (1.10)$$

Так как в пределах каждого участка напряженность поля не меняется, после интегрирования получим:

$$I w = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3. \quad (1.11)$$

Если магнитная цепь однородна, тогда $I w = H l$ и

$$H = \frac{I w}{l} \quad (1.12)$$

т. е. напряженность магнитного поля — есть намагничивающая сила, приходящаяся на единицу длины силовой линии.

1.5. Расчет неразветвленной магнитной цепи с одним источником намагничивающей силы

При расчете магнитных цепей размеры магнитопровода и марка стали, из которой он изготовлен, должны быть известны. Свойства стали описываются кривой намагничивания, которую находят в справочнике по заданной марке. При этом различают прямую и обратную задачи. При решении прямой задачи по заданной величине магнитного потока или индукции требуется определить величину намагничивающей силы, которая необходима для их создания. При решении обратной задачи по заданной величине намагничивающей силы необходимо определить величину магнитного потока. При этом считают, что магнитный поток замыкается только по магнитопроводу, выпучиванием магнитных силовых линий у неоднородных цепей с воздушным зазором пренебрегают.

а) прямая задача

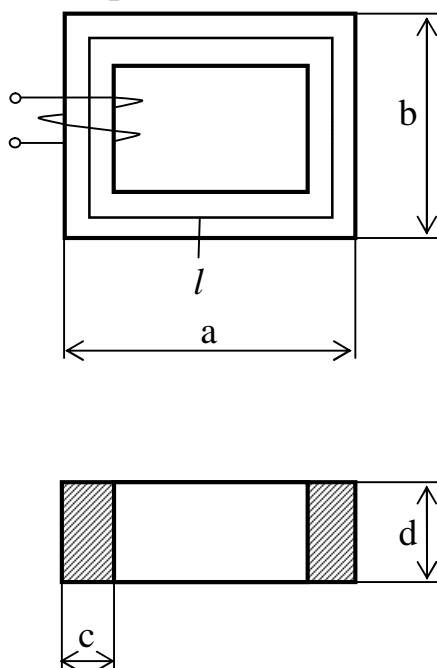


Рис. 1.5а. Чертеж магнитопровода

Дано: магнитный поток Φ , геометрические размеры магнитопровода и кривая намагничивания (рис. 15а и 15б).

Определить величину тока в катушке, имеющей w витков для создания потока Φ .

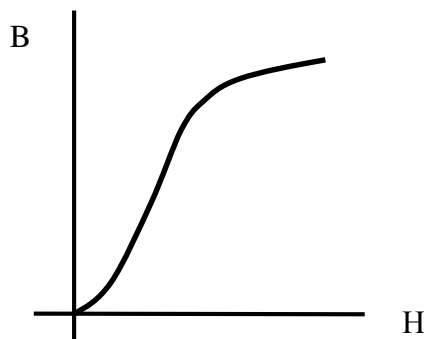


Рис. 1.5б. Кривая намагничивания