

# Магнитные цепи

Смирнова Юлия 2/36

A decorative graphic element consisting of several horizontal lines of varying lengths and colors (teal, light blue, white) extending from the right side of the slide.

# Определение

- **Магнитная цепь** — последовательность взаимосвязанных магнетиков, по которым проходит **магнитный** поток. При расчётах **магнитных цепей** используется почти полная формальная аналогия с электрическими **цепями**. В схожем математическом аппарате также присутствует закон Ома, правила Кирхгофа и другие термины и закономерности.

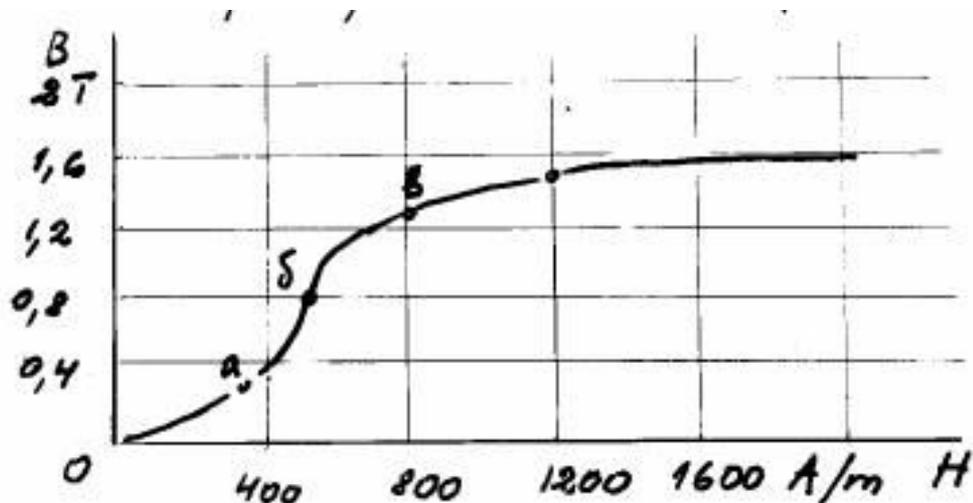
- Электрический ток связан с магнитным полем. Основными величинами, характеризующими магнитное поле, являются: магнитный поток, магнитная индукция и напряженность магнитного поля.
- В качестве силовой характеристики магнитного поля вводится векторная величина  $B$ , называемая **индукцией магнитного поля** или просто **индукцией**. Модуль вектора индукции магнитного поля равен отношению магнитной силы  $F$ , направленной вдоль радиуса-вектора, соединяющего точечные заряды, к произведению заряда  $Q$  на его скорость  $v$  при условии, что заряд движется перпендикулярно вектору индукции:  
$$B = F / (Qv)$$

- Единицу индукции магнитного поля называют тесла (Тл): 1 Тл - это индукция поля, которое действует на заряд 1 Кл, движущийся со скоростью 1 м/с перпендикулярно вектору индукции, с поперечной силой 1 Н.
- Напряженностью  $H$  магнитного поля называют величину: 
$$H = \frac{B_0}{\mu_0}$$
- Другой важной характеристикой магнитного поля является величина, называемая магнитным потоком:  $\Phi = BS$ . Единицу магнитного потока называют вебер (Вб): 1 Вб - магнитный поток, пронизывающий поверхность площадью 1 метр кв., расположенную перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией 1 Тл.
- Напряженность магнитного поля связана с магнитной индукцией соотношением 
$$B = \mu H$$

# Намагничивание ферромагнетиков

- Зависимости от значений относительной магнитной проницаемости материалы разделяются так:
  - диамагнитные материалы ( $\mu < 1$ )
  - парамагнитные материалы ( $\mu > 1$ )
  - ферромагнитные материалы, для которых  $\mu$  может достигать значений в десятки тысяч. Они имеют исключительно важную роль в электротехнике.
- Во внешнем магнитном поле элементарные магниты ферромагнитного материала (домены) будут ориентироваться в направлении внешнего поля. Когда прекратится рост доменов и их ориентация, наступит состояние предельной намагниченности ферромагнетика, называемое магнитным насыщением (рис.1). Кривую  $B(H)$  можно разделить на четыре участка:

- Рис.1

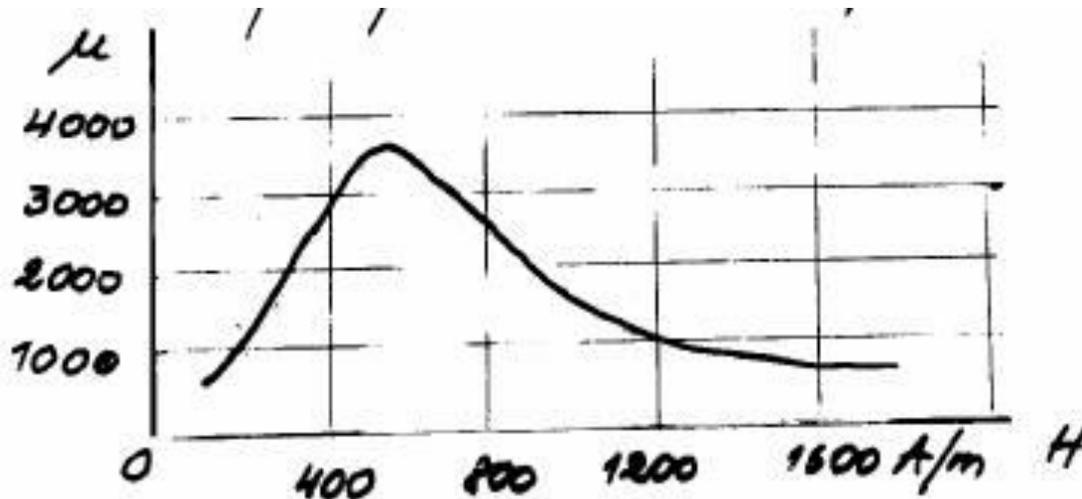


- почти линейный участок  $Oa$ , соответствующий малым напряжёностям магнитного поля, показывает, что магнитная индукция увеличивается относительно медленно и почти пропорционально напряжённости поля;

- почти линейный участок аб, на котором магнитная индукция  $B$  растёт также пропорционально напряжённости поля, но значительно быстрее, чем на начальном участке;
- участок бв – колено кривой намагничивания, который характеризует замедление роста индукции  $B$ ;
- участок магнитного насыщения – участок, расположенный выше точки в, здесь зависимость  $B = f(H)$  снова линейная, но рост индукции очень сильно замедлен по сравнению со вторым. Магнитная индукция, которая соответствует намагниченности насыщения, называется индукцией насыщения.

- Таким образом, зависимость магнитной индукции от напряжённости поля у ферромагнитного материала достаточно сложна и не может быть выражена простой расчётной формулой. Поэтому при расчёте магнитных цепей, содержащих ферромагнетики, применяют, снятые экспериментально, кривые намагничивания
- $B = f(H)$ . Одна из таких кривых показана на рис.1.
- Кривая изменения магнитной проницаемости  $\mu = f(H)$  для ферромагнитного материала дана на рис.2. Как видно из графика, магнитная проницаемость с ростом напряжённости поля изменяется в довольно широких пределах, что затрудняет её применение для расчётов.

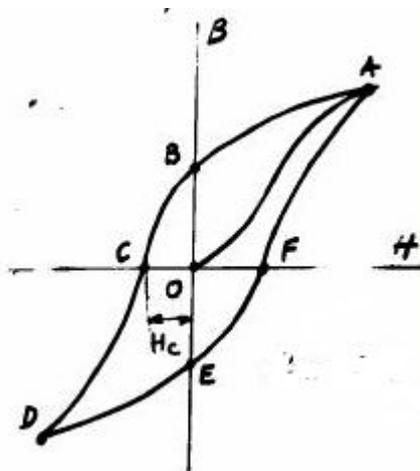
Рис.2



# Циклическое перемагничивание. Магнитный гистерезис.

- Если увеличивать напряжённость магнитного поля от нуля до некоторого наибольшего значения, то магнитная индукция увеличивается примерно по кривой, показанной на рис.1, и достигает соответствующего максимального значения – индукции насыщения. Если затем напряжённость поля уменьшается, то и магнитная индукция уменьшается, но при соответствующих значениях напряжённости поля магнитная индукция несколько больше, чем была при увеличении напряжённости (рис.3).

