

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА

Вихрековый метод электромагнитного контроля основан на законе электромагнитной индукции. При подаче переменного тока в катушку индуктивности, намотанную на контролируемый объект, в нем возникают вихревые токи. Эти токи создают магнитное поле, которое взаимодействует с полем катушки, вызывая искажения магнитного потока. Эти искажения регистрируются датчиками, позволяя выявлять дефекты.

В зависимости от типа дефекта (трещина, коррозия, изменение геометрии) вихревые токи будут концентрироваться в определенных областях, что приведет к локальным изменениям магнитного поля. Эти изменения можно измерить с помощью датчиков, расположенных вокруг объекта.

Вихрековый метод не требует контакта с объектом и не требует специальной подготовки поверхности. Он позволяет обнаруживать дефекты в различных материалах, включая ферромагнитные и немагнитные металлы.

ОСНОВНЫЕ ПОЗИЦИИ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНОВ

Контроль деталей вагонов осуществляется с помощью вихрекового метода. Основные позиции технологии контроля включают:

- Контроль сварных соединений.
- Контроль геометрии деталей.
- Контроль коррозии.
- Контроль трещин.

СРЕДСТВА ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ

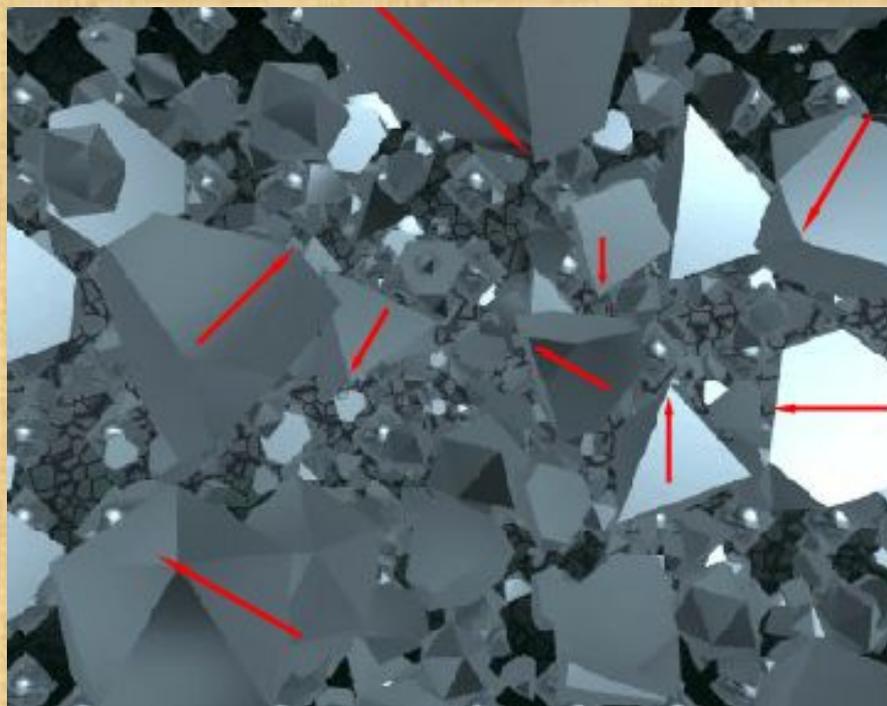
Наименование	Область применения	Преимущества	Недостатки
Вихрековый индукционный датчик	Обнаружение дефектов в проводящих материалах	Высокая чувствительность, не требует контакта	Только для проводящих материалов
Вихрековый датчик с датчиком магнитного поля	Обнаружение дефектов в ферромагнитных материалах	Высокая чувствительность, не требует контакта	Только для ферромагнитных материалов
Вихрековый датчик с датчиком температуры	Обнаружение дефектов в материалах с температурной зависимостью свойств	Высокая чувствительность, не требует контакта	Только для материалов с температурной зависимостью свойств



Вихрековый контроль



Намагничивание и магнитные свойства материалов



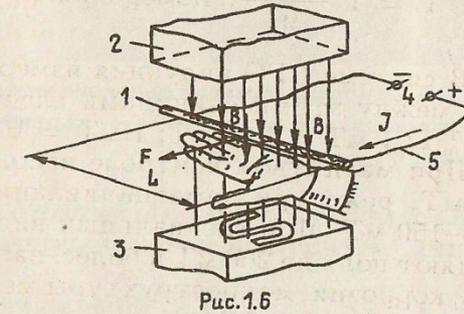
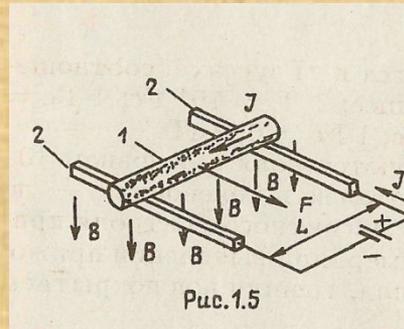
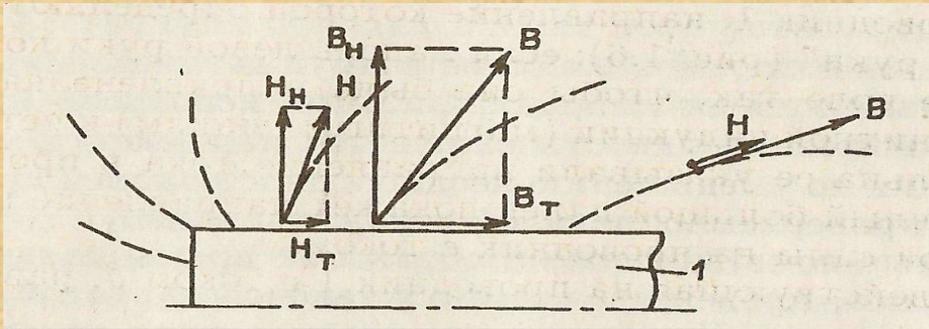
$$J = \frac{M}{V}$$

результатирующий магнитный момент

объем материала (вещества)

Намагниченность равна векторной сумме магнитных моментов атомов в единице объема ферромагнитного материала.

Магнитная индукция (B)



$$B = \mu_0 \times (H + J)$$

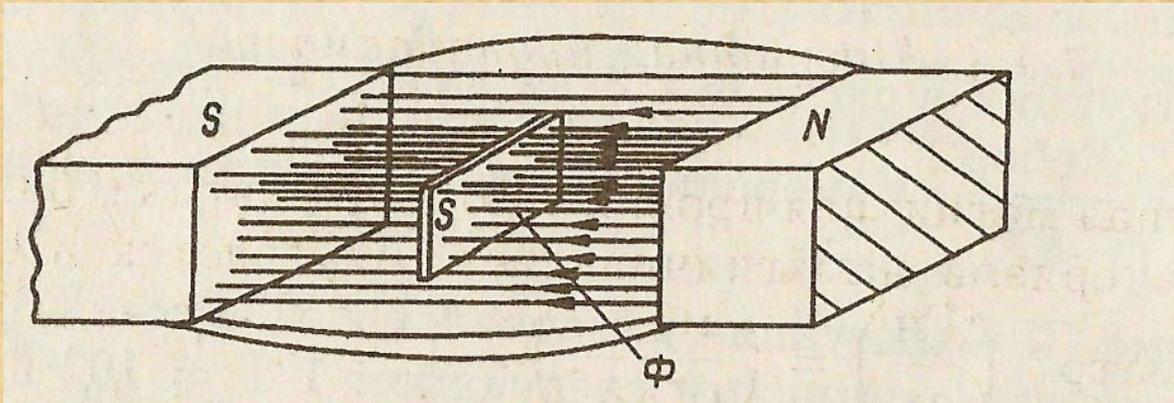
$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$$
 - магнитная постоянная, Гн/м
H - напряженность магнитного поля, А/см
J - намагниченность, А/см

Магнитная индукция в системе СИ измеряется в теслах (Тл), а в системе СГС в гауссах.

$$1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$$

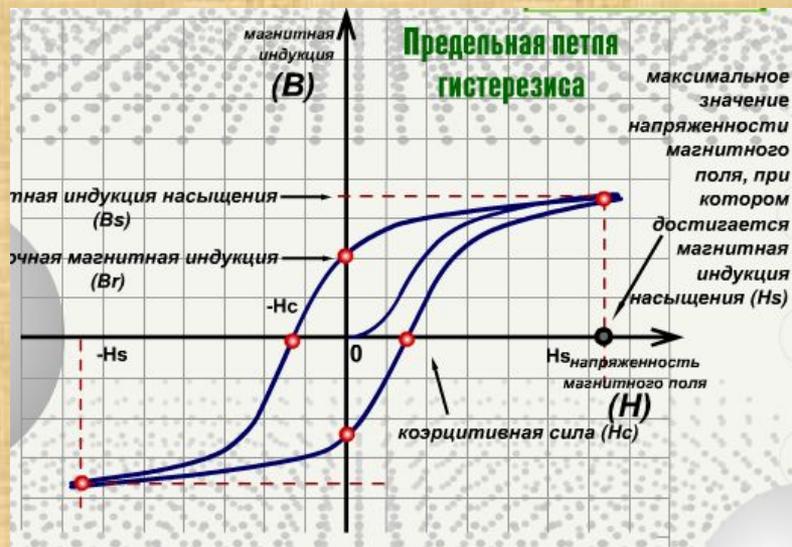
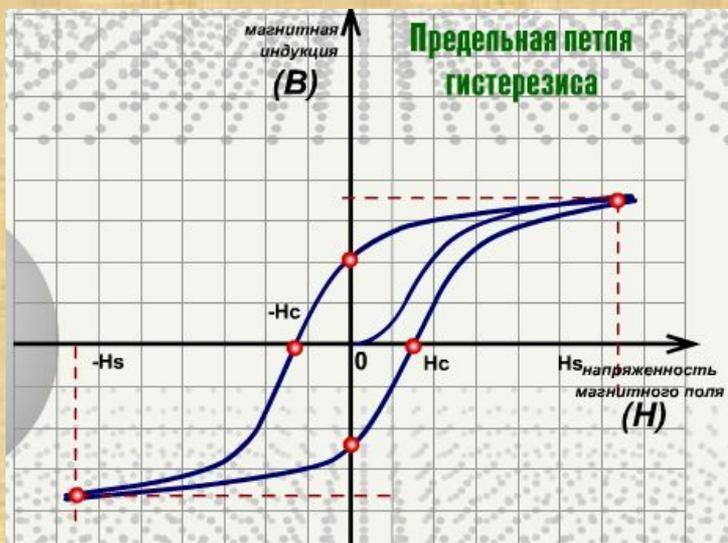
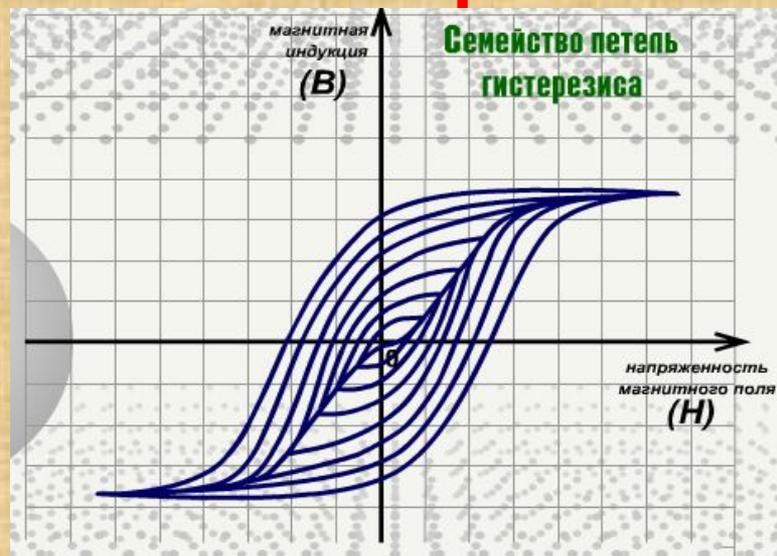
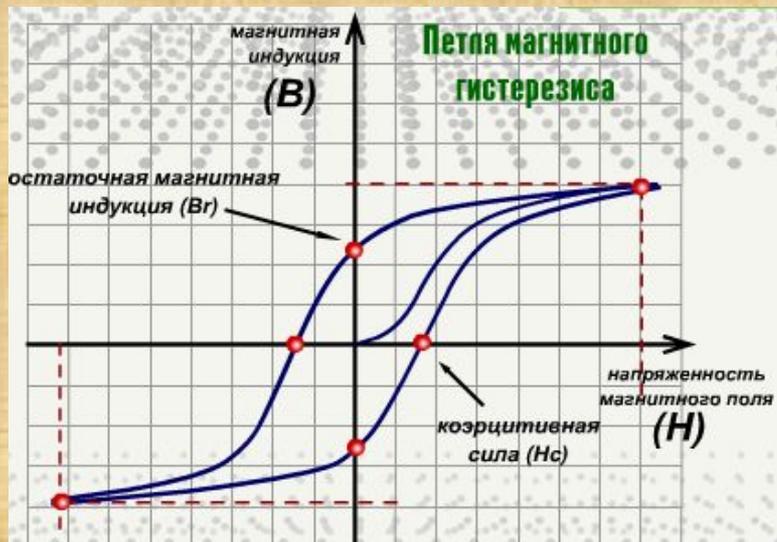
Магнитная индукция (B) - это векторная величина, характеризующая силовое действие магнитного поля в веществе и прямо зависит от значения магнитной постоянной, напряженности магнитного поля и намагниченности.

