

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ.

Работа трансформаторов, электрических машин и многих других современных электротехнических устройств основывается на использовании электромеханического и индукционного действия магнитного поля.

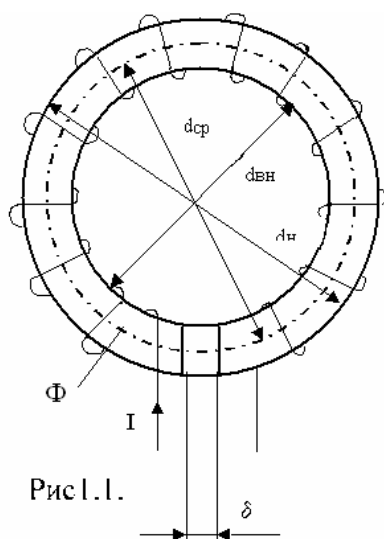
Первое из них заключается в том, что на проводник с током или на ферромагнитное тело, помещенное в магнитное поле, действует электромеханическая сила. Величина и направление этой силы зависит от интенсивности и направления силовых линий поля, которые в каждой точке поля характеризуются вектором магнитной индукции

Индукционное действие поля связано с созданием индуктированной напряженности и ЭДС в контуре при изменении его потокосцепления.

Чтобы использовать явления электромеханического и индукционного действий магнитного поля в рабочем объеме устройства создаётся необходимое магнитное поле. Часть электротехнического устройства, предназначенная для создания в его рабочем объеме магнитного поля заданной интенсивности и конфигурации называется магнитной цепью.

Магнитная цепь содержит ряд тел и сред, образующих замкнутые пути для основной части силовых линий созданного поля - магнитопровод и элементы, возбуждающие магнитное поле. Применяя на отдельных участках Ферромагнитные материалы с различными магнитными свойствами и геометрическими формами можно решать задачи усиления поля и придания ему необходимой конфигурации в рабочем объеме электромагнитного устройства.

Магнитные цепи, так же как и электрические, подразделяются на группы. Они могут содержать один или несколько элементов, возбуждающих магнитное поле, быть разветвлёнными и неразветвлёнными, работать с постоянными и переменными намагничивающими силами и т.д.



Основы расчета магнитных цепей с постоянными намагничивающими силами.

На рис 1.1 приведена схема неразветвлённой магнитной цепи, состоящей из кольцевого магнитопровода с равномерно размещённой на нём катушкой с числом витков w . Предположим вначале, что магнитопровод замкнут (воздушный зазор отсутствует). В этом случае имеем дело с однородной магнитной цепью.

Произведение тока проходящего через обмотку на число витков носит название намагничивающей силы

$$F = I \cdot W [A].$$

При $d_{вн} \approx d_{н}$ поле внутри катушки будет практически равномерным и напряженность поля определяется выражением

$$H = \frac{F}{l_{cp}} = \frac{F}{2\pi r_{cp}} \quad [A/m]$$

где l_{cp} - длина средней линии магнитопровода.

Следует заметить, что напряженность магнитного поля кольцевого магнитопровода не зависит от магнитных свойств материала сердечника и равна его намагничивающей силе, приходящейся на единицу длины средней линии магнитопровода.

Магнитная индукция в сердечнике определяется формулой

$$B = \mu \mu_0 H \quad [Тл],$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Ом С/м - магнитная постоянная, равная магнитной проницаемости вакуума, μ - относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Магнитный поток в сердечнике

$$\Phi = BS \quad Вб,$$

где S - площадь поперечного сечения магнитопровода.

Если значения Φ , B , H остаются неизменными по всей длине средней линии магнитопровода, то магнитная цепь носит название цепи с однородным магнитопроводом. Если это условие не выполняется, то магнитопровод - неоднородный.

При расчете магнитных цепей может быть поставлена прямая задача, т.е. задача определения намагничивающей силы, необходимой для создания заданного магнитного потока Φ на каком либо участке магнитопровода или обратная задача, когда по заданной намагничивающей силе требуется определить потоки на отдельных участках цепи.

Эти задачи могут быть в принципе решены на основе формулы, по своей структуре аналогичной формуле закона Ома для цепи, состоящей из последовательно соединённых источника ЭДС E и электрического сопротивления R ($I = E/R$):

