# Раздел 7. Магнитные цепи

***Магнитная цепь*** – это совокупность тел и областей пространства, где сосредоточено магнитное поле.

Магнитная цепь состоит из источников поля и прочих элементов (прочие элементы - ферромагнитные тела и воздушные зазоры)

# 7.1. Основные характеристики и свойства магнитного поля

- ***H*** (А/м) – напряженность магнитного поля.
- ***B*** (Тл) – магнитная индукция
- ***Ф*** (Вб) – магнитный поток

# 1. Магнитная индукция ***B*** – силовая характеристика магнитного поля.

Сила Лоренца $$\vec{F} = q \cdot \left( \vec{E} + \vec{V} \times \vec{B} \right)$$

Сила Ампера $$\vec{dF} = I \cdot \left( \vec{dl} \times \vec{B} \right)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$$

# 2. Напряженность магнитного поля ***H***

## Закон полного тока

$$\int \vec{H}\, d\vec{l} = \sum i$$

$$rot\left(\vec{H}\right) = \sum \vec{J}$$

Напряженность магнитного поля ***H*** характеризует источник магнитного поля – полный ток

# Уравнения Максвелла

$$div\left(\vec{B}\right) = 0$$

Следствие: нет источника магнитной индукции: источник поля одновременно является стоком (или: не существует магнитных зарядов)

$$\int \vec{B}\, d\vec{S} = 0$$

Следствие: линии магнитной индукции замкнуты! Сколько линий магнитной индукции входит через замкнутую поверхность, столько же линий магнитной индукции и выходит.

# 3. Магнитный поток

$$\Phi = \int \vec{B}\, d\vec{S}$$

Уравнение Максвелла:

$$rot\left(\vec{E}\right) = -\frac{d}{dt}\vec{B}$$

Следствие: переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое.

Закон электромагнитной индукции

$$e = \int \vec{E}\, d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B}\, d\vec{S} = -\frac{d}{dt}\Phi$$

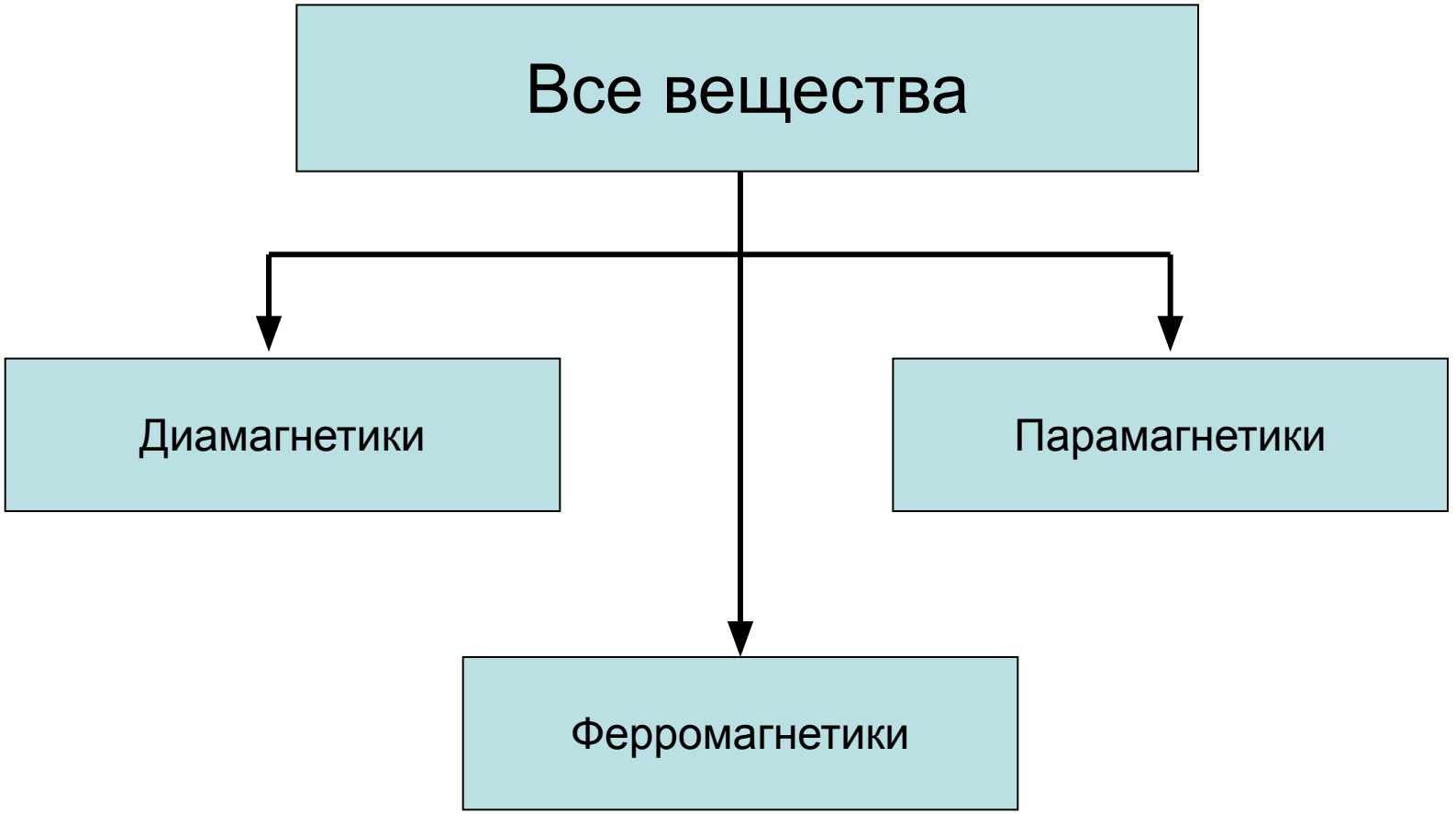
Выводы:

1. Напряженность магнитного поля характеризует источник поля – электрический ток.
2. Магнитное поле зависит не только от напряженности, но и от магнитных свойств среды.
3. Силовой характеристикой магнитного поля является магнитная индукция: она определяет силу, действующую на движущиеся заряды (электрический ток) в магнитном поле.

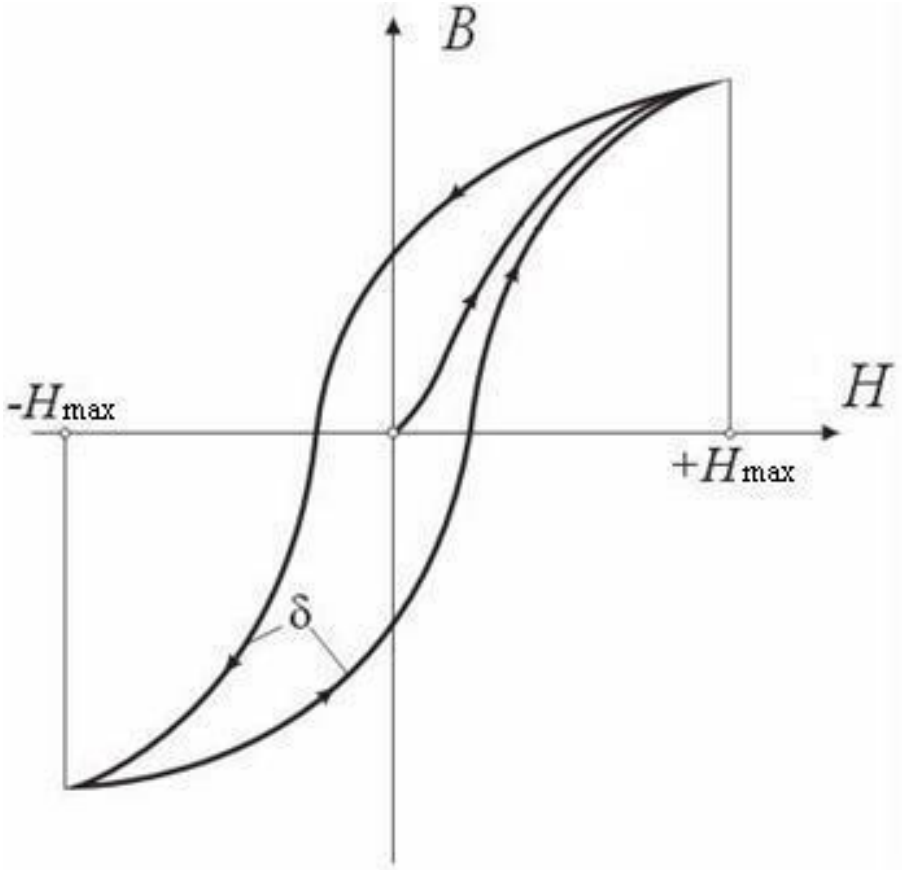
Выводы:

4. Переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле и, следовательно, электродвижущую силу (ЭДС), если в поле есть заряд.
5. Полная ЭДС в контуре, находящемся в переменном магнитном поле, определяется скоростью изменения магнитного потока через данный контур.