Магнитный поток (Φ) и Напряженность (H)



$$H = \frac{B}{\mu_a}$$

Петля магнитного гистерезиса



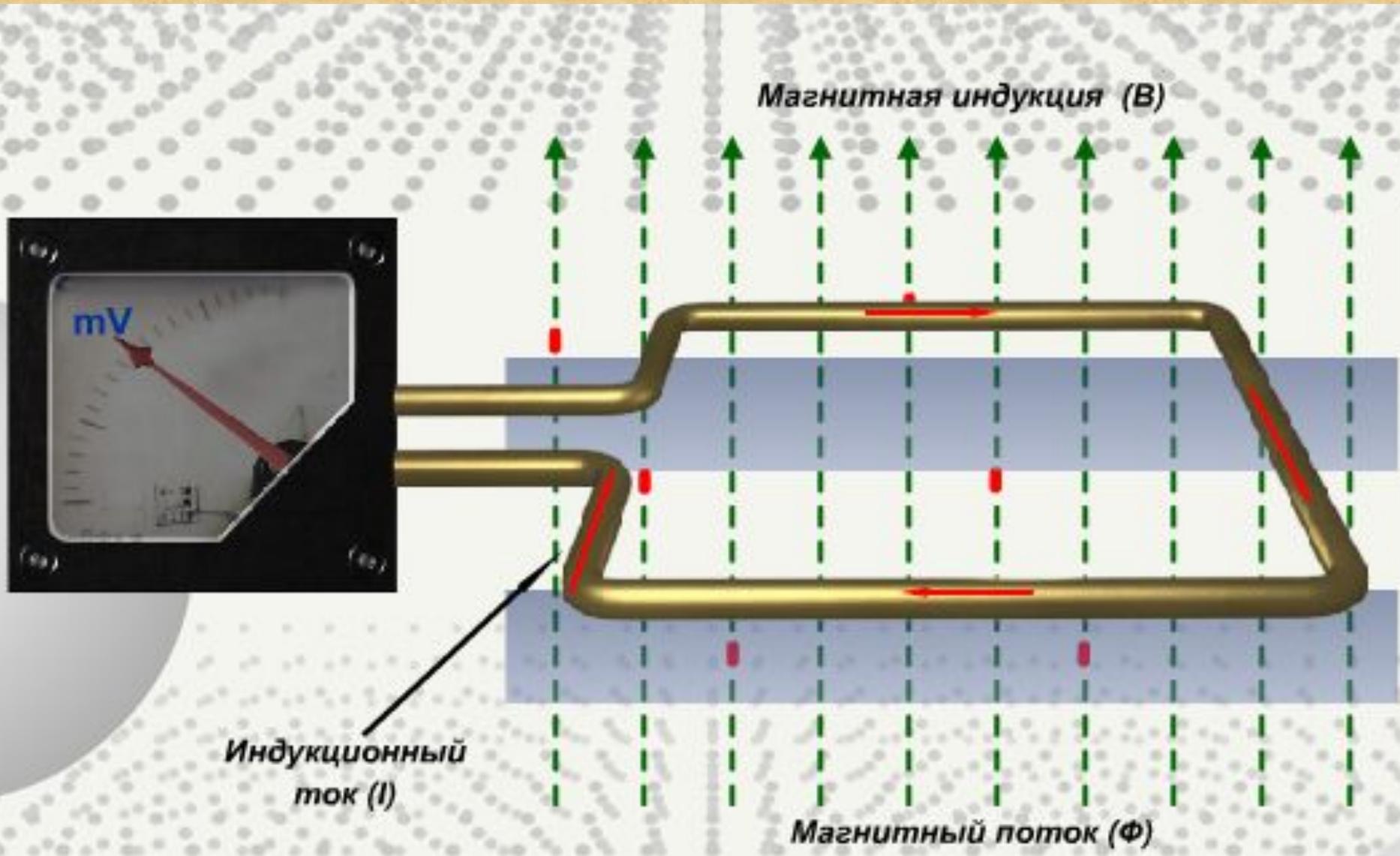
Остаточная индукция, Коэрцитивная сила, Магнитная индукция насыщения

Остаточная индукция - это индукция, которая остается в предварительно намагниченном до насыщения материале после снятия внешнего магнитного поля.

Коэрцитивная сила (H_c) - напряженность внешнего магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного до насыщения ферромагнетика.

Магнитная индукция насыщения (B_s) - магнитная индукция, соответствующая значению напряженности магнитного поля насыщения H_s (определяется по предельной петле гистерезиса).

Электромагнитная индукция

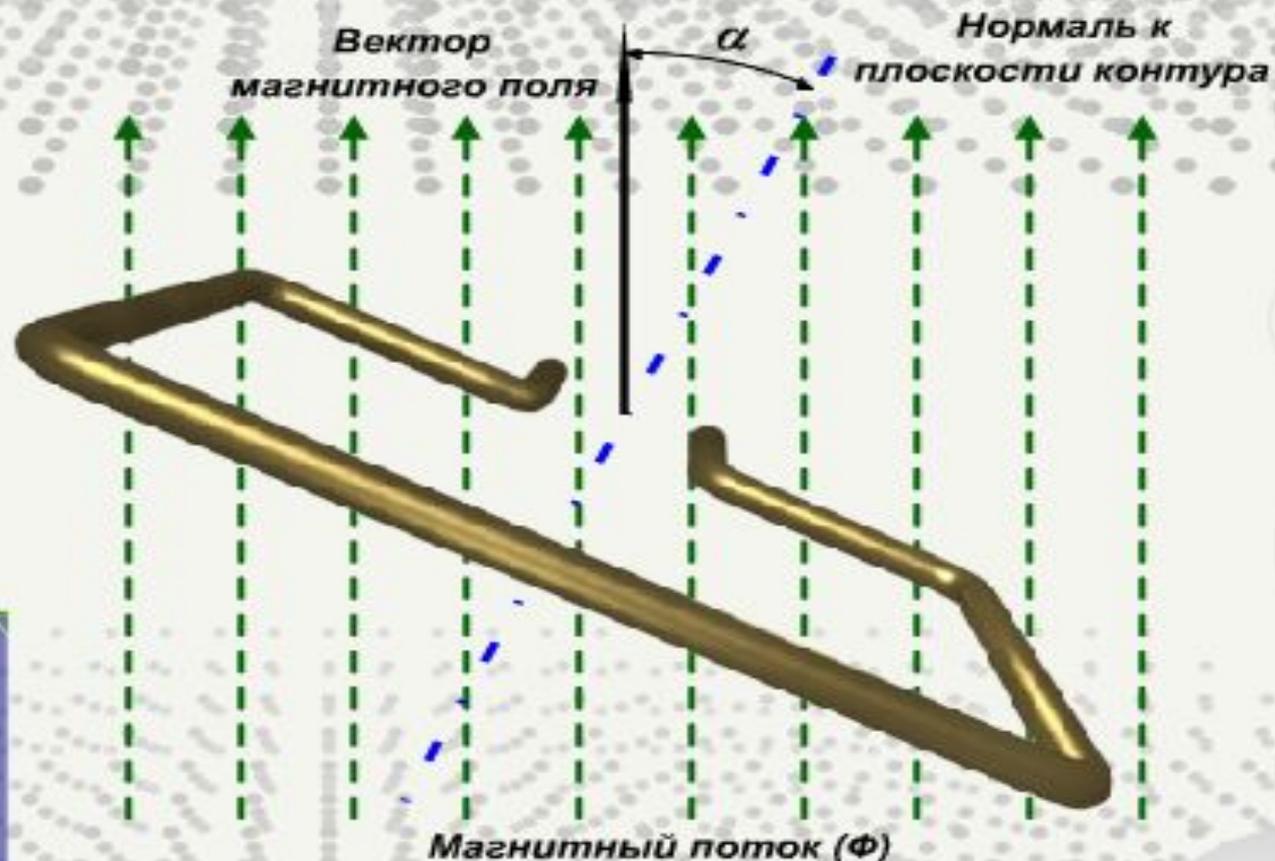


Магнитный поток



$$\Phi = B \times S \times \cos \alpha$$

Φ -магнитный поток
 B -магнитная индукция
 S -площадь проводящего контура



Проводящий контур, помещенный в однородное постоянное магнитное поле, пронизывается магнитным потоком, который зависит от магнитной индукции, **площади** проводящего контура, и **угла** между нормалью к плоскости контура и вектором магнитного поля.