Рис.3



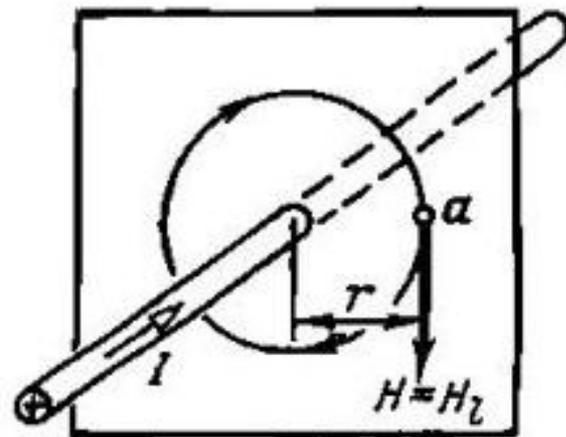
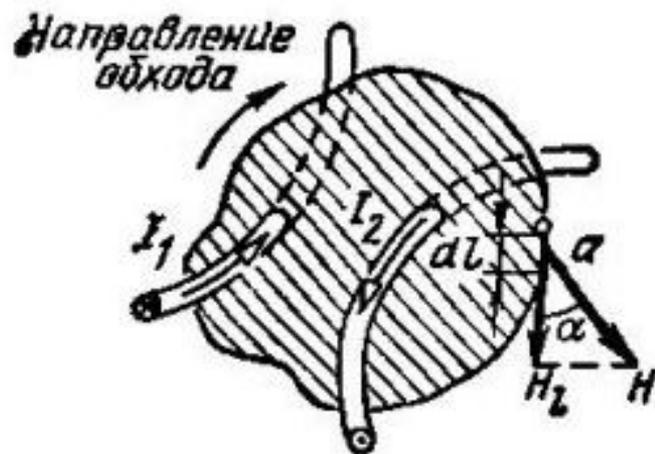
- Кривая уменьшения магнитной индукции (участок АВ) располагается выше кривой начального намагничивания (выше кривой ОА). При нулевых значениях напряжённости поля магнитная индукция имеет некоторое значение  $O_B$ , называемое остаточной индукцией.
- Таким образом, магнитная индукция в ферромагнитном материале зависит не только от напряжённости поля, но и от предшествующего состояния ферромагнетика. Это явление называется гистерезисом.  $H_c$  называется коэрцитивной силой. Величина коэрцитивной силы зависит от свойств ферромагнетика. Ферромагнетики с малой коэрцитивной силой называются мягкими. Они имеют узкую петлю гистерезиса и применяются для изготовления сердечников трансформаторов, в статорах и роторах электродвигателей и генераторов тока. Ферромагнетики с большой коэрцитивной силой имеют широкую петлю гистерезиса. Их называют жёсткими. В отличие от мягких жёсткие ферромагнетики перемагничиваются с трудом.

# Характеристика ферромагнетиков (магнитомягкие и магнитотвердые)

- Перемагничивание ферромагнитного материала связано с расходом энергии на этот процесс. Как уже указывалось, площадь петли гистерезиса характеризует энергию, выделяемую в единице объема ферромагнетика за один цикл перемагничивания. В зависимости от величины этих потерь и соответственно формы петли гистерезиса ферромагнитные материалы подразделяются на магнитомягкие и магнитотвердые. Первые характеризуются относительно узкой петлей гистерезиса и круто поднимающейся основной кривой намагничивания; вторые обладают большой площадью гистерезисной петли и полого поднимающейся основной кривой намагничивания.
- Магнитомягкие материалы (электротехнические стали, железоникелевые сплавы, ферриты) определяют малые потери в сердечнике и применяются в устройствах, предназначенных для работы при переменных магнитных потоках (трансформаторы, электродвигатели и др.). Магнитотвердые материалы (углеродистые стали, вольфрамные сплавы и др.) используются для изготовления постоянных магнитов.

# Закон полного тока

Данный постулат характеризует взаимосвязь между током электрической цепи и магнитным полем, появляющимся в связи с протеканием этого тока.



Контур с проводниками под током

Для понимания закона полного тока необходимо представить некоторое число проводников, по которым протекает электрический ток. Множество проводников охватывает некоторый контур, и, соответственно, ограничивает мнимую поверхность  $S$ , согласно картинке выше. Направление обхода контура, согласно правилу буравчика, ориентировано по ходу часовой стрелки. Поскольку множество токов является величиной дискретной, то закон полного тока определяется как связь суммарного электрического тока через закольцованный контур  $L$  и напряженности магнитного поля, сформированного этим током, и **определяется по формуле:**

$\oint_L H dl = I_{\Sigma}$ , где:

- ⚡  $H$  – вектор напряженности магнитного поля;
- ⚡  $dl$  – направленный элементарный линейный участок, взятый вдоль контура;
- ⚡  $I_{\Sigma}$  – суммарная сила тока.