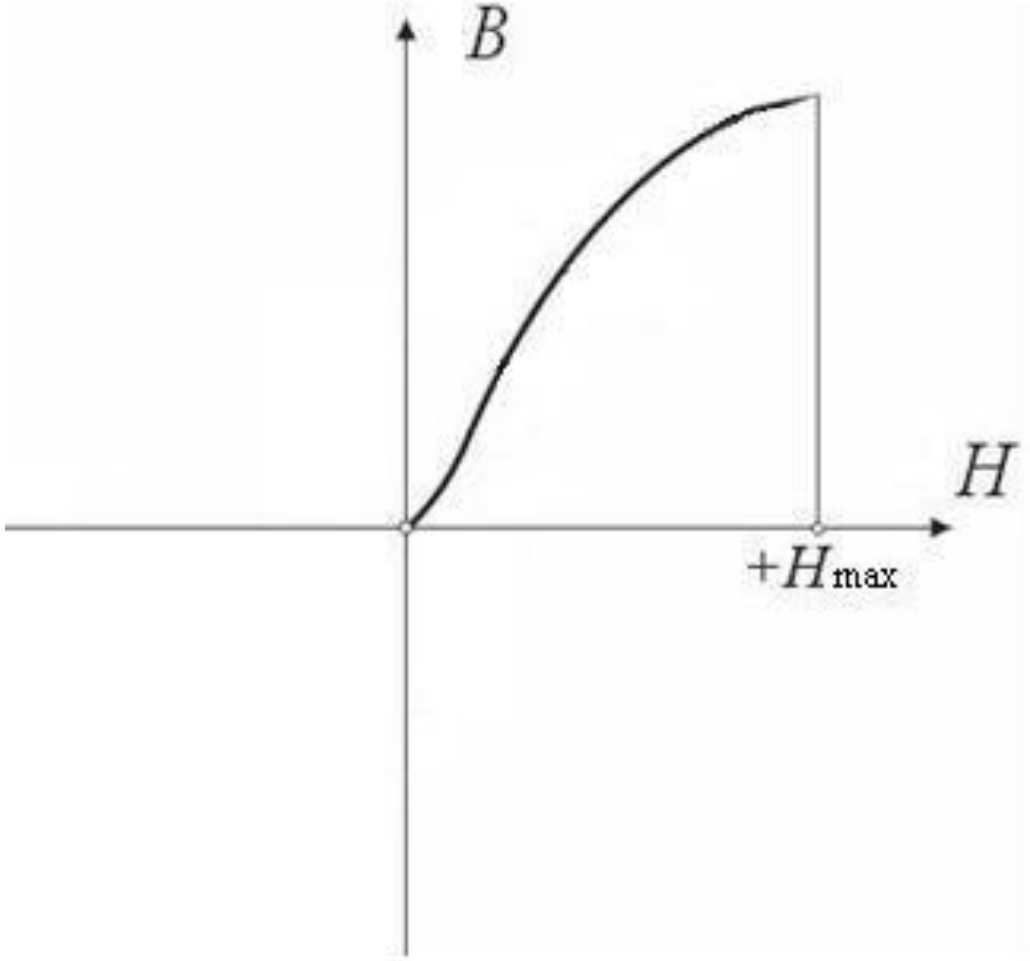
7.2. Магнитные характеристики вещества



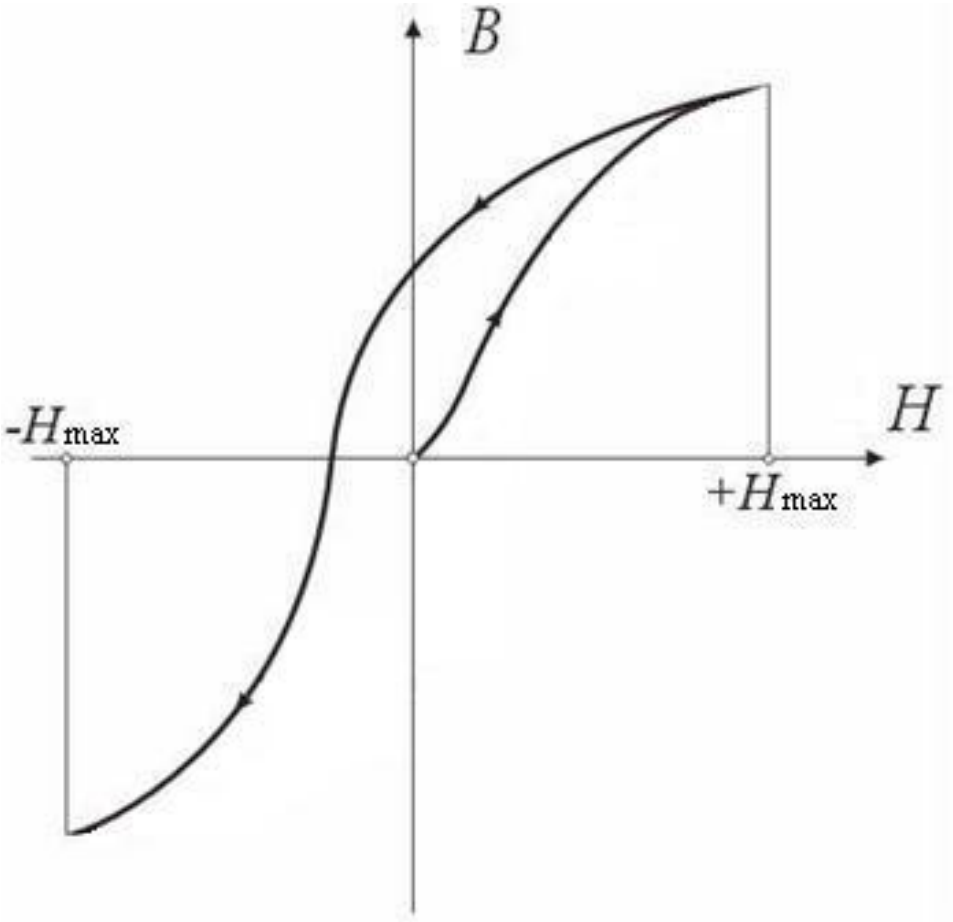
# Основная характеристика ферромагнитного материала (ФММ) – зависимость ***B(H)***