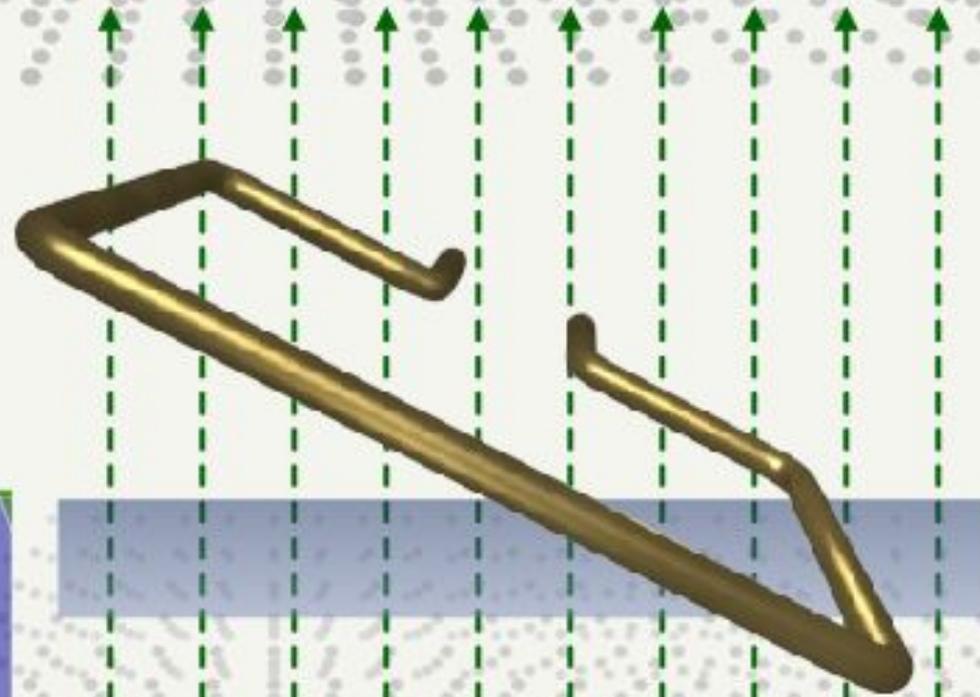
Электродвижущая сила



$$e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

e - электродвижущая сила,
Вольт (В);

$\Delta\Phi$ - изменение магнитного



Магнитный поток (Φ)

При всяком изменении магнитного потока $\Delta\Phi$, пронизывающего проводящий контур, в интервале времени Δt в этом контуре индуцируется э.д.с.

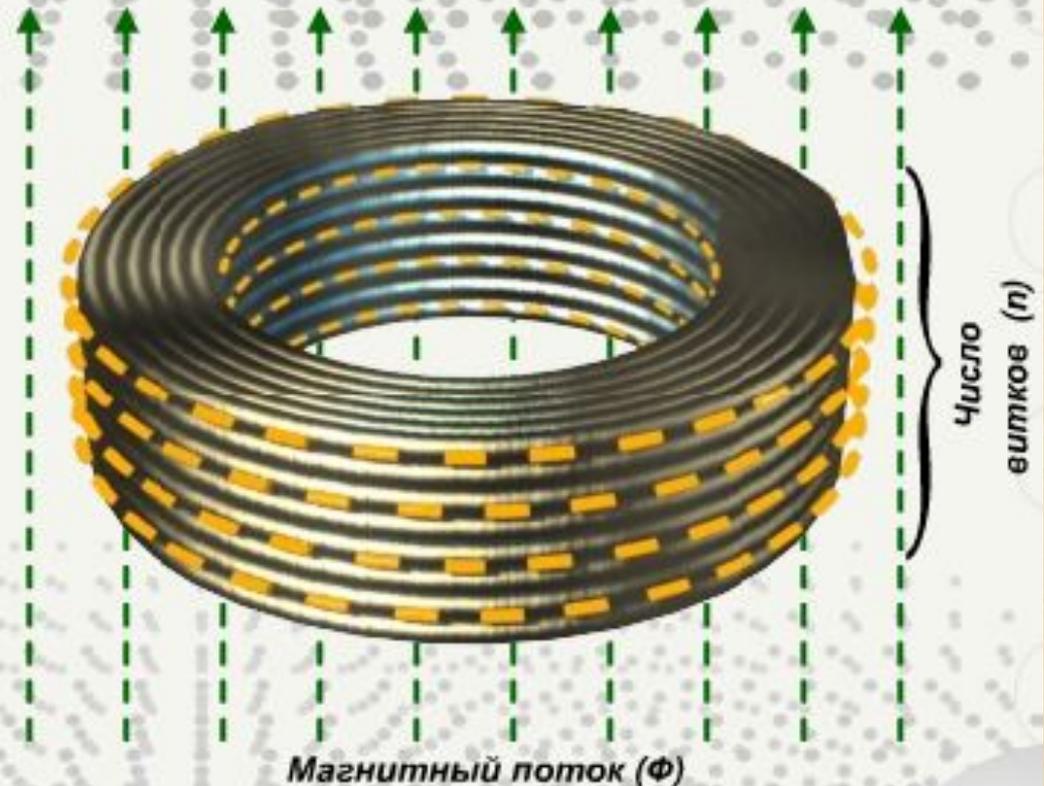
Потокосцепление катушки



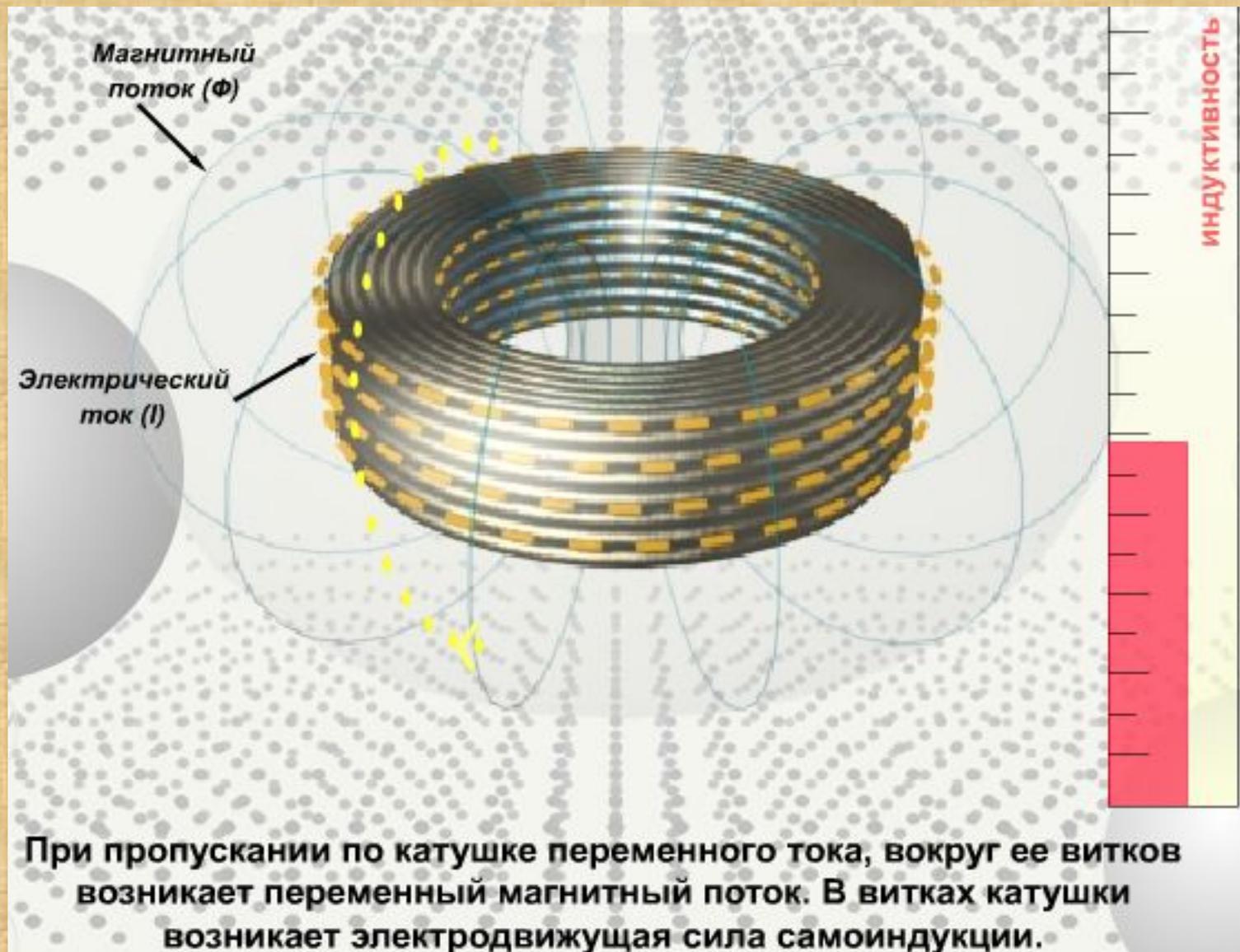
$$e = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta\Psi}{\Delta t}$$

n - количество витков катушки

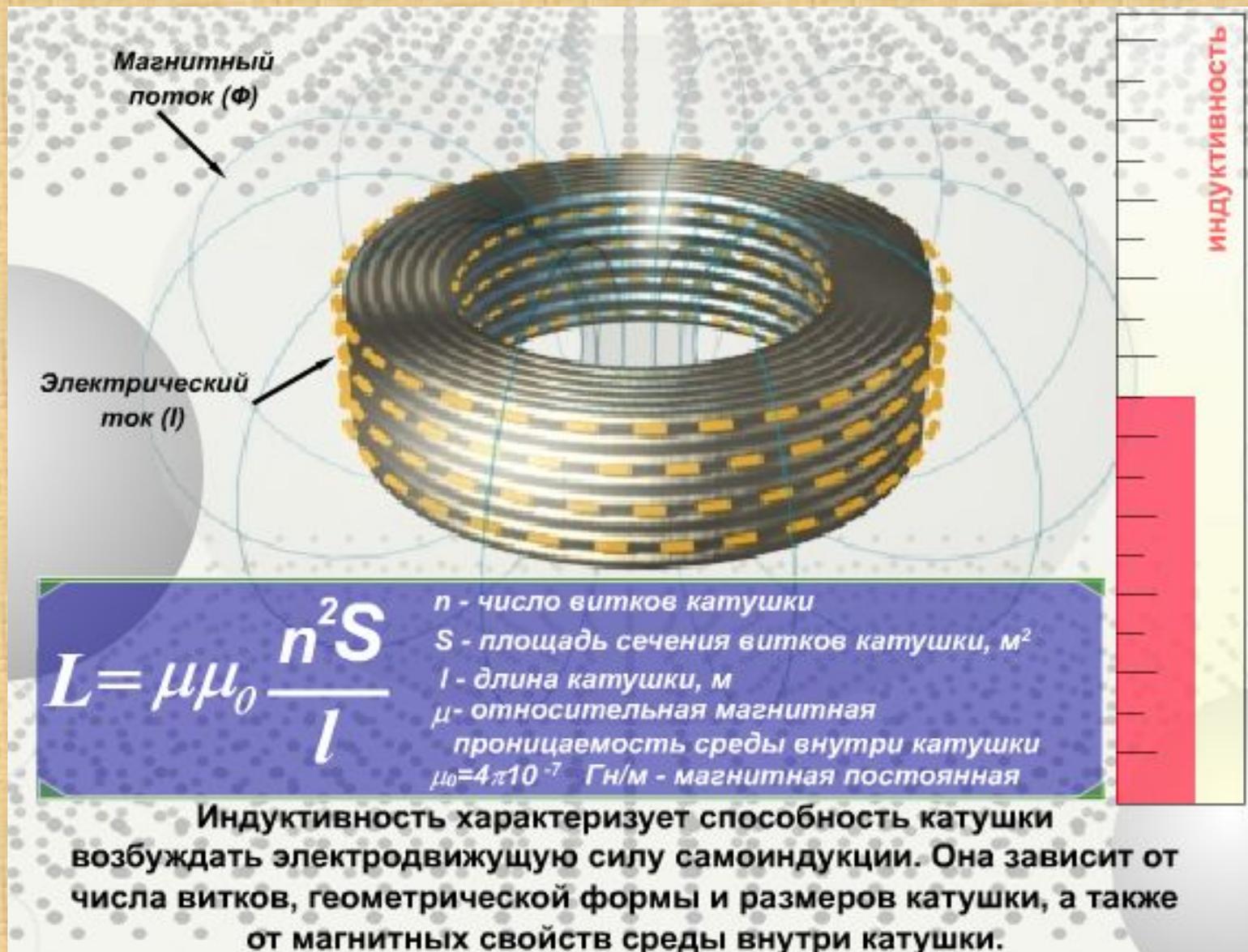
$\Psi = n \times \Phi$ - потокосцепление катушки, Вебер (Вб).