Сущностью закона полного тока является то, что передвижение вектора напряженности магнитного поля по кольцевому контуру приравнивается сумме всех токов, которые находятся в этом контуре. Это выражение является интегральной формой закона полного тока.

Если заданный контур пронизывает непрерывный пространственный поток движущихся заряженных частиц с плотностью электрического тока  $J$ , **то общая величина тока, проходящего сквозь площадку, измеряется по выражению:**

$I_{\Sigma} = \int_{\Sigma} J dS$ , где  $dS$  – элементарная площадка контура  $S$ .

Произведение  $J dS$  характеризует поток вектора плотности тока  $J$ , проходящего через поверхность  $dS$ .

Помимо интегральной формы, применяется дифференциальная форма закона полного тока. С целью получения дифференциальной формы выражения полного тока следует заменить интеграл по контуру  $L$  на интеграл по площади  $S$ . **Поскольку теорема Стокса в векторном анализе выражается как:**

$$\int_L A dl = \int_S \text{rot} A dS, \text{ то } \int_L H dl = \int_S \text{rot} H dS.$$

**Объединив эти выражения с законом полного тока, в интегральной форме получается:**

$$\int_S \text{rot} H dS = \int_S J dS.$$

Поскольку контур  $L$  взят произвольным образом, то интегралы в левой и правой частях выражения равны, если равны подынтегральные выражения. **Исходя из этого, выражение преобразовывается в:**

$$\text{rot} H = J.$$

Данной формулой выражается закон полного тока в дифференциальной форме.

## 1. «Прямая» задача для неразветвленной магнитной цепи

Решение задач подобного типа осуществляется в следующей последовательности

1. Намечается средняя линия (см. пунктирную линию на рис.3.27), которая затем делится на участки с одинаковым сечением магнитопровода.
2. Исходя из постоянства магнитного потока вдоль всей цепи определяются значения индукции для каждого  $i$ -го участка:

$$B_i = \frac{\Phi}{S_i}$$

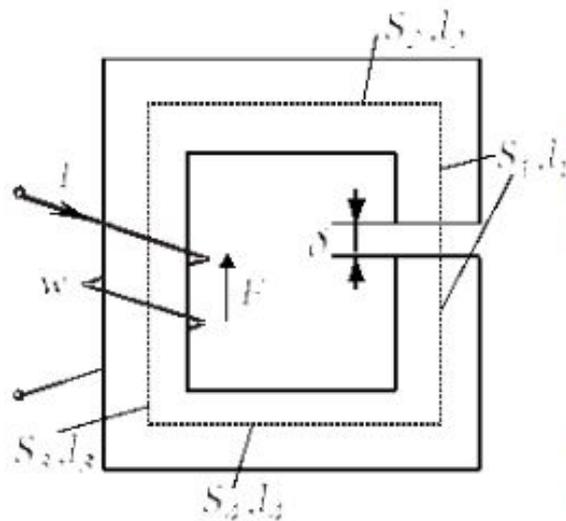


Рис. 3.27

3. По кривой намагничивания для каждого значения  $B_i$  находятся напряженности  $H_i$  на ферромагнитных участках; напряженность поля в воздушном зазоре определяется согласно формуле

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = 0,796 \cdot 10^6 \text{ Вб}.$$

4. По второму закону Кирхгофа для магнитной цепи определяется искомая НС путем суммирования падений магнитного напряжения вдоль контура:

$$F = Iw = \sum H_i l_i + H_\delta \delta,$$

где  $\delta$  — длина воздушного зазора.

## 2. «Прямая» задача для разветвленной магнитной цепи

Расчет разветвленных магнитных цепей основан на совместном применении первого и второго законов Кирхгофа для магнитных цепей. Последовательность решения задач данного типа в целом соответствует рассмотренному выше алгоритму решения «прямой» задачи для неразветвленной цепи. При этом для определения магнитных потоков на участках магнитопровода, для которых магнитная напряженность известна или может быть вычислена на основании второго закона Кирхгофа, следует использовать алгоритм

$$H_i \rightarrow \text{по } B(H) \rightarrow B_i \rightarrow \Phi_i = B_i S_i.$$

В остальных случаях неизвестные магнитные потоки определяются на основании первого закона Кирхгофа для магнитных цепей.