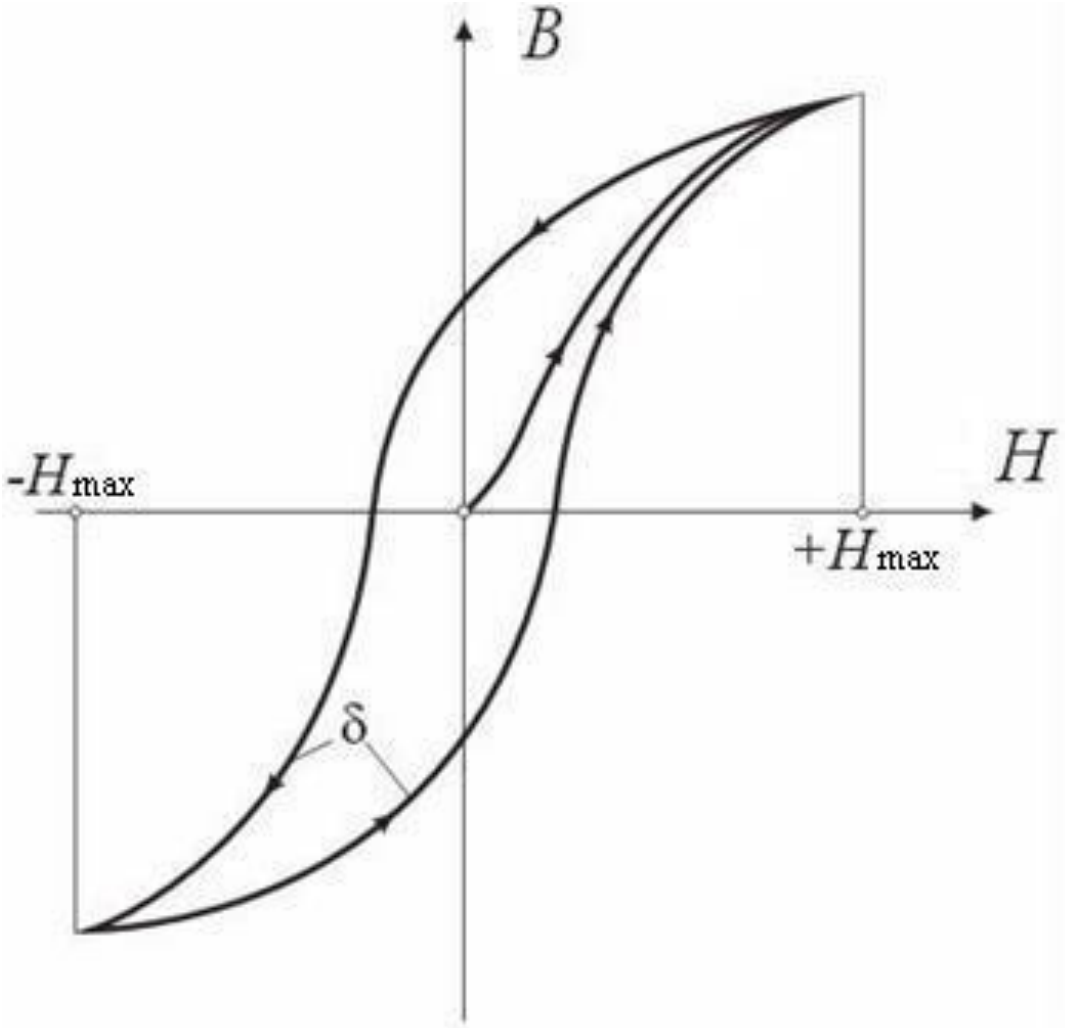
# Кривая намагничивания



# Перемагничивание ФММ



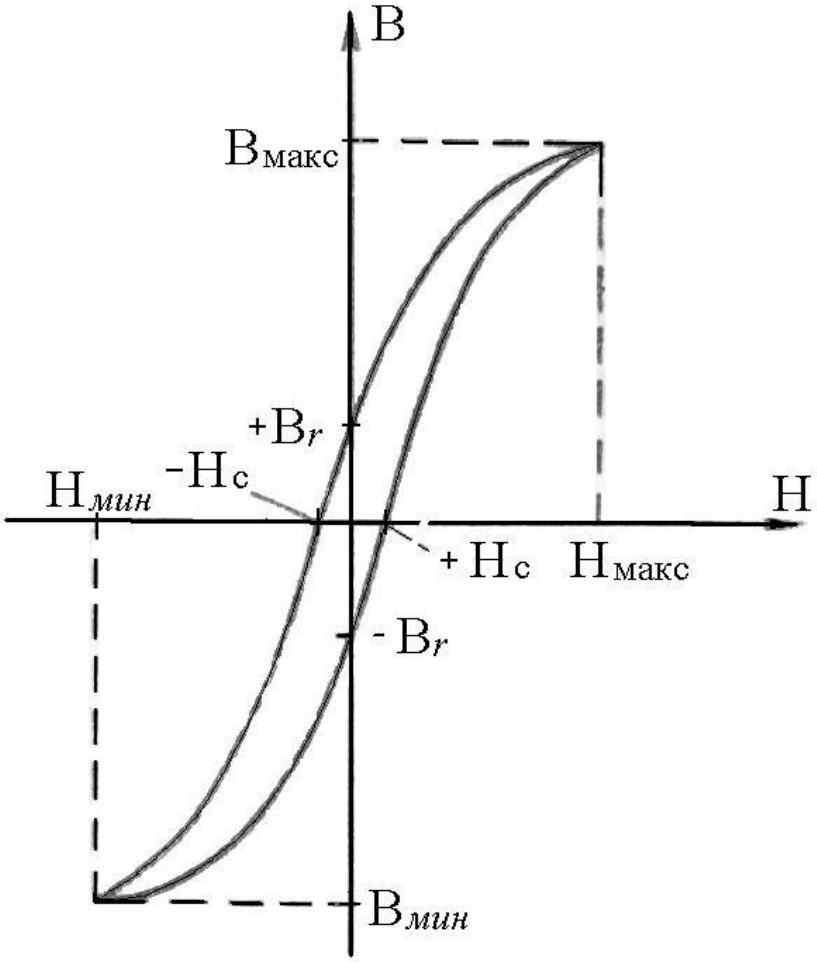
# Предельная петля гистерезиса



7.2. Магнитные характеристики вещества

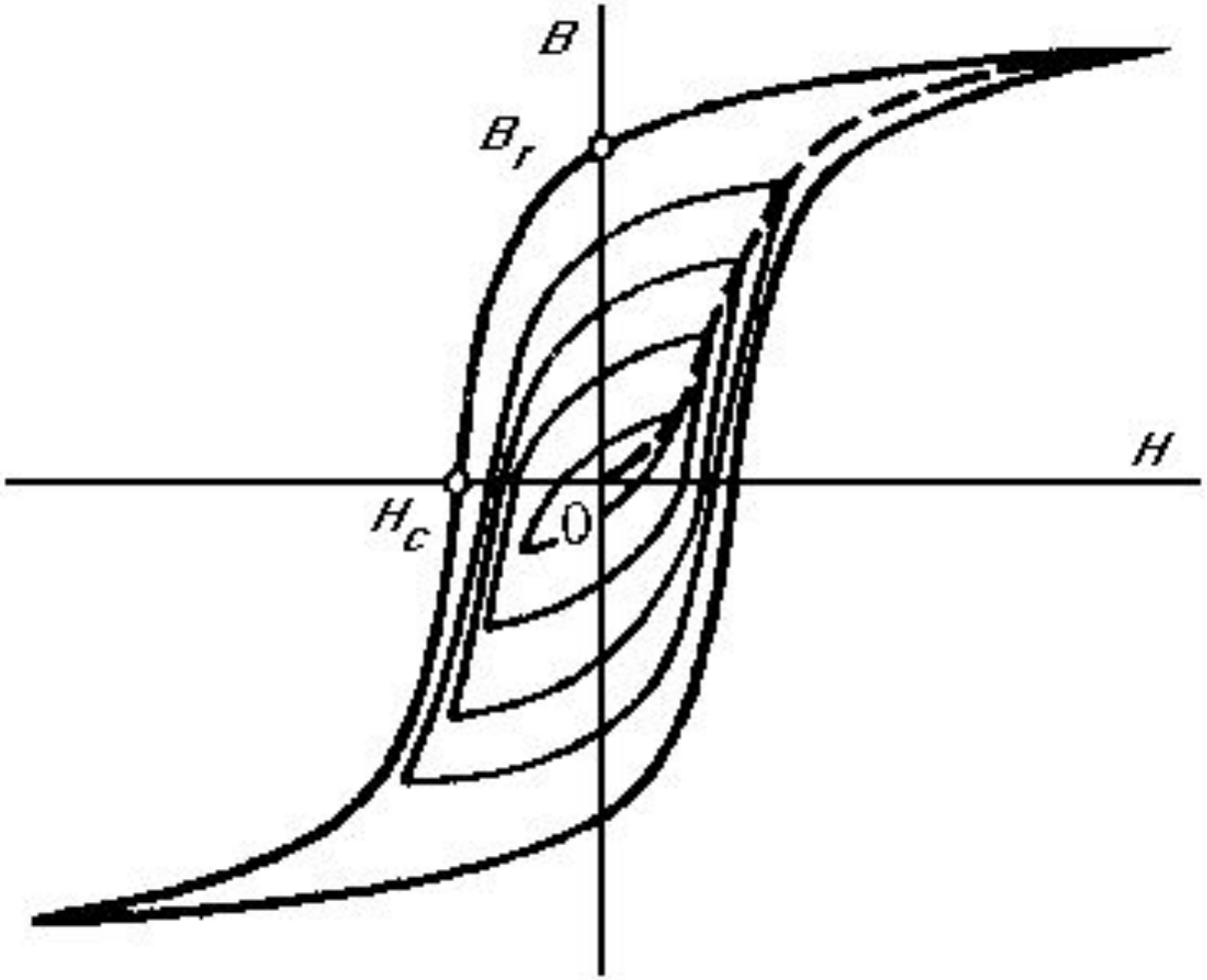
Предельная петля гистерезиса характеризуется:

- коэрцитивной силой $H_c$
- индукцией насыщения $B_{max}$
- напряженностью насыщения $H_{max}$,
- остаточной индукцией $B_r$

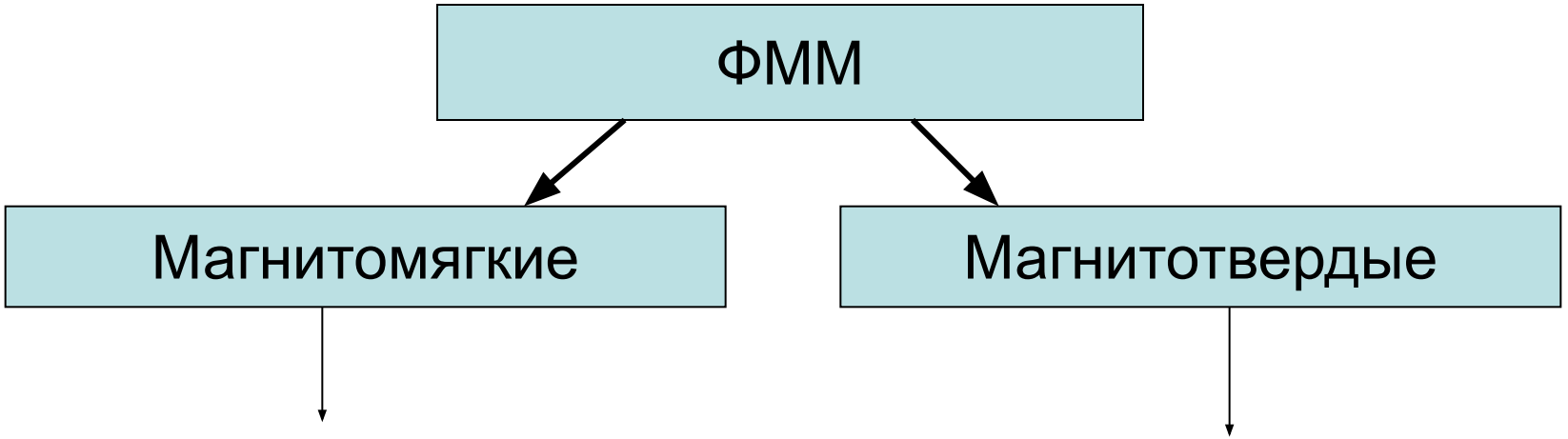



Предельная петля гистерезиса

# Частные петли гистерезиса



7.2. Магнитные характеристики вещества




Легко перемагничиваются, имеют малую остаточную индукцию и коэрцитивную силу (железо, чугун, элетротехнические стали)

Трудно перемагничиваются, имеют большую остаточную индукцию и коэрцитивную силу (постоянные магниты)

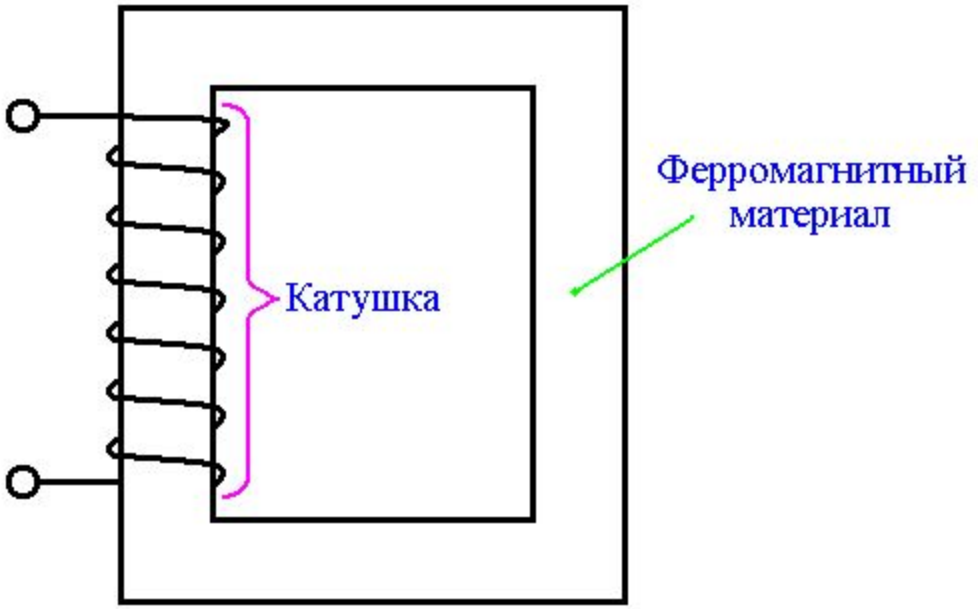
# 7.3. Анализ магнитных цепей с постоянным магнитным потоком

Классификация магнитных цепей.

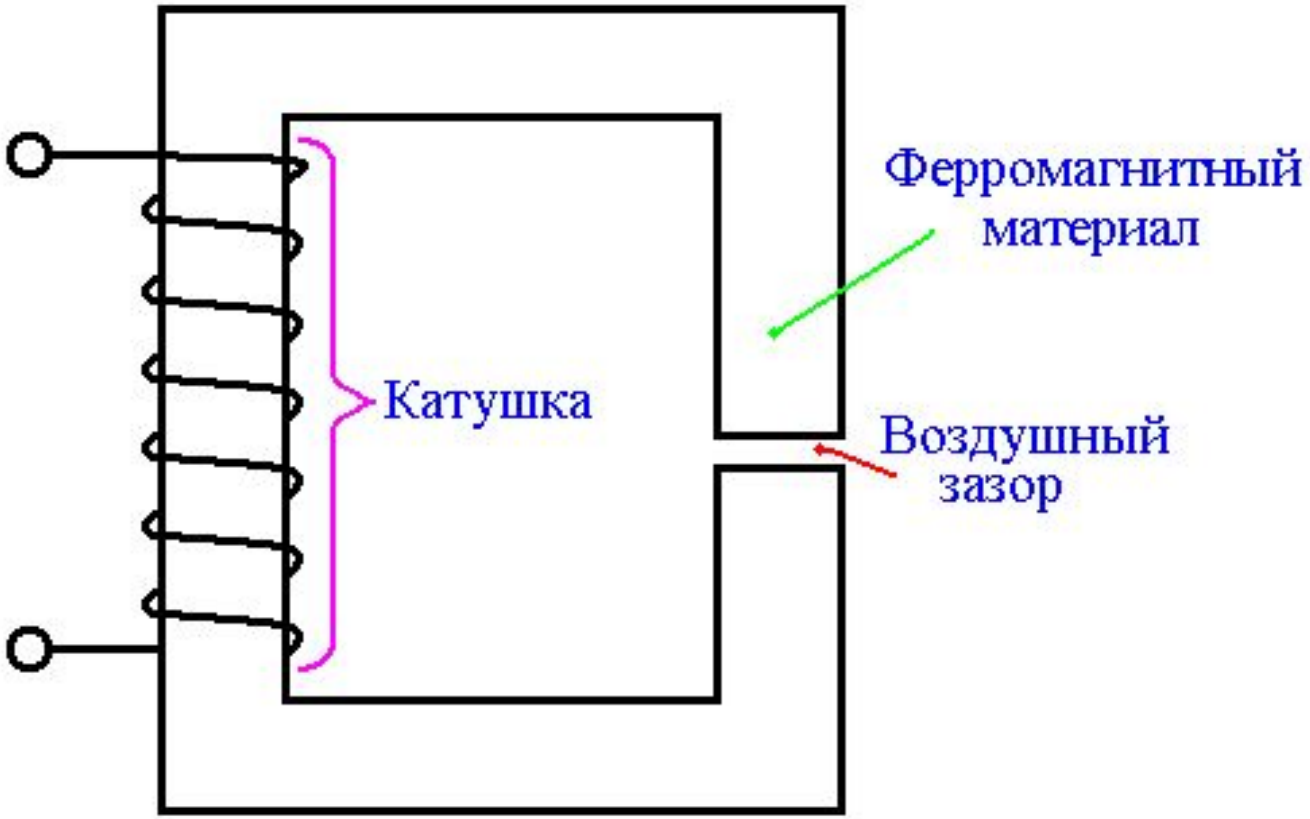
Цепи бывают:

- однородными / неоднородными
- разветвленными / неразветвленными

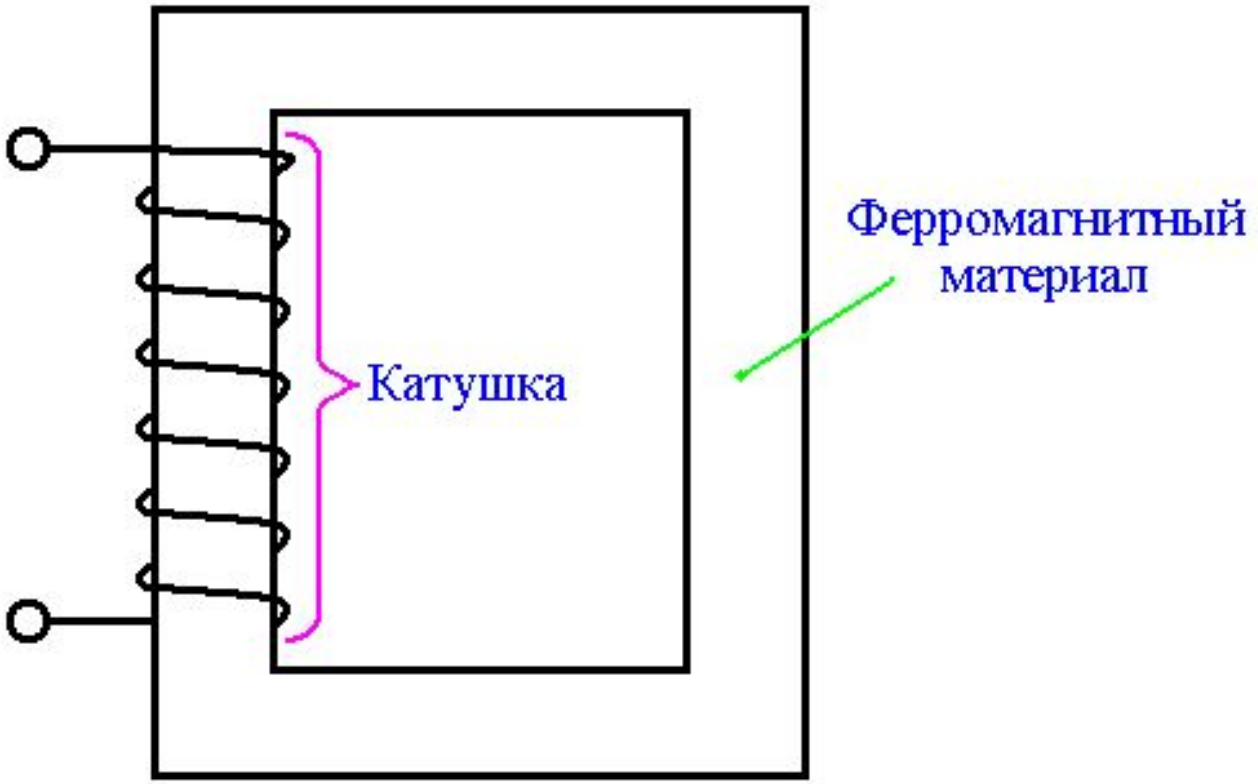
# Однородная магнитная цепь



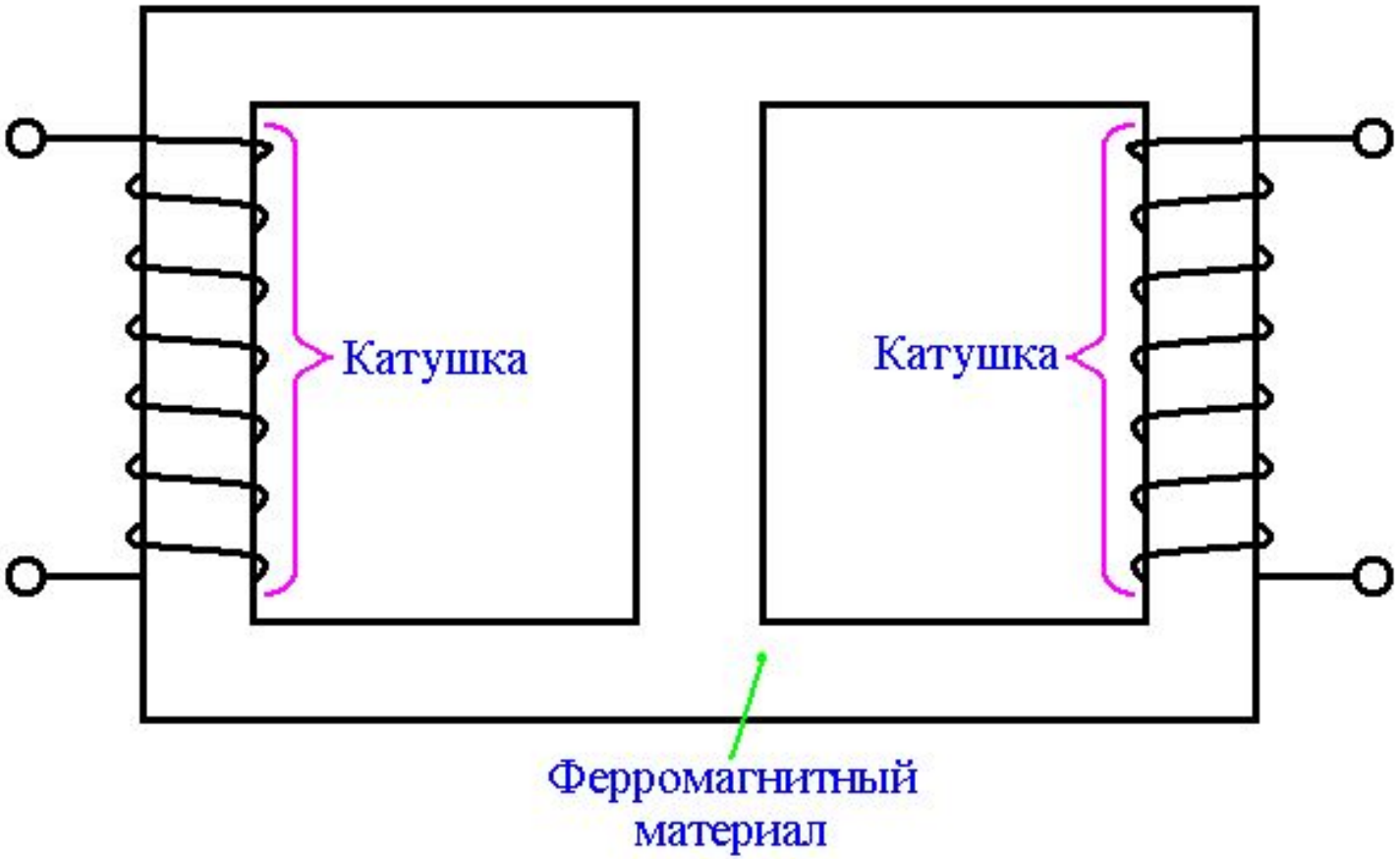
# Неоднородная магнитная цепь



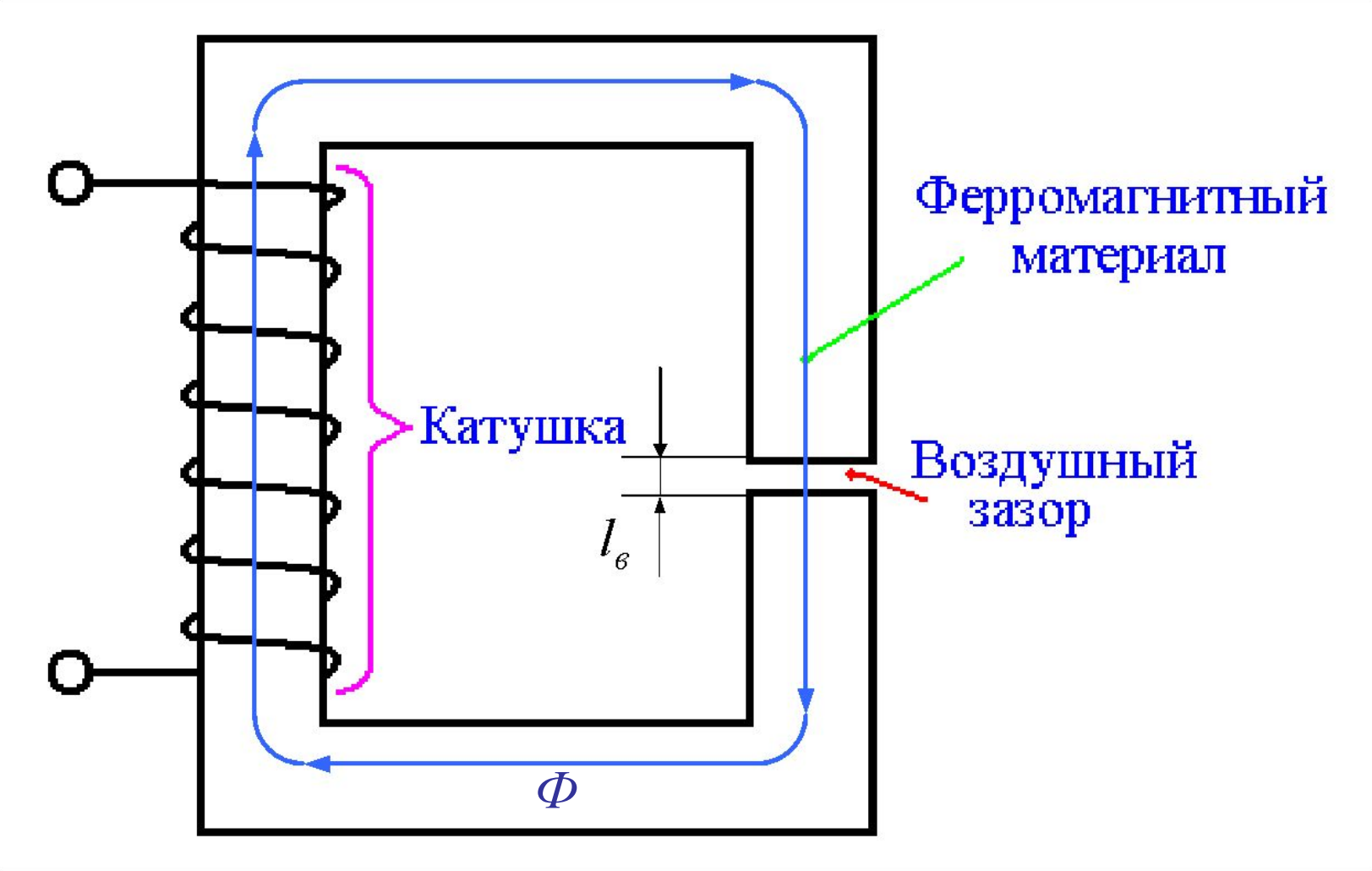
# Неразветвленная магнитная цепь



# Разветвленная магнитная цепь



# Анализ простейшей магнитной цепи



7.3. Анализ магнитных цепей с постоянным магнитным потоком

## Закон полного тока

$$\int \vec{H}\, d\vec{l} = \sum i$$

При условии, что магнитный поток во всей цепи и по сечению магнитопровода одинаков, интеграл можно заменить суммой

$$\sum_{1}^{n} H_k \cdot l_k = \sum I$$

7.3. Анализ магнитных цепей с постоянным магнитным потоком

$F = w \cdot I$ – *магнитодвижущая сила (МДС)*

$$F = H_{фмм} \cdot l_{фмм} + H_{в} \cdot l_{в}$$

$$\Phi \cdot \left( \frac{l_{фмм}}{\mu \cdot \mu_0 \cdot S} \right) + \Phi \cdot \left( \frac{l_{в}}{\mu_0 \cdot S} \right) = F$$