Самоиндукция



Индуктивность



Магнитный поток (Φ)

Электрический ток (I)

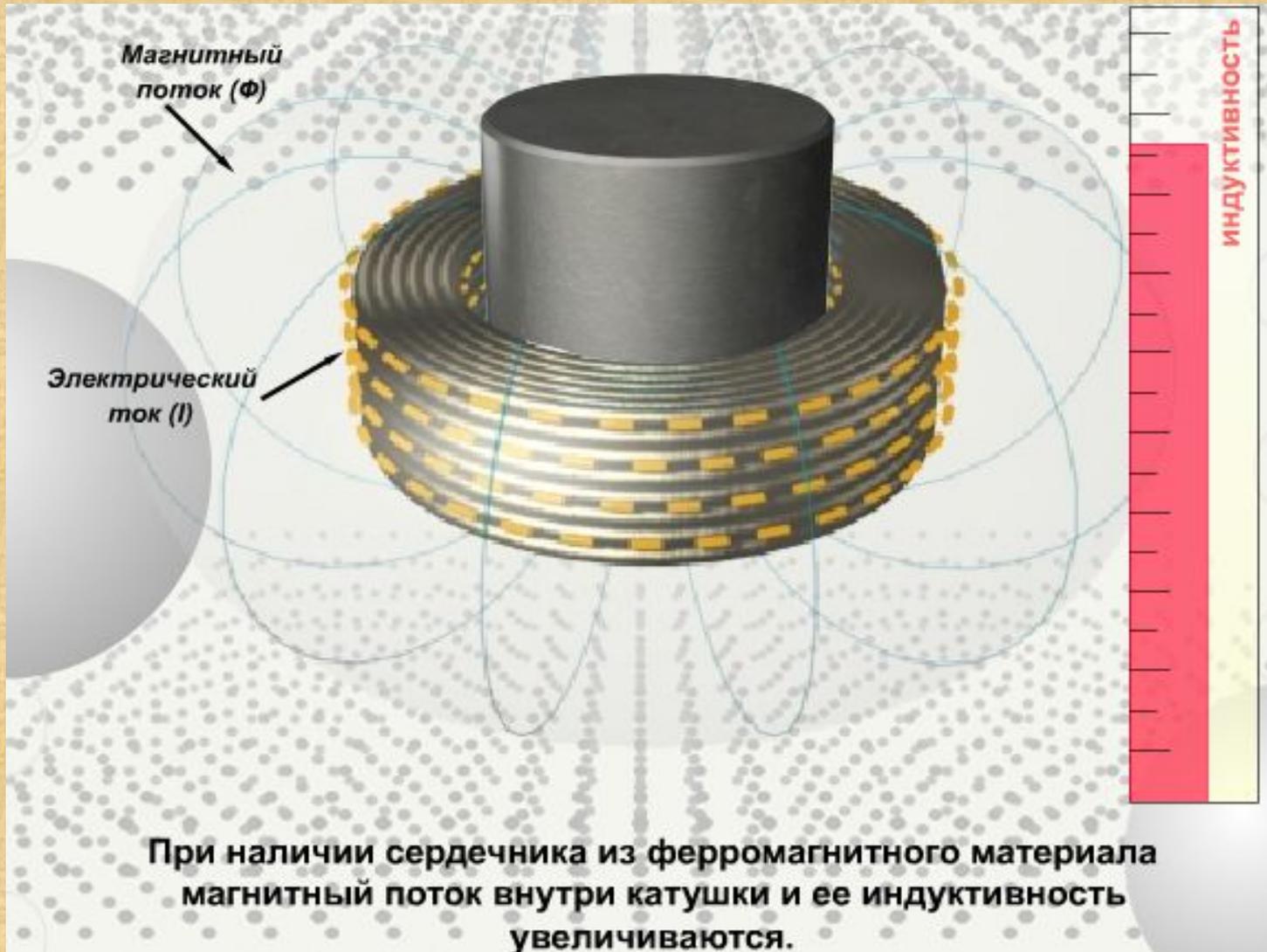
ИНДУКТИВНОСТЬ

$$L = \mu\mu_0 \frac{n^2 S}{l}$$

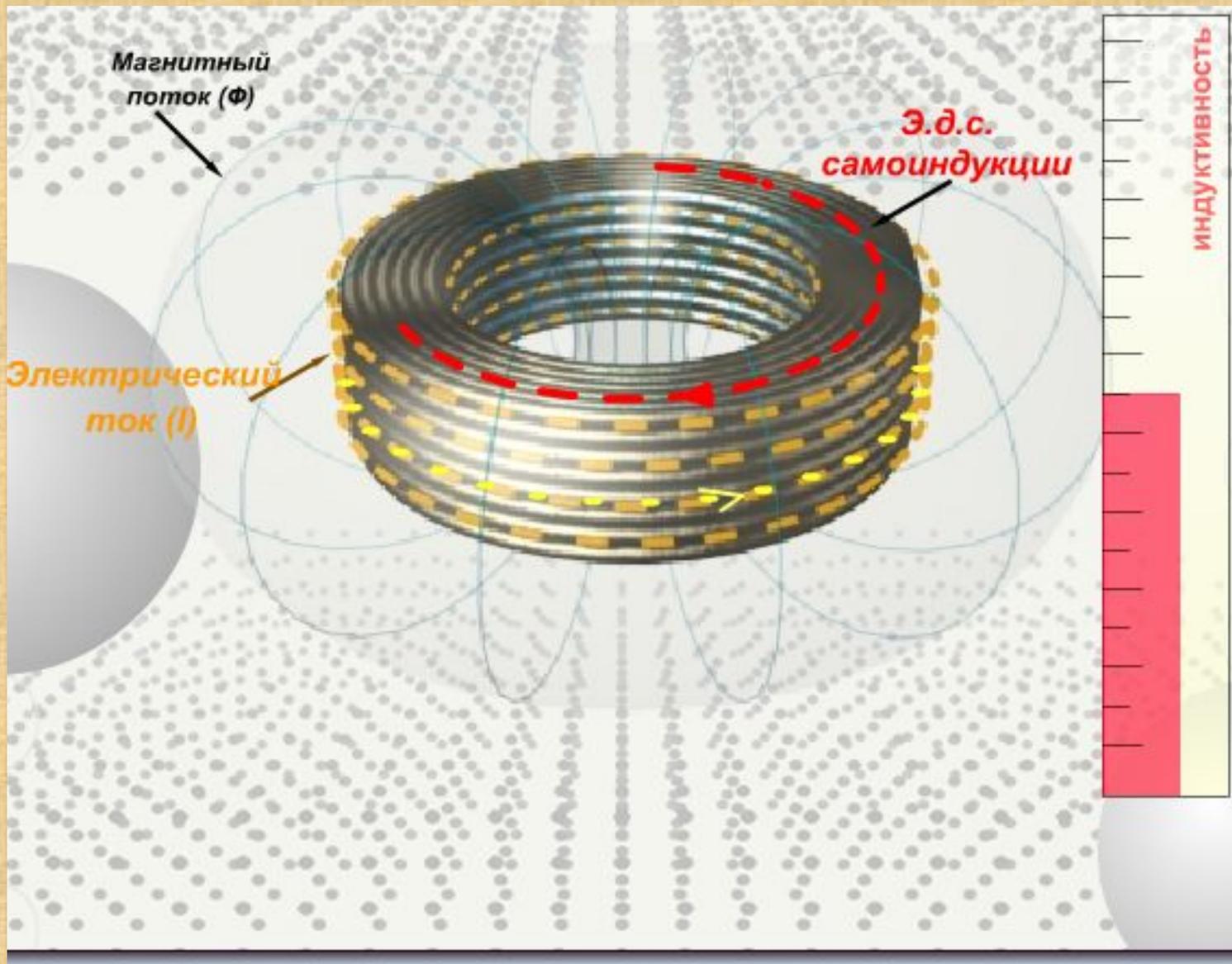
n - число витков катушки
 S - площадь сечения витков катушки, м^2
 l - длина катушки, м
 μ - относительная магнитная проницаемость среды внутри катушки
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная

Индуктивность характеризует способность катушки возбуждать электродвижущую силу самоиндукции. Она зависит от числа витков, геометрической формы и размеров катушки, а также от магнитных свойств среды внутри катушки.

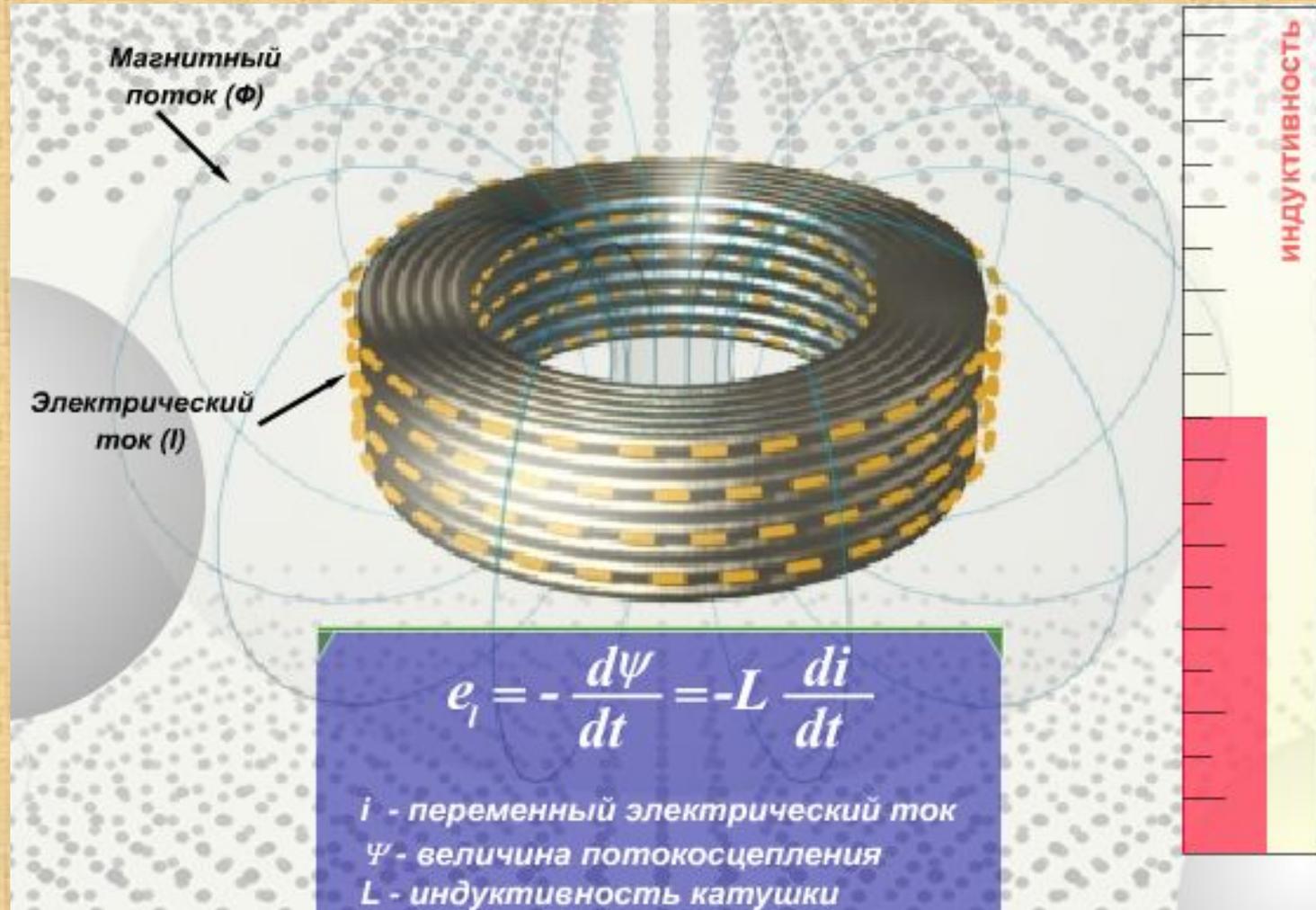
Ферромагнитный сердечник и ИНДУКТИВНОСТЬ