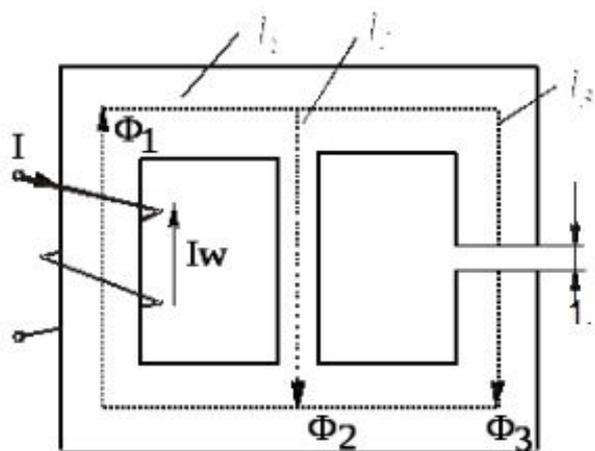


Рис. 3.28

В качестве примера анализа разветвленной магнитной цепи при заданных геометрии магнитной цепи на рис. 3.28 и характеристике  $B(H)$  ферромагнитного сердечника определим НС  $F = Iw$ , необходимую для создания в воздушном зазоре индукции  $B_\delta$ .

### Алгоритм решения задачи

1. Задаем положительные направления магнитных потоков в стержнях магнитопровода (см. рис. 3.28).
2. Определяем напряженность в воздушном зазоре  $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$  и по

зависимости  $B(H)$  для  $B_\delta = B_\delta$  - значение  $H_\delta$ .

3. По второму закону Кирхгофа для правого контура записываем:

$$H_3 l_3 + H_\delta \delta - H_2 l_2 = 0,$$

откуда находим  $H_2$  и по зависимости  $B(H) - B_2$ .

4. В соответствии с первым законом Кирхгофа

$$\Phi_1 = B_2 S_2 + B_3 S_3.$$

Тогда  $B_1 = \Phi_1 / S_1$ , и по зависимости  $B(H)$  определяем  $H_1$ .

5. В соответствии со вторым законом Кирхгофа для искомой НС имеет место уравнение

$$F_1 = H_1 l_1 + H_2 l_2.$$

### Графические методы расчета

Графическими методами решаются задачи второго типа □ «обратные» задачи. При этом в качестве исходных данных для расчета заданы конфигурация и геометрические размеры магнитной цепи, кривая (кривые) намагничивания ферромагнитного материала, а также НС обмоток. Требуется найти значения потоков (индукций) на отдельных участках магнитопровода.

Данные методы основаны на графическом представлении вебер-амперных характеристик  $\Phi(U_M)$  линейных и нелинейных участков магнитной цепи с последующим решением алгебраических уравнений, записанных по законам Кирхгофа, с помощью соответствующих графических построений на плоскости.

## 1. «Обратная» задача для неразветвленной магнитной цепи

Решение задач подобного типа осуществляется в следующей последовательности.

1. Задаются значениями потока и определяют для них НС  $F = \oint Hl$ , как при решении «прямой» задачи. При этом следует стремиться подобрать два достаточно близких значения потока, чтобы получить  $\sum Hl$ , несколько меньшую и несколько большую заданной величины НС.
2. По полученным данным строится часть характеристики  $\Phi(\sum Hl)$  магнитной цепи (вблизи заданного значения НС) и по ней определяется поток, соответствующий заданной величине НС.

При расчете неразветвленных магнитных цепей, содержащих воздушные зазоры, удобно использовать метод пересечений, при котором искомое решение определяется точкой пересечения нелинейной вебер-амперной характеристики нелинейной части цепи и линейной характеристики линейного участка, строящейся на основании уравнения

$$\sum Hl = \sum Iw - \sum H_{\delta} \delta = \sum Iw - \Phi \sum R_{M\delta},$$

где  $R_{M\delta} = \delta / (\mu_0 S_{\delta})$  — магнитное сопротивление воздушного зазора.