Магнитное сопротивление участка цепи

$$R_м = \frac{l}{\mu \cdot \mu_0 \cdot S}$$

Уравнение состояния магнитной цепи

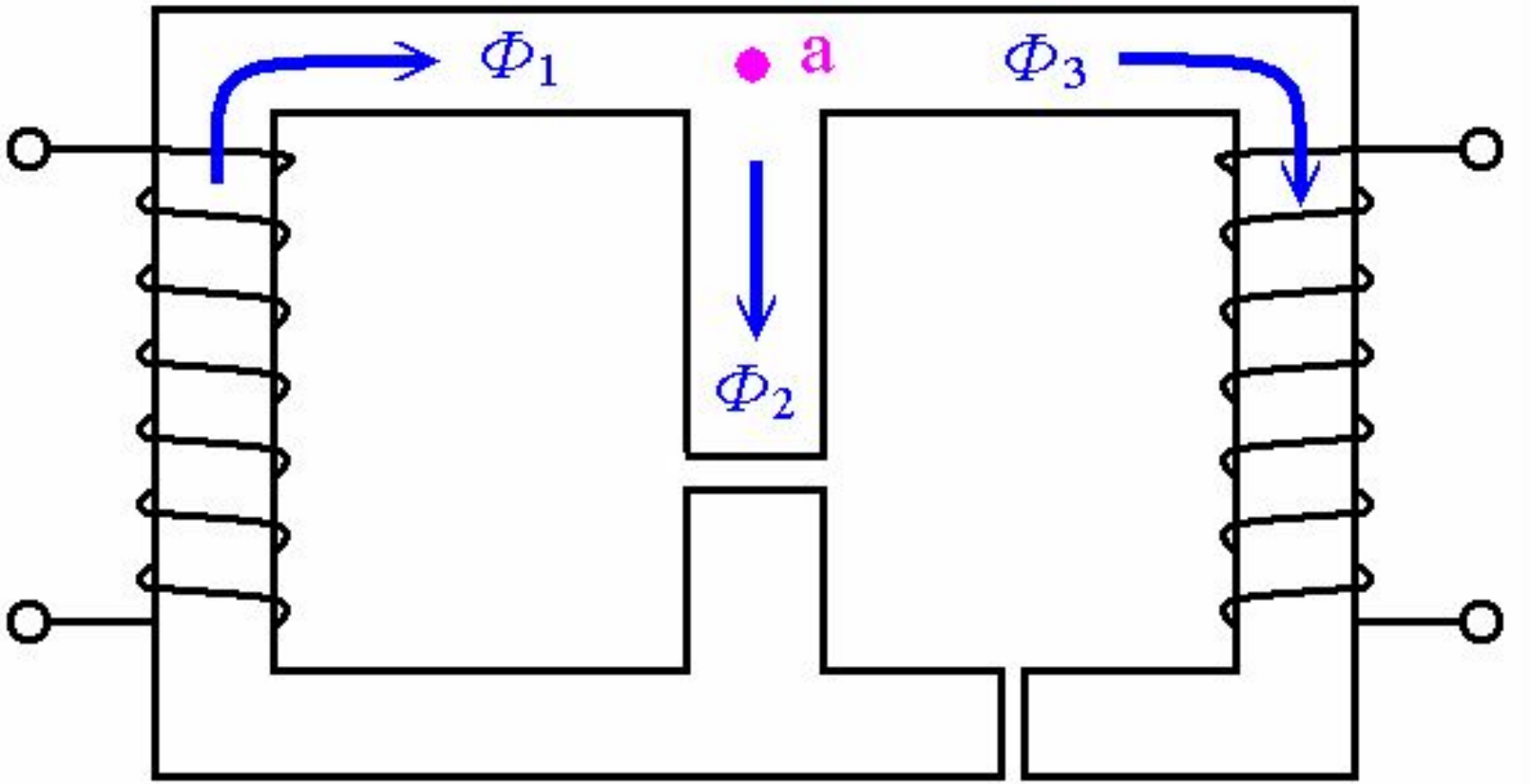
$$\Phi \cdot \left( R_{мФММ} + R_{мв} \right) = F$$

*Аналогия магнитных и электрических цепей:*

- Магнитный поток соответствует электрическому току.
- МДС соответствует ЭДС
- Магнитное сопротивление соответствует электрическому сопротивлению.

*Расчет магнитных цепей постоянного потока можно вести с помощью схем замещения аналогично электрическим цепям*

# 7.3. Анализ магнитных цепей с постоянным магнитным потоком

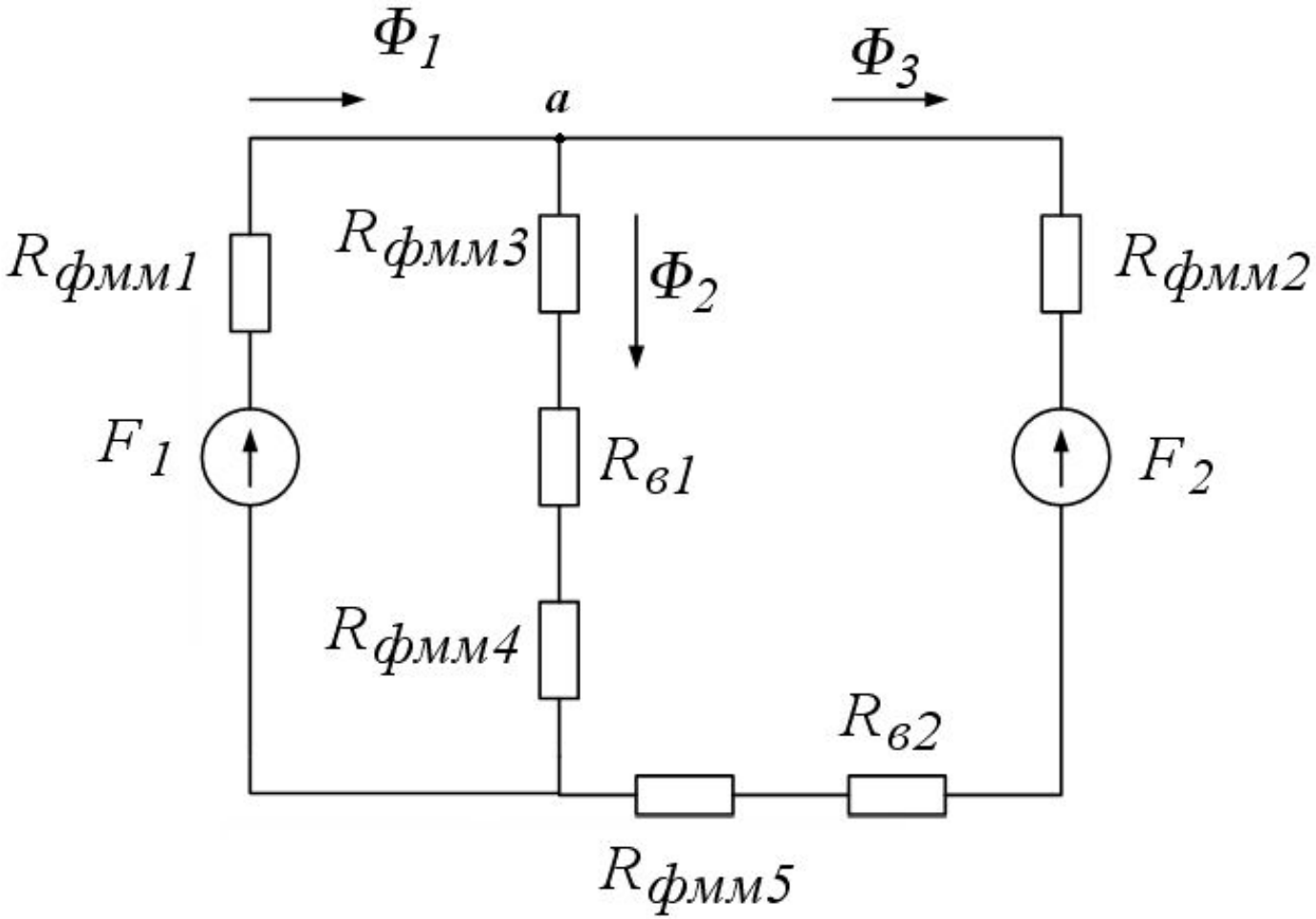


## Законы расчета магнитных цепей постоянного потока:

1. В узле алгебраическая сумма магнитных потоков равна нулю.
2. В замкнутом контуре сумма падения магнитного напряжения равна нулю.

К магнитным цепям постоянного потока применимы все методы расчета цепей постоянного тока

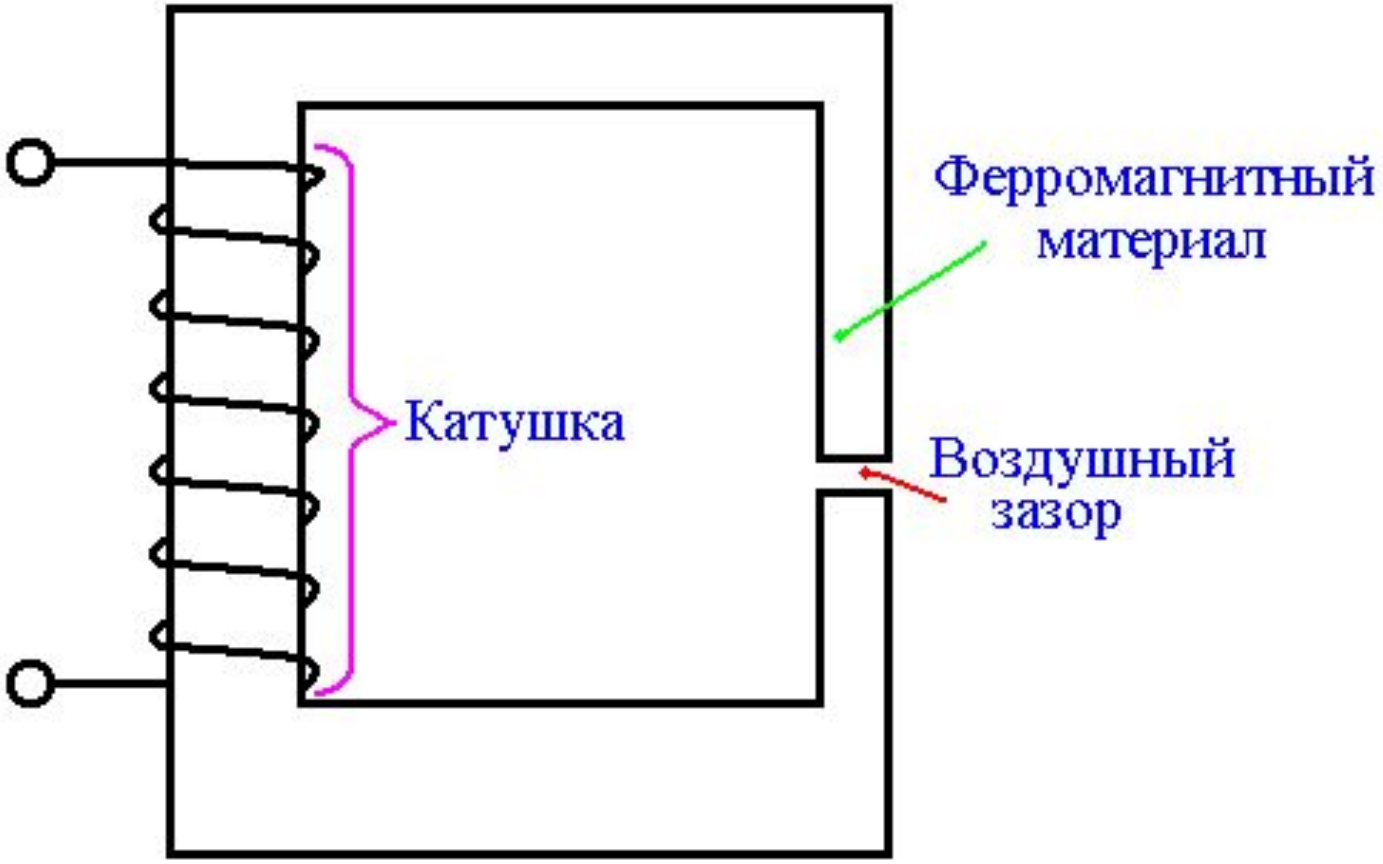
# Схема замещения магнитной цепи



# Две основные задачи расчетов магнитных цепей:

- По заданному магнитному потоку определить МДС (прямая задача).
- По заданному значению МДС рассчитать магнитный поток (обратная задача).