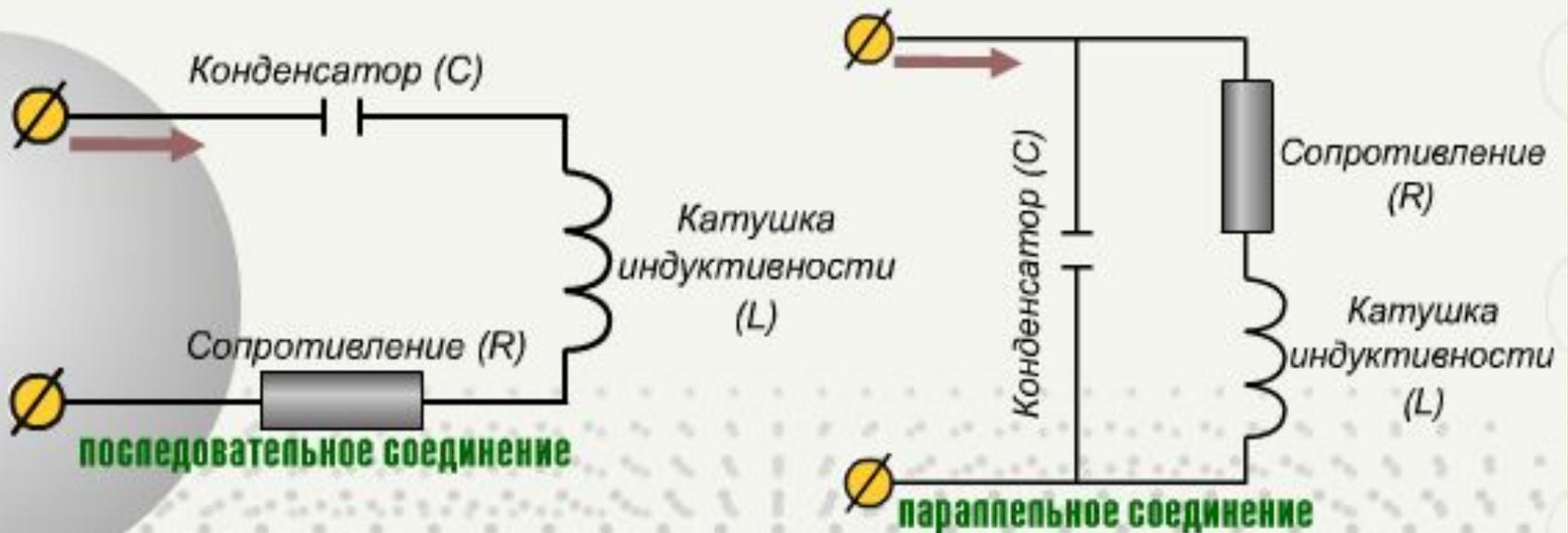
Направление тока и ЭДС



Индуктивность и ЭДС



Колебательный контур



Колебательным контуром называется электрическая цепь, состоящая из конденсатора и катушки соединенных последовательно или параллельно.

Основные формулы колебательного контура

резонансная характеристика

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}$$

резонансная частота

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

фазовая характеристика

$$\varphi = \arctg \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$$

добротность контура

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R}$$

I - электрический ток

U - приложенное к контуру синусоидальное напряжение

R - сопротивление

C - емкость конденсатора

L - индуктивность катушки

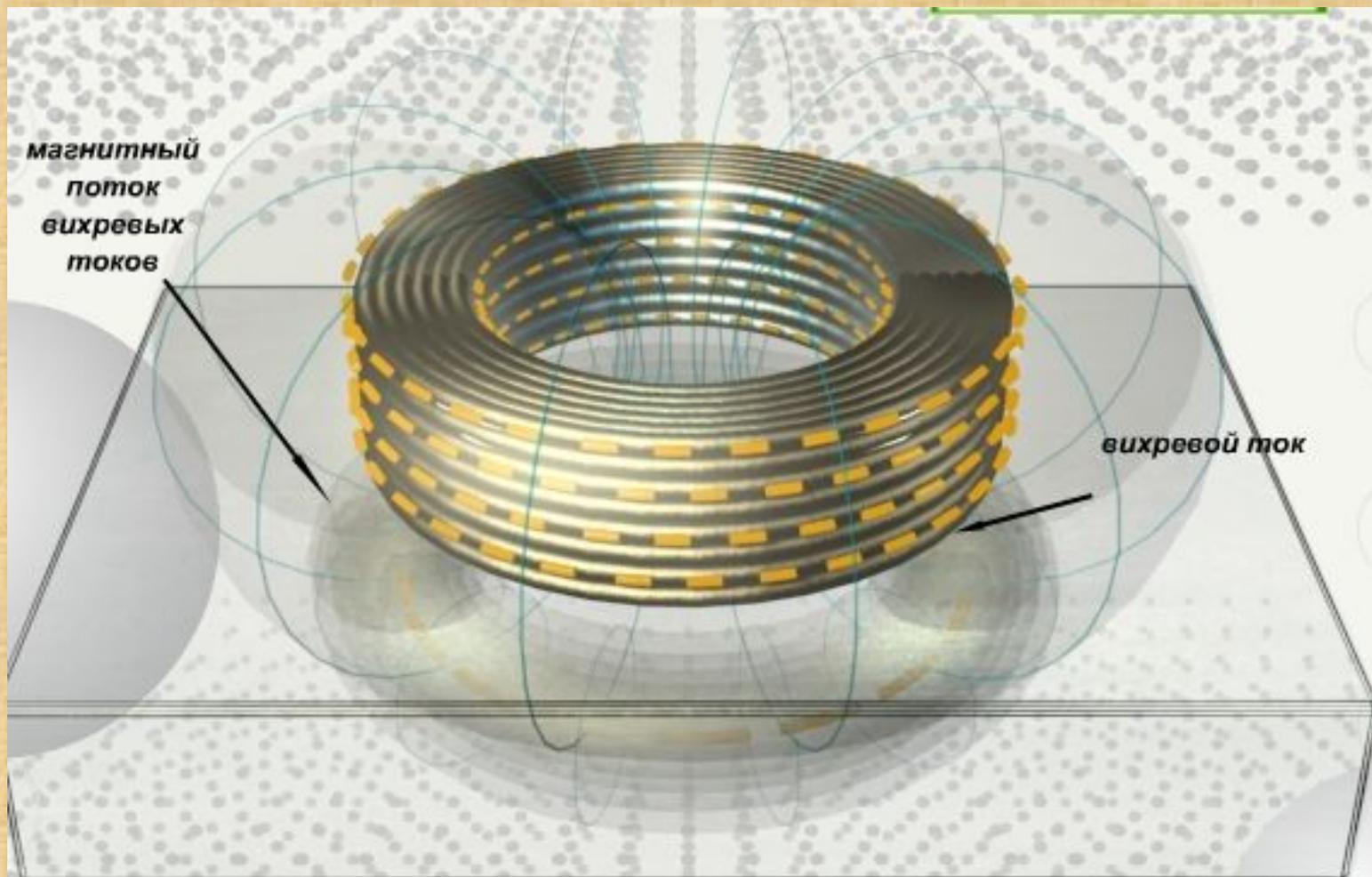
ω - круговая частота

f_0 - резонансная частота колебательного контура

φ - зависимость сдвига фазы между приложенным к контуру напряжением U и током в контуре I от частоты