$$\Phi = \frac{F}{R_m},$$

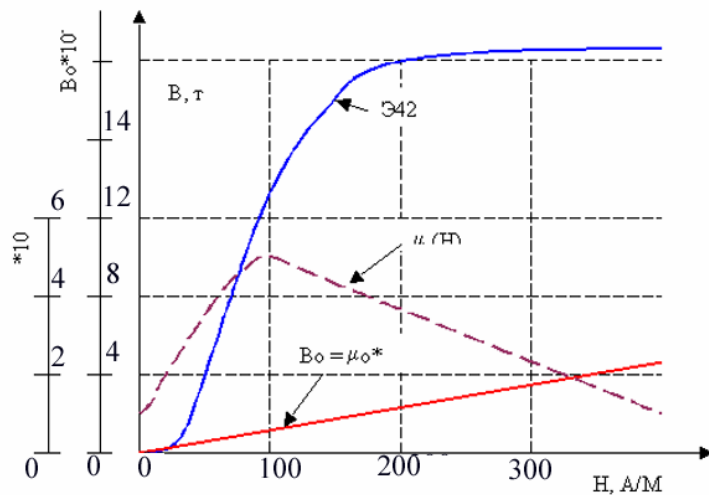
т.е. магнитный поток равен намагничивающей силе, делённой на магнитное сопротивление. При этом магнитное сопротивление

$$R_m = \frac{l_{cp}}{\mu \mu_0 S} \quad 1/\text{Ом С}$$

уменьшается с увеличением магнитной проницаемости материала сердечника. Поскольку $F = Iw$, то чем меньше магнитное сопротивление материала магнитопровода, тем меньше требуется пропускать ток через обмотку возбуждения для получения заданного магнитного потока Φ .

Однако для цепей с ферромагнитными сердечниками магнитная проницаемость не является величиной постоянной в силу нелинейной зависимости

$B(H)$, носящей название кривой намагничивания материала. На (рис. 1.2.)



приведена первоначальная кривая намагничивания электротехнической стали Э42. Это кривая, снятая для первоначально размагниченного материала, имеет так называемую область насыщения материала, где индукция мало изменяется при существенном изменении напряженности H . На том же рисунке приведена линейная зависимость индукции от напряженности поля в вакууме

Рис1.2.

$B_0 = \mu_0 H$ и зависимость относительной магнитной проницаемости материала от напряженности магнитного поля $\mu = B/\mu_0 H$. Достаточно высокая крутизна изменения μ с изменением H дает возможность строить на базе таких цепей усилители слабых сигналов (магнитные усилители). Максимальная магнитная проницаемость материала достигает величин порядка 5000.

С использованием первоначальной кривой намагничивания материала можно осуществить следующие алгоритмы решения прямой и обратной задачи для однородной неразветвлённой магнитной цепи

прямая задача: $\Phi \rightarrow B = \Phi/S \rightarrow H$ по кривой $B(H) \rightarrow F = H l_{cp}$;

обратная задача $F \rightarrow H = F/l_{cp} \rightarrow B$ по кривой $B(H) \rightarrow \Phi = BS$.

Пусть теперь кольцевой магнитопровод имеет воздушный зазор. Такая магнитная цепь является неразветвлённой и неоднородной. Магнитопровод при этом имеет 2 участка: участок из ферромагнитного материала длиной $l_1 = l_{cp} - \delta$ и воздушный зазор величиной δ . Выражение для закона Ома для такой цепи можно представить в виде

$$\Phi = \frac{F}{R_M + R_M^0},$$

где $R_M = \frac{l_1}{\mu_0 \mu S}$ - магнитное сопротивление участка магнитопровода,

$R_M^0 = \frac{\delta}{\mu_0 S}$ - магнитное сопротивление воздушного зазора ($\mu_B = 1$).

Здесь, строго говоря $S_0 \neq S$ вследствие эффекта вспучивания силовых линий в зазоре. На границе раздела двух сред силовые линии выходят нормально к поверхности раздела.

Из приведенного выражения следует, что:

- магнитное сопротивление неоднородной неразветвленной цепи равно сумме магнитных сопротивлений её последовательных участков,

-т.к. $\mu_B=1$, то магнитное сопротивление воздушного зазора весьма велико и сильно снижают величину магнитного потока в сердечнике. Поэтому наличие воздушного зазора в магнитопроводе требует значительного увеличения намагничивающей силы для создания одного и того же магнитного потока по сравнению с цепью, имеющей магнитопровод без воздушного зазора.

В силу нелинейной зависимости $B(H)$ закон Ома для расчета таких цепей применить трудно, поэтому при расчете используются кривые намагничивания материала.

В случае прямой задачи по заданному магнитному потоку участков магнитопровода Φ , размерам участков S_k , l_k и кривым намагничивания $B_k(H_k)$ определяют намагничивающую силу F . Задача решается для каждого участка по схеме

$$\Phi \rightarrow B_k = \Phi / S_k \rightarrow H_k \text{ по кривой } B_k(H_k) \rightarrow F = \sum H_k l_k.$$

Решение обратной задачи сводится к многократному решению прямой задачи расчета, т.е. задаются значением Φ' и находят F' . Если оно не подходит, то выбирают другое значение Φ'' и находят F'' и т.д.