1. Прямая задача: какую катушку взять, чтобы получить в зазоре требуемую индукцию поля B?



7.3. Анализ магнитных цепей с постоянным магнитным потоком. Решение прямой задачи

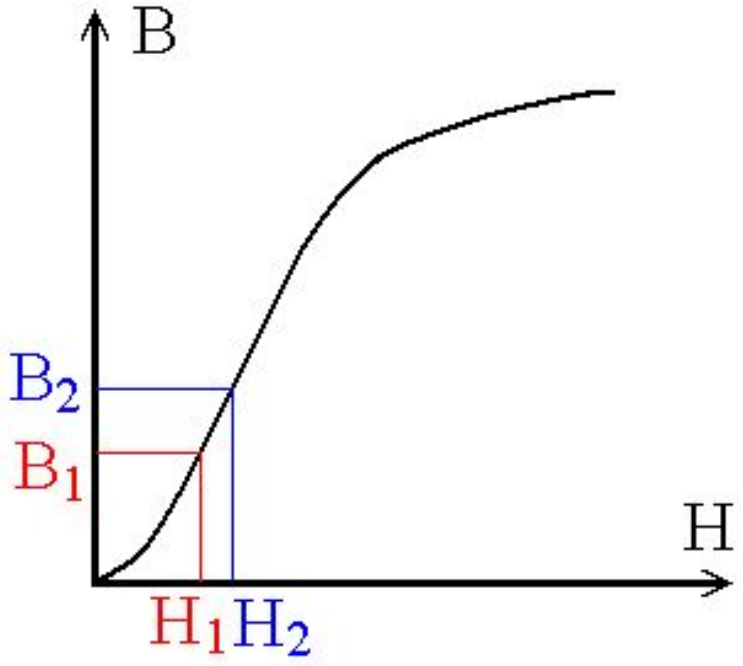
1. Зная требуемую индукцию в зазоре, определяем магнитный поток:

$$\Phi = B \cdot S$$

2. Для каждого участка магнитной цепи определяем магнитную индукцию В.

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; \qquad B_2 = \frac{\Phi}{S_2}; \quad \text{и т.д.}$$

3. Для каждого участка магнитной цепи определяем напряженность магнитного поля H, используя зависимость B(H) и найденное значение B



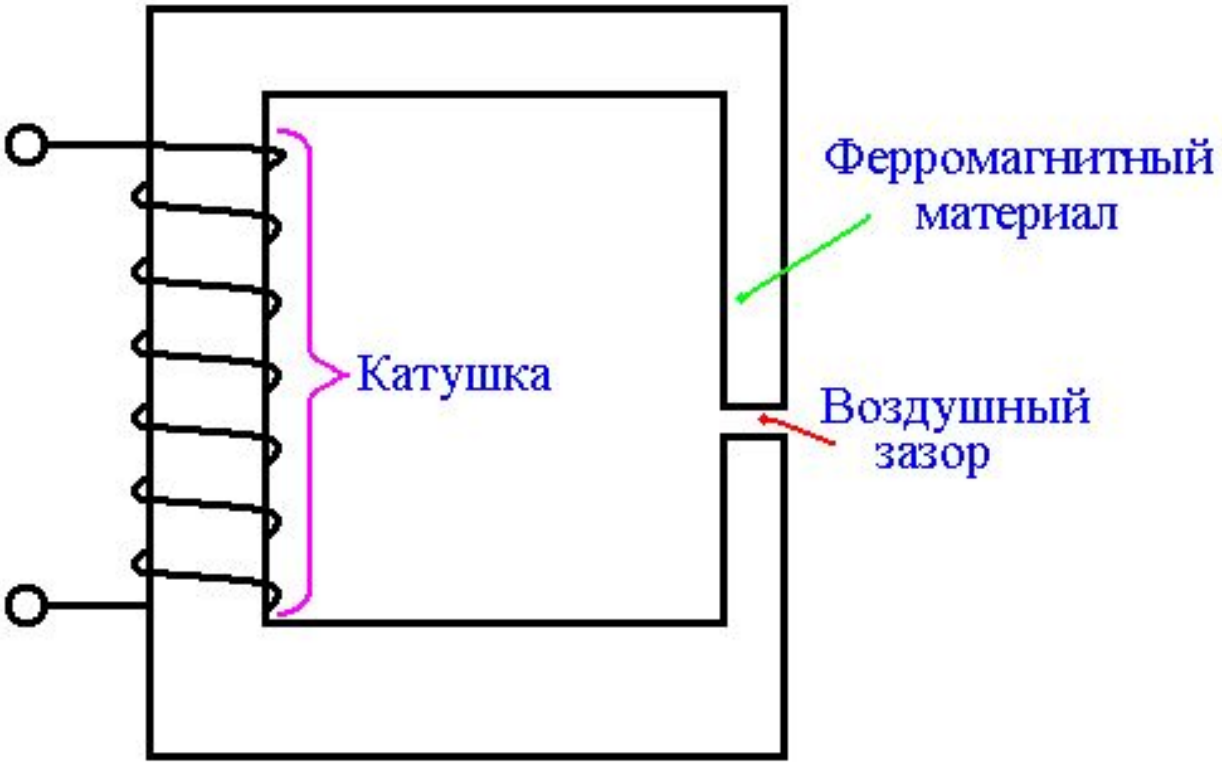
4. Для каждого участка магнитной цепи определяем произведение напряженности магнитного поля H на длину этого участка и затем складываем полученные результаты для определения МДС.

$$H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 + H_4 \cdot l_4 + H_5 \cdot l_5 + H_в \cdot \delta = F$$

5. По найденному значению МДС определяется или число витков катушки с заданной величиной тока, или величину тока при заданном числе витков, или все одновременно.

$$F = w \cdot I$$

# 2. Обратная задача: по заданному значению МДС рассчитать магнитный поток.



## 7.3. Анализ магнитных цепей с постоянным магнитным потоком. Решение обратной задачи

Вариант 1:
Задача решается на основе прямой задачи, а именно, задается некоторая величина магнитного потока. Для этого магнитного потока определяется МДС. Полученная таким образом МДС отличается от заданной в такое же количество раз, в какое отличаются фактический и принятый при расчете магнитные потоки.

Вариант 2:

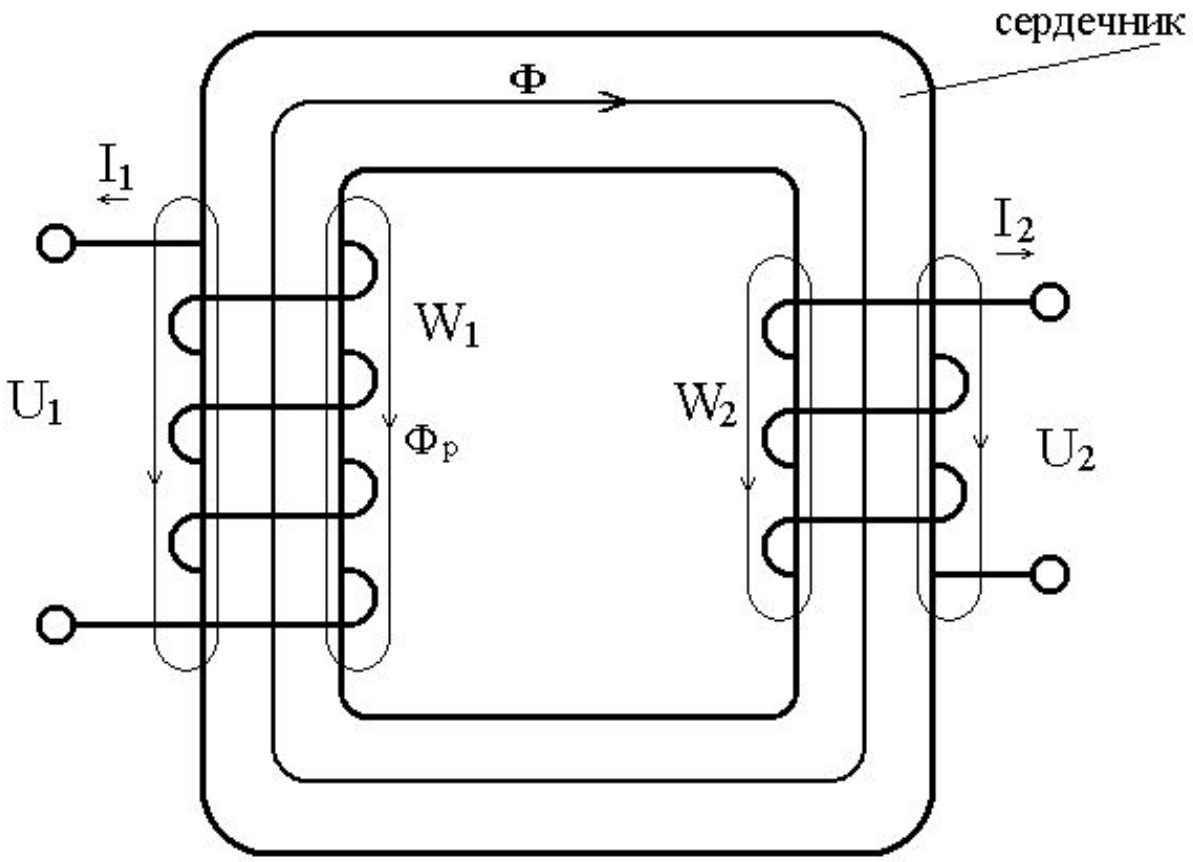
- Определяем магнитные сопротивления всех участков магнитной цепи.
- Составляем схему замещения и рассчитываем потоки аналогично расчету токов в электрической цепи.

## 7.3. Анализ магнитных цепей с постоянным магнитным потоком. Решение обратной задачи

Погрешность расчетов возникает из-за зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля. Эта погрешность тем меньше, чем меньше магнитное сопротивление магнитопровода по сравнению с магнитным сопротивлением зазора.