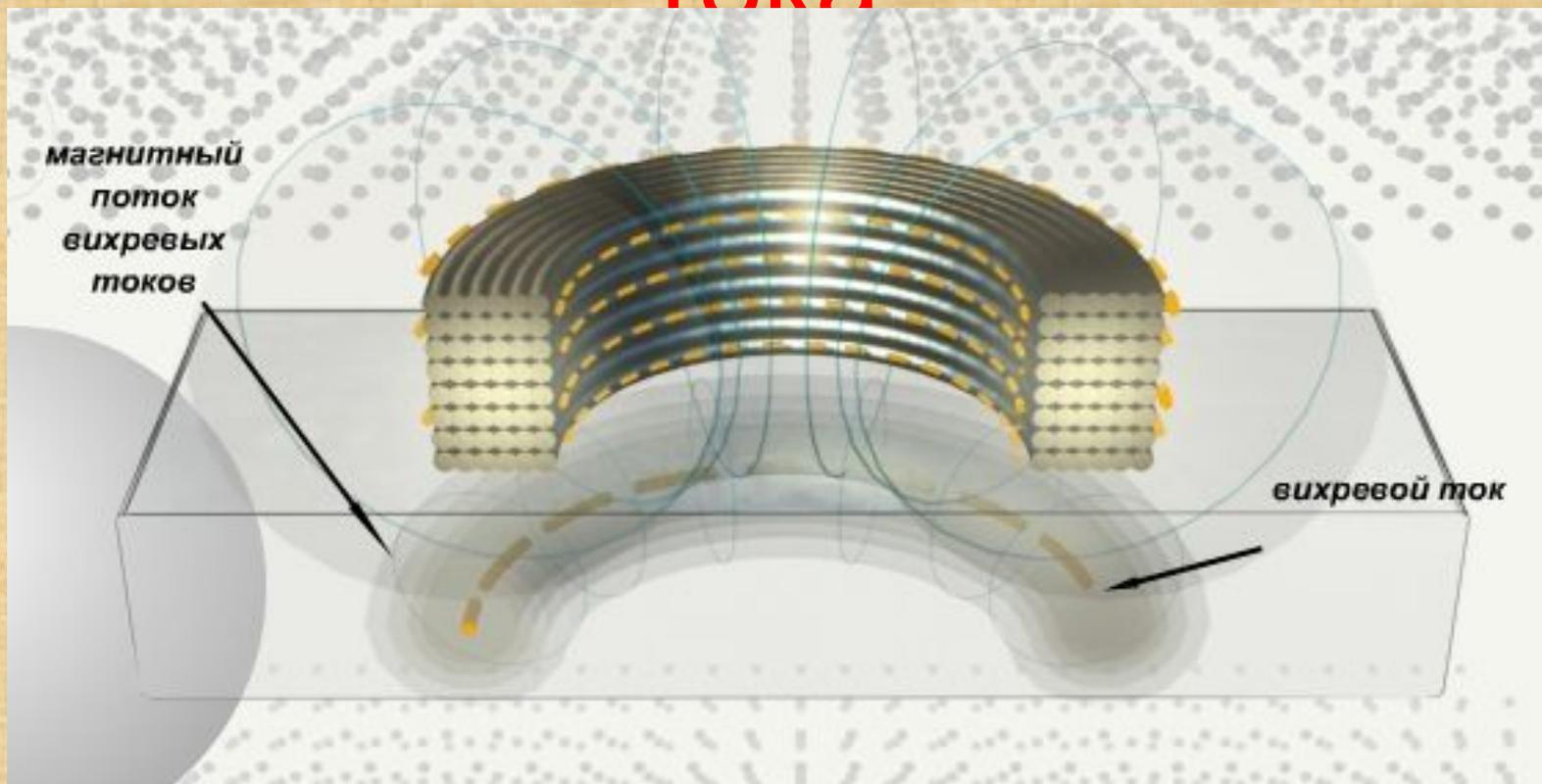
Q - добротность контура

Вихревые токи



Индукционные токи, возникающие в электропроводящих материалах при воздействии на них изменяющегося магнитного поля называются **вихревыми токами**.

Плотность электрического тока

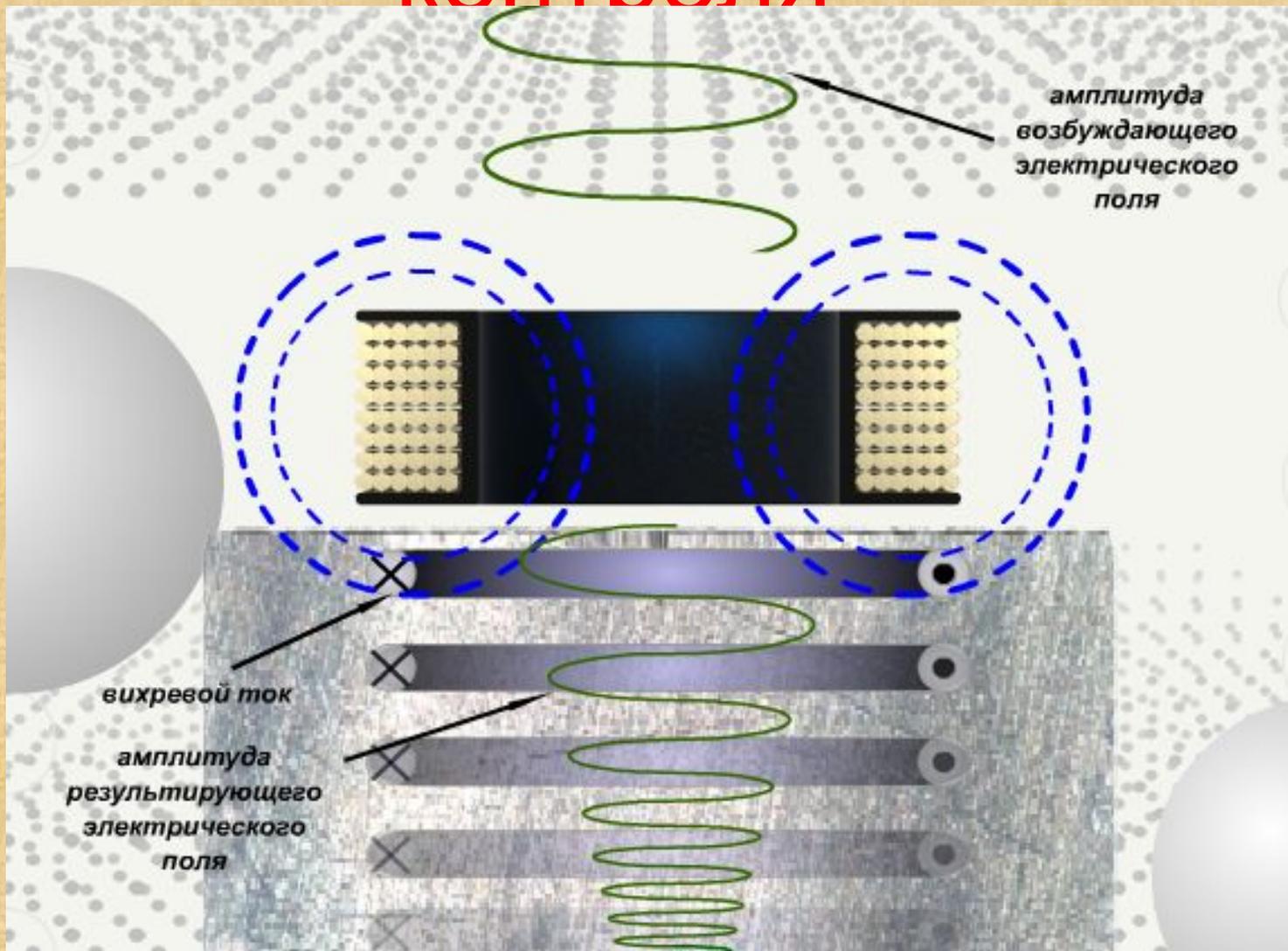


$$j = \sigma E$$

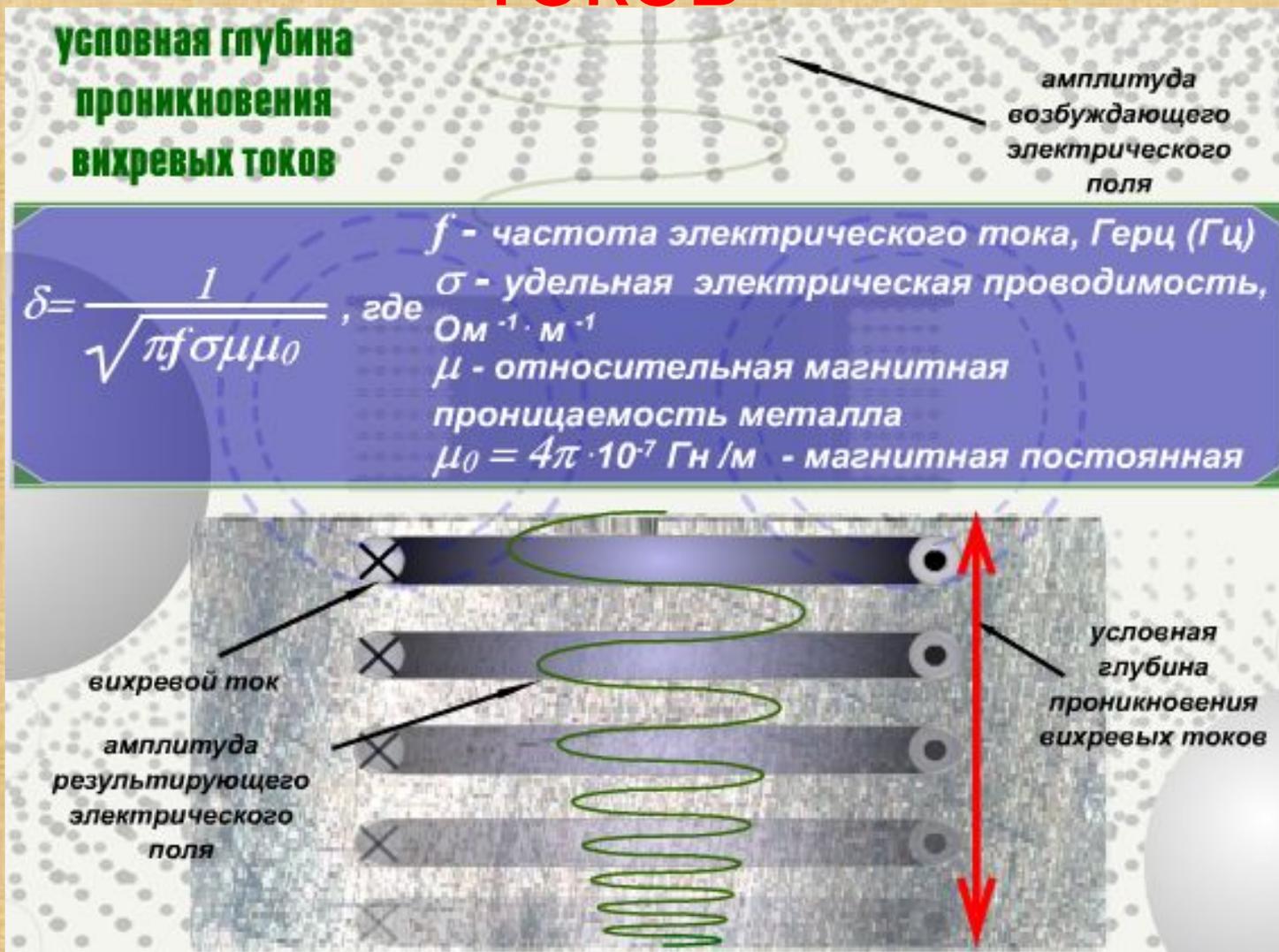
$$\rho = 1/\sigma$$

j - плотность электрического тока
 E - напряженность электрического поля
 σ - удельная электрическая проводимость
 ρ - удельное электрическое сопротивление

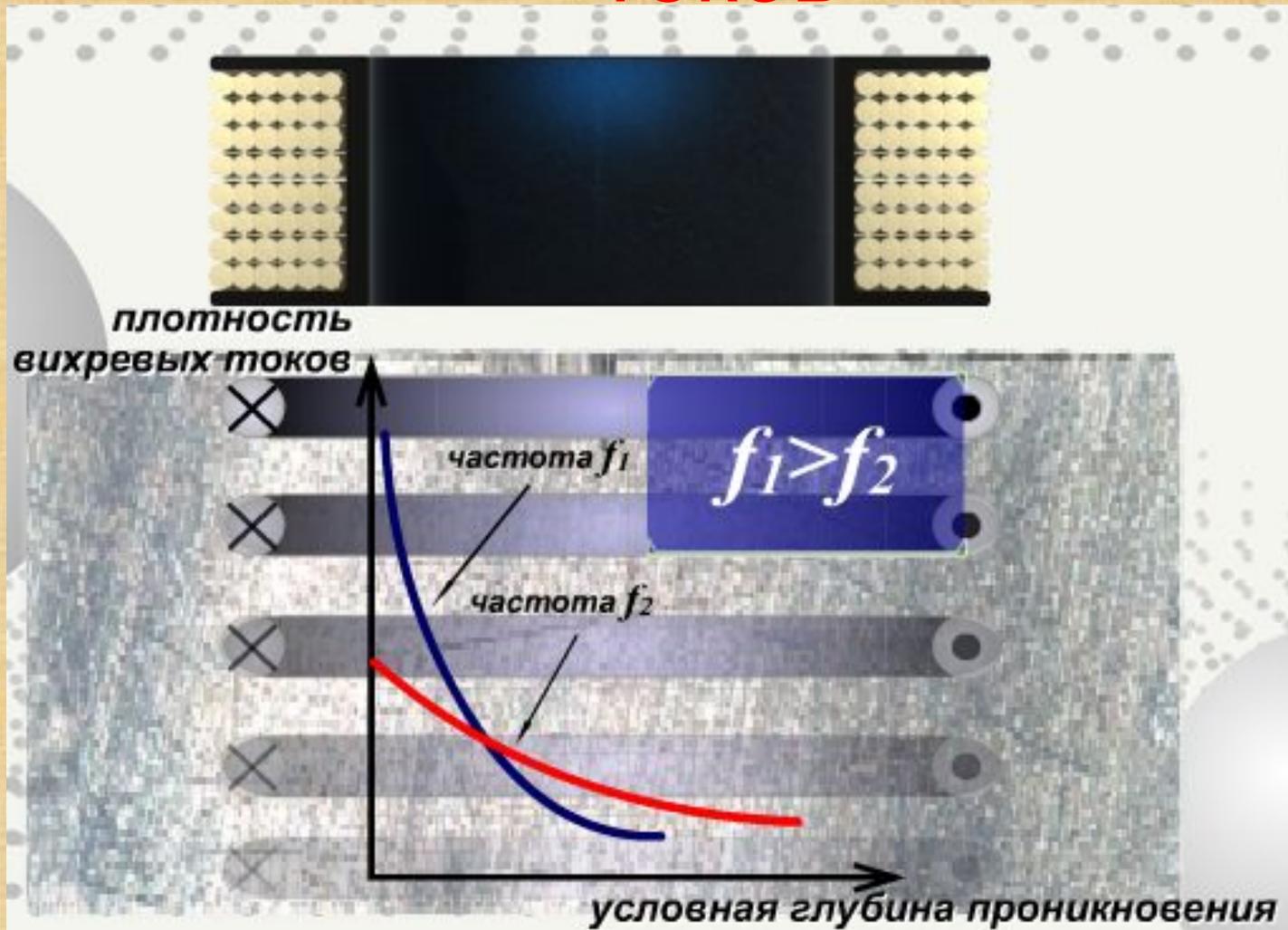
Физика вихретокового КОНТРОЛЯ



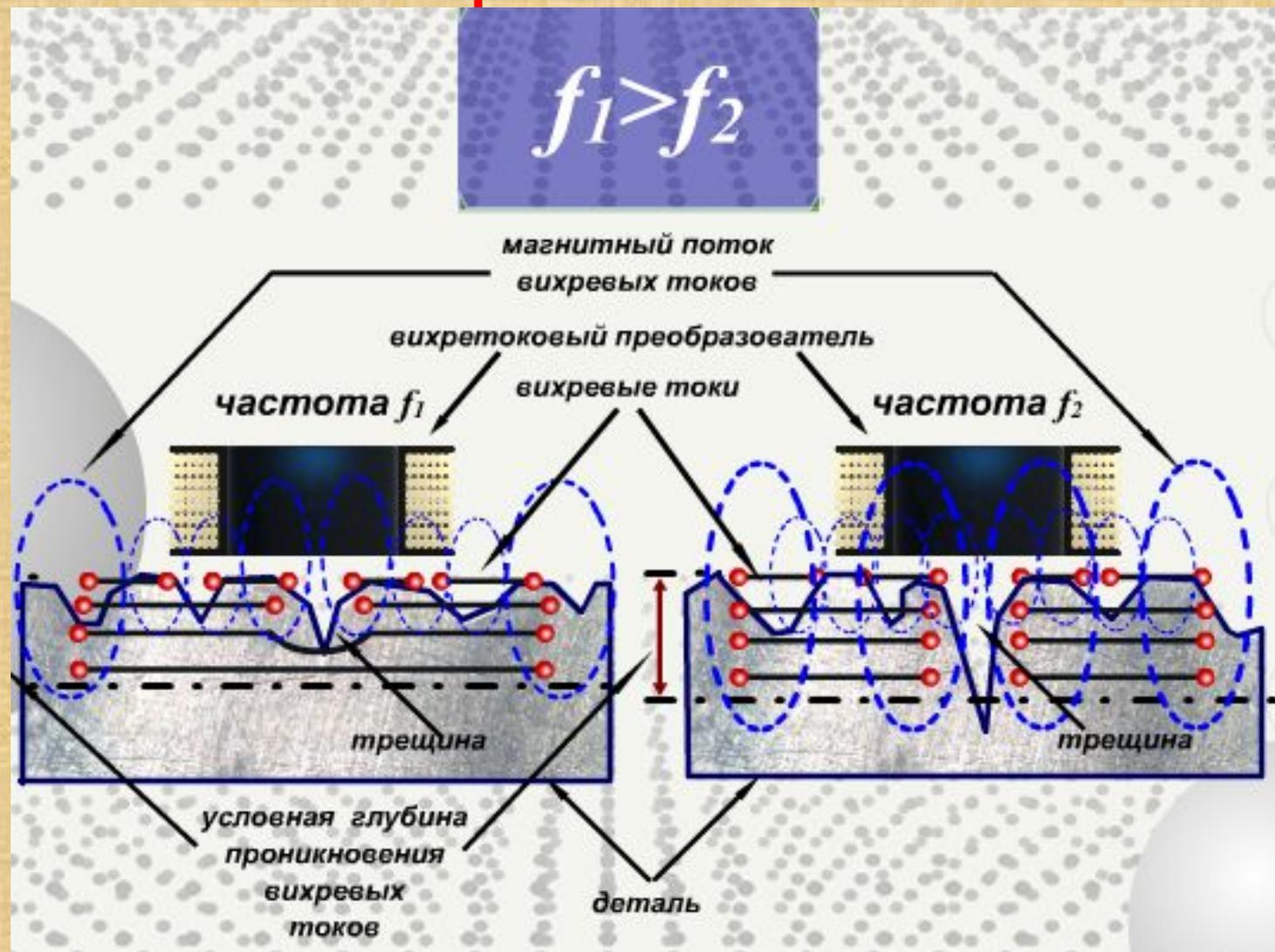
Проникновение вихревых ТОКОВ



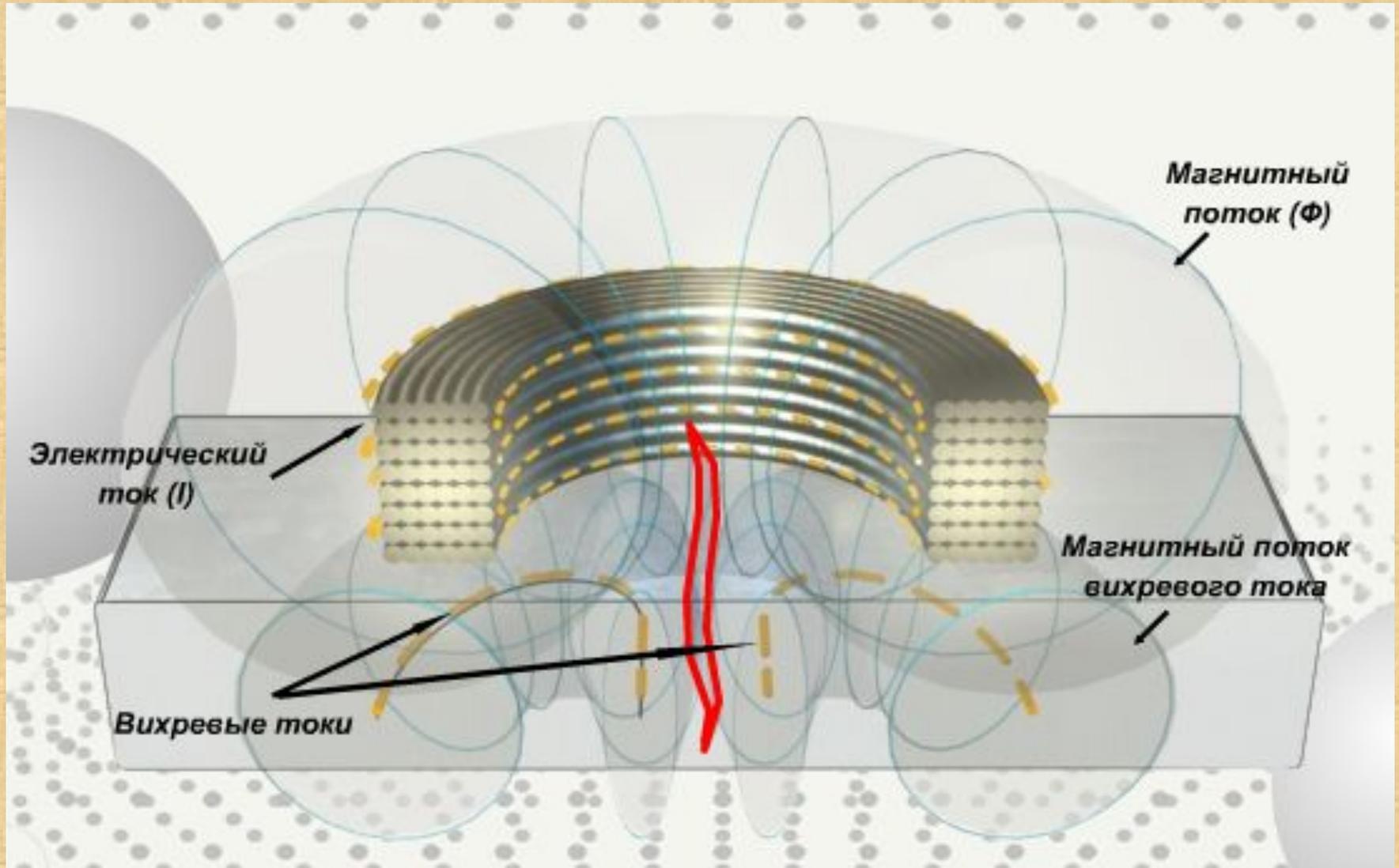
Чем выше частота тока тем меньше проникновение вихревых ТОКОВ