# 7.4. Особенность магнитных цепей при переменном магнитном потоке

1. Существуют потоки рассеяния



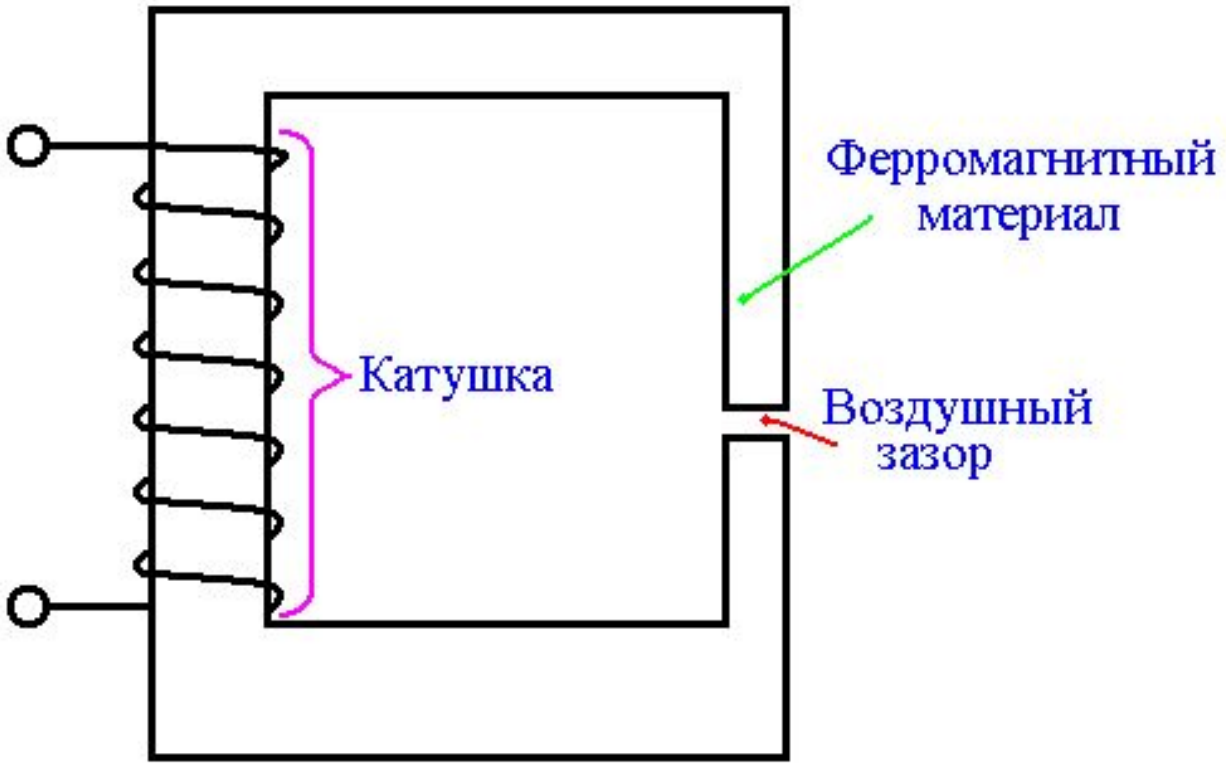
2. Катушка индуктивности имеет активное сопротивление. Для идеальной катушки магнитный поток определяется только напряжением.
3. Существуют потери на перемагничивание сердечника и вихревые токи.
4. Индуктивность катушки с магнитопроводом зависит от тока.
5. При синусоидальном напряжении ток и поток оказываются несинусоидальными.

# 7.5. Дроссель

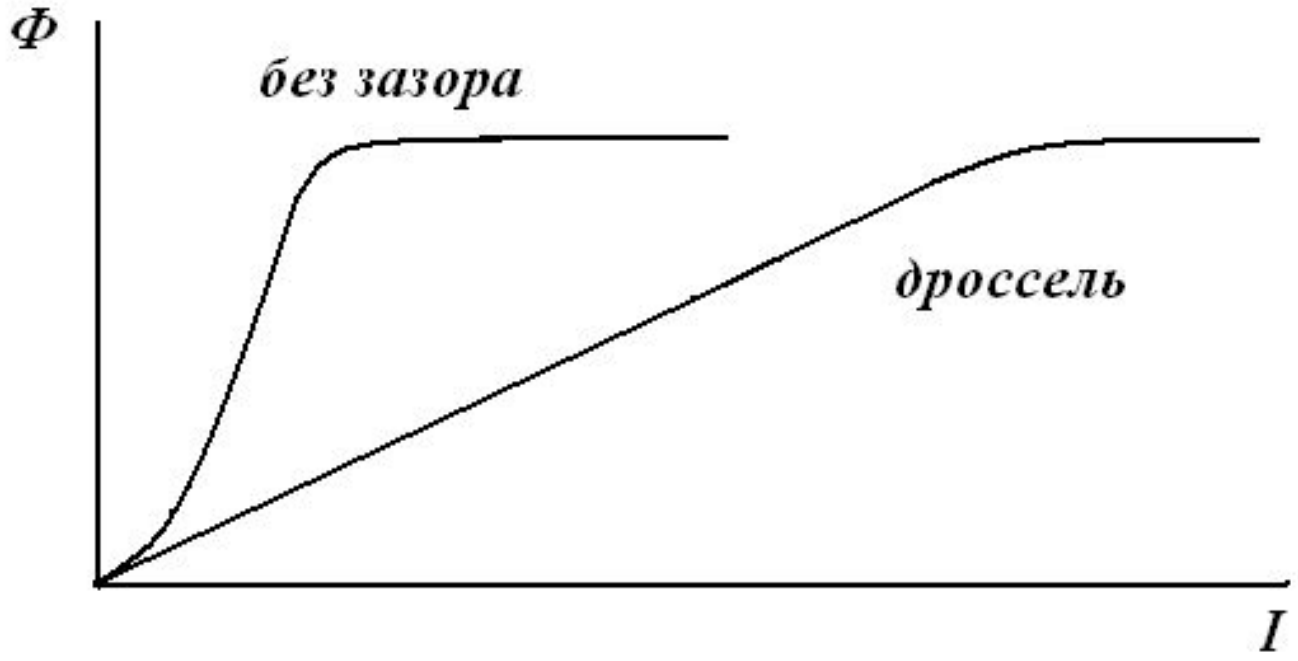
***Дроссель*** – катушка с ферромагнитным сердечником, имеющим зазор для линеаризации ВАХ.

Дроссель должен иметь, по возможности, большую индуктивность при минимальных массе и потерях

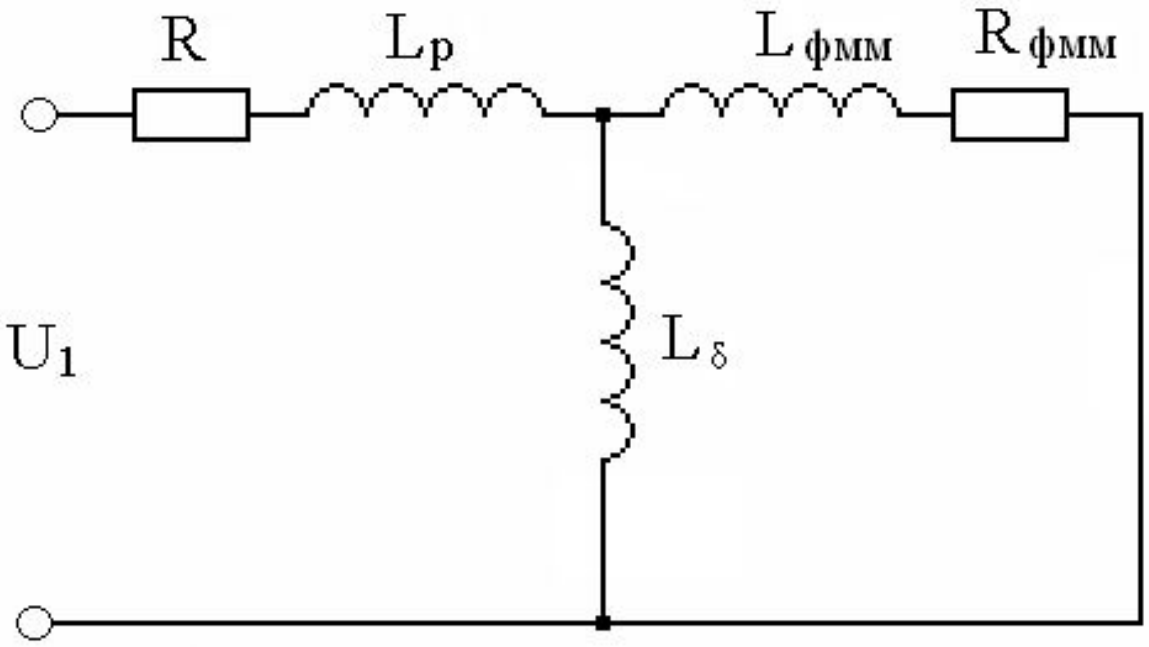
# Конструкция дросселя



# Вебер-амперные характеристики дросселя и катушки с ФМ сердечником без зазора



# Схема замещения дросселя



Выводы:

1. Зазор в сердечнике дросселя спрямляет ВАХ, делая ее более линейной. Величина линейного участка зависит от зазора.
2. На линейном участке ВАХ индуктивность дросселя постоянна.
3. При заданном напряжении на катушке увеличение зазора приводит к росту тока намагничивания.