Выбор частоты в зависимости от шероховатости



Выявление трещины под катушкой



Активное и индуктивное сопротивление

- **Активное сопротивление** - это сопротивление цепи переменному току вызывающее безвозвратные потери энергии переменного тока.
- Причины вызывающие безвозвратные потери переменного тока:
 - -противодействие материала проводника
 - -поверхностный эффект
 - -вихревые токи (они образуются в сердечниках катушек и нагревают их)
 - -потери энергии электрического тока за счет перемангничивания сердечника, т. е. на ликвидацию остаточного магнетизма при перемангничивании сердечника
 - -потери за счет излучения электромагнитной энергии (любой проводник по которому идет переменный ток излучает электромагнитные волны которые уходят в пространство)
 - -в радиоаппаратуре при расположении проводов близко друг от друга, перекрестных токах

$$R = \frac{U}{I},$$

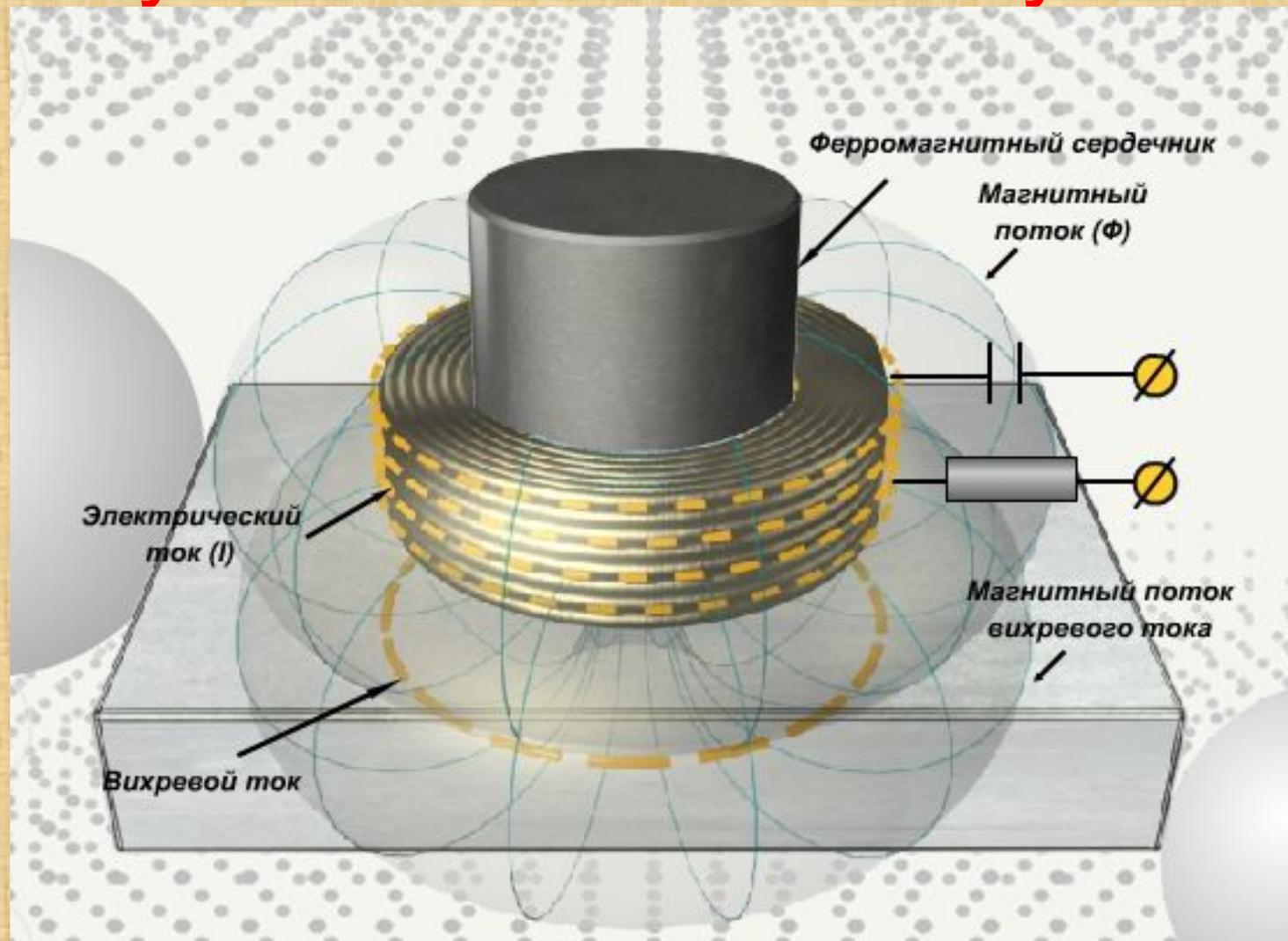
$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

- **Индуктивное сопротивление** - это противодействие тока самоиндукции катушки нарастающему току генератора.
- На преодоление этого противодействия затрачивается часть энергии переменного тока генератора. Вся эта часть энергии полностью превращается в энергию магнитного поля катушки. Когда ток генератора будет убывать, магнитное поле катушки тоже будет убывать пересекая витки катушки и индуцируя в цепи ток самоиндукции. Теперь ток самоиндукции будет идти в одном направлении с убывающим током генератора. Таким образом вся энергия затраченная током генератора на преодоление противодействия тока самоиндукции катушки полностью вернулась в цепь в виде энергии электрического тока. Поэтому индуктивное сопротивление является реактивным, что значит не вызывающим безвозвратных потерь энергии. Слово реакция обозначает обратное действие.

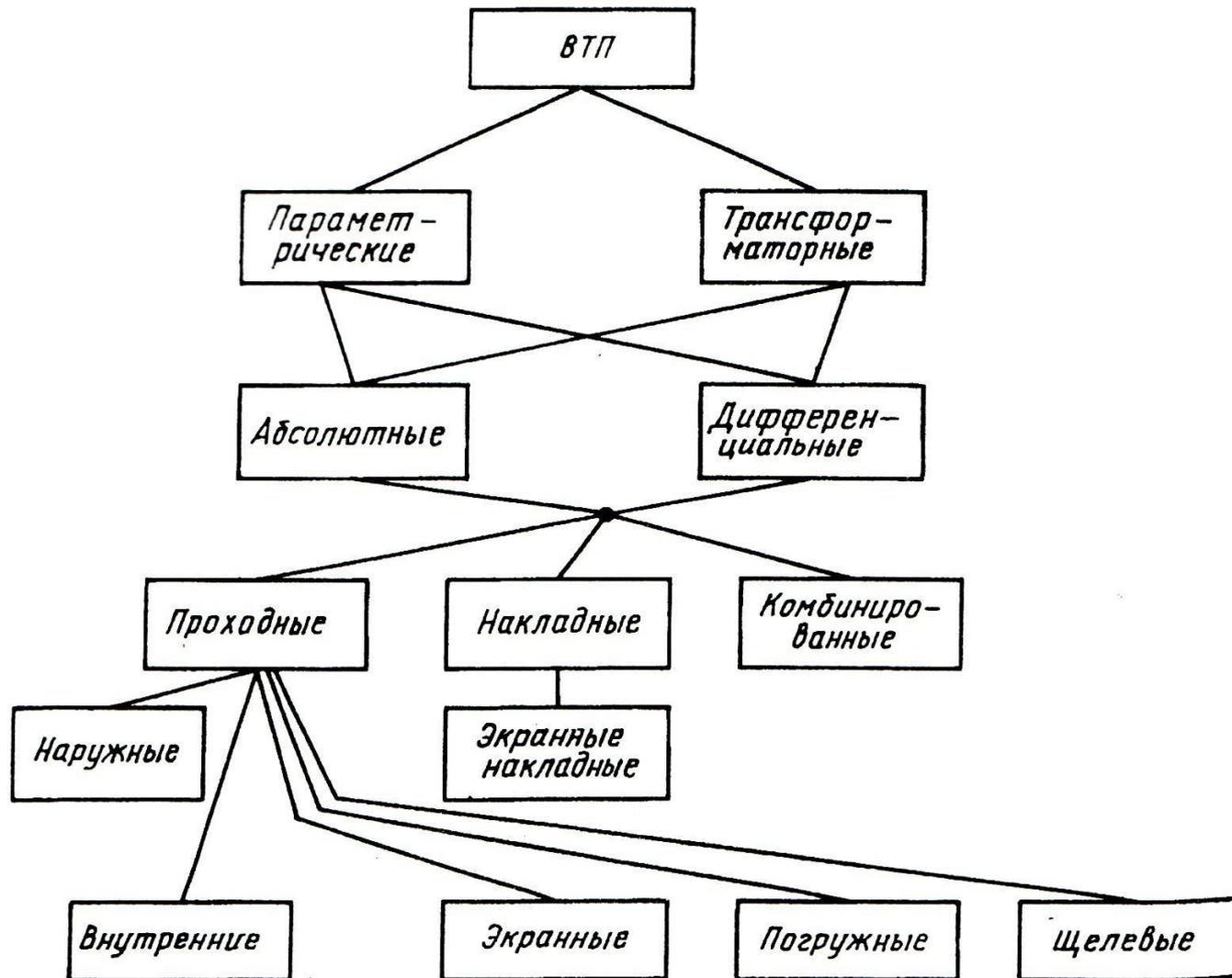
Индуктивное сопротивление

- Известно, что на встречу нарастающему току генератора идет ток самоиндукции катушки. Вот это противодействие тока самоиндукции катушки нарастающему току генератора и называется индуктивным сопротивлением.
- Единицей измерения индуктивного сопротивления является Ом
- Индуктивное сопротивление обозначается X_L .
- Буква X- означает реактивное сопротивление, а L означает что это реактивное сопротивление $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$ является индуктивным.
-
-
- f- частота Гц, L- индуктивность катушки Гн, X_L индуктивное сопротивление Ом

Методы повышения чувствительности катушки



Виды вихретоковых преобразователей



Вихретоковый преобразователь

Параметрический ВТП с сердечником



Параметрический ВТП без сердечника



Трансформаторный ВТП с двумя измерительными катушками с сердечниками

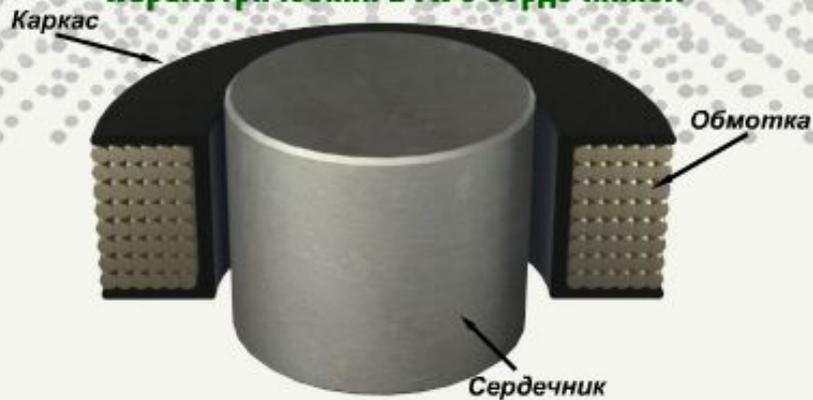


Трансформаторный ВТП с одной измерительной катушкой без сердечника



Параметрический преобразователь

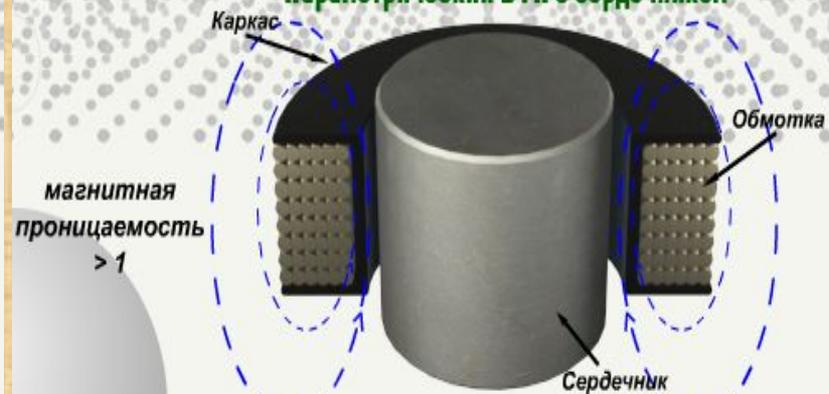
Параметрический ВТП с сердечником