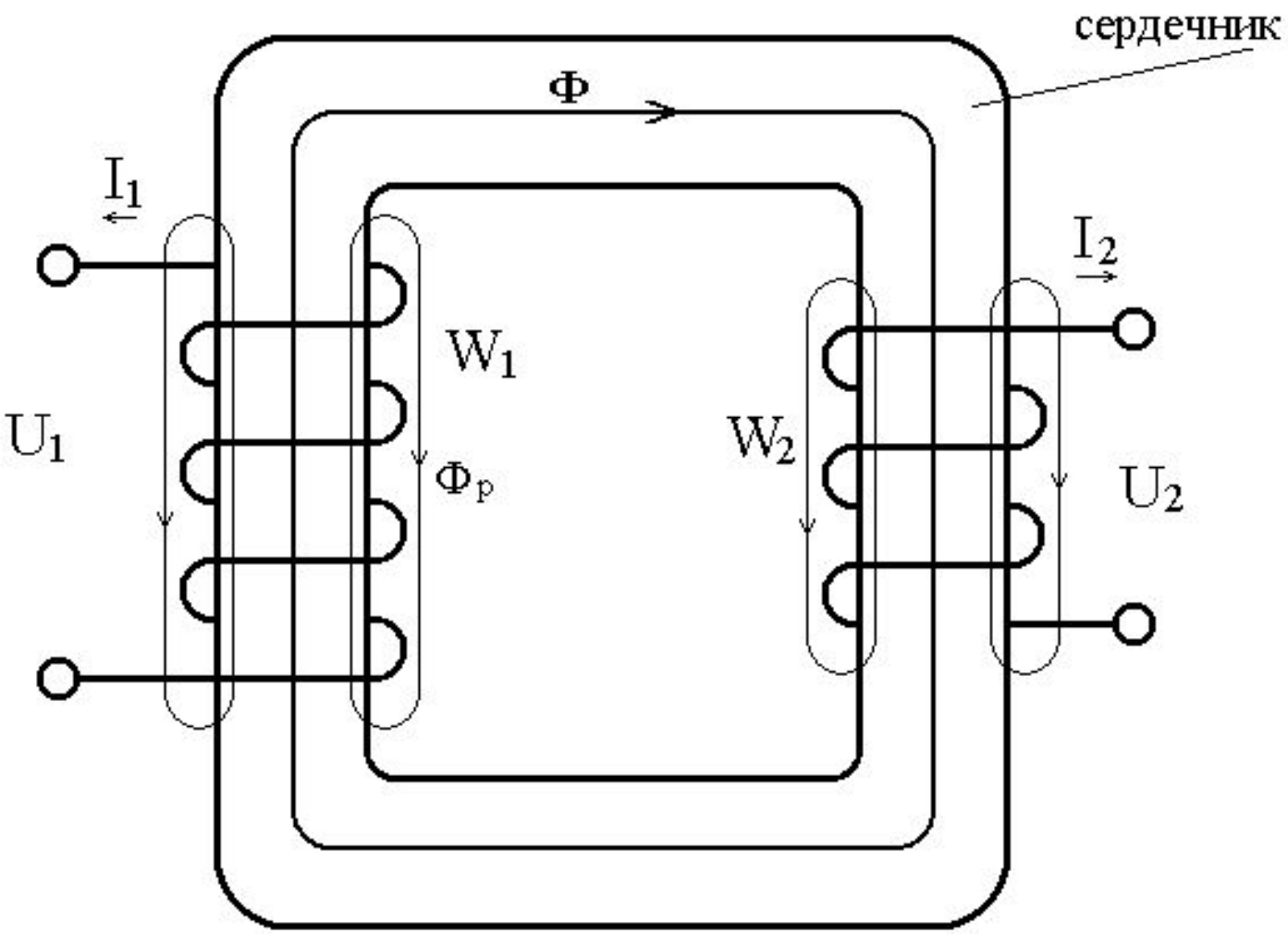
# 7.6. Трансформатор

***Трансформатор*** – устройство, содержащее две или более неподвижные обмотки, связанные общим магнитным полем, и преобразующее параметры электрической энергии (ток, напряжение).

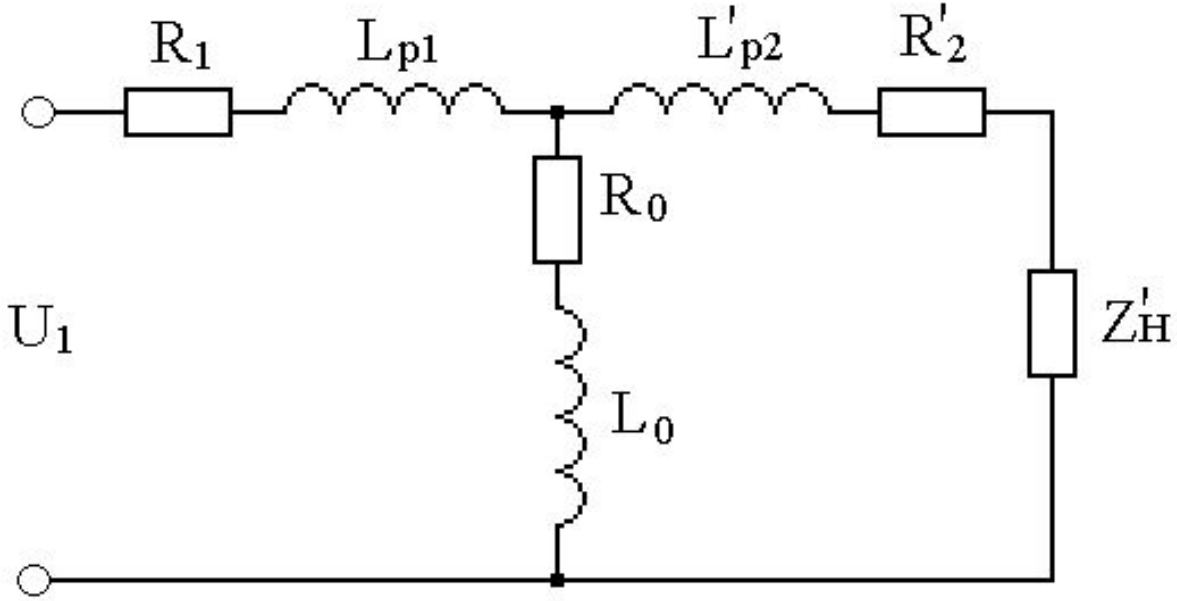
Трансформаторы бывают:

- повышающие,
- понижающие.

7.6. Трансформатор



# Схема замещения трансформатора




$$Z'_{н} = Z_{н} \cdot n^2 \qquad L'_{p2} = L_{p2} \cdot n^2$$

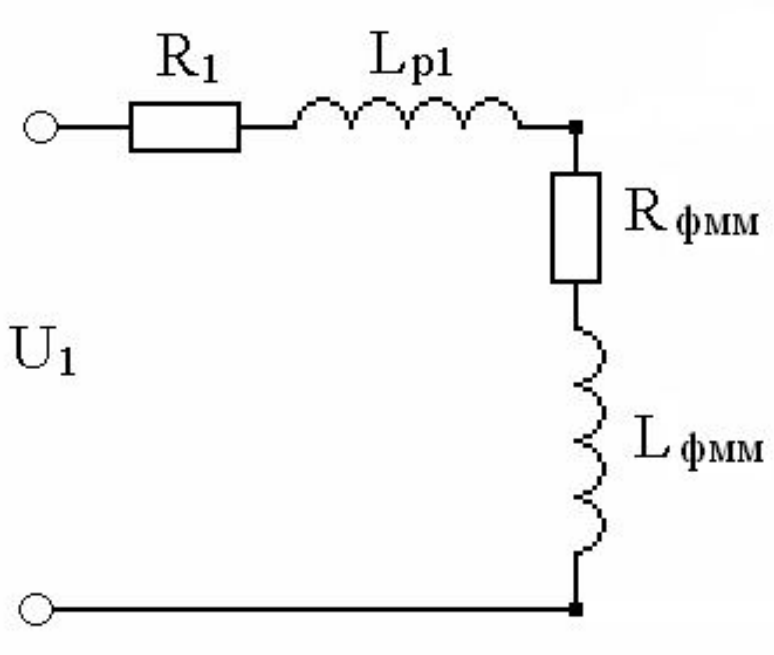
$$R'_{2} = R_{2} \cdot n^2$$

# Режимы работы трансформатора.

## 1. Режим холостого хода

$$I_2 = 0,\ U_{2x} = E_2$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot (R_1 + R_{фмм} + j \cdot (X_{p1} + X_{фмм}))$$




$I_1$ – *очень маленький (0,5 – 10% от номинального),*

$R_1$, $L_{p1}$ – *малы по сравнению с* $R_{фмм}$ *и* $L_{фмм}$

В режиме холостого хода:

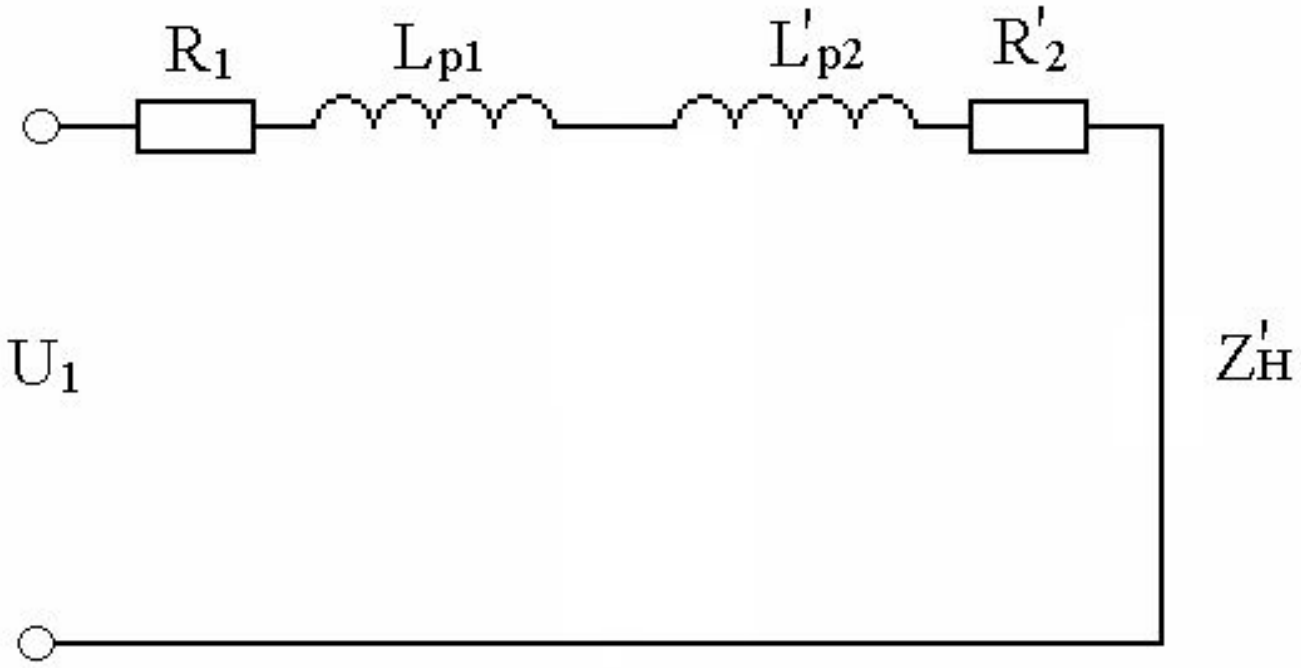
- Магнитный поток равен номинальному
- Потери на перемагничивание равны номинальным
- Электрические потери малы
- Мощность, потребляемая от источника тратится только на создание магнитного поля (реактивная) и нагрев сердечника при перемагничивании (активная).

***Режим ХХ характеризует магнитную цепь трансформатора!***

# 2. Короткое замыкание.

$U_2 = 0$

$U_1$ *подбирают так, чтобы* $I_1 = I_{1ном}$ *и* $I_2 = I_{2ном}$



В режиме короткого замыкания:

- Магнитный поток мал по сравнению с номинальным
- Потери на перемагничивание равны нулю
- Электрические потери равны номинальным
- Мощность, потребляемая от источника тратится только на нагрев обмоток трансформатора.

***Режим КЗ характеризует электрические параметры обмоток трансформатора!***

## *Основные параметры трансформатора:*

1. Номинальное входное напряжение
2. Номинальное выходное напряжение
3. Номинальная полная мощность
4. Частота
5. Масса и габариты
6. Ток холостого хода (в % от номинального)
7. Напряжение короткого замыкания (в % от номинального)
8. Потребляемая в режиме ХХ активная мощность
9. Потребляемая в режиме КЗ активная мощность

# КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot cos(\phi_2) = S_2 \cdot cos(\phi_2)$$

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot cos(\phi_1) = P_2 + P_{эл} + P_{магн}$$

7.6. Трансформатор

$$P_{эл} = P_{кз}$$

$$P_{магн} = p_{уд} \cdot m = P_{хх} \cdot \beta^2$$

Коэффициент нагрузки трансформатора

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1ном}} = \frac{I_2}{I_{2ном}}$$

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot cos(\phi_2)}{\beta \cdot S_{ном} \cdot cos(\phi_2) + \beta^2 \cdot P_{кз} + P_{хх}}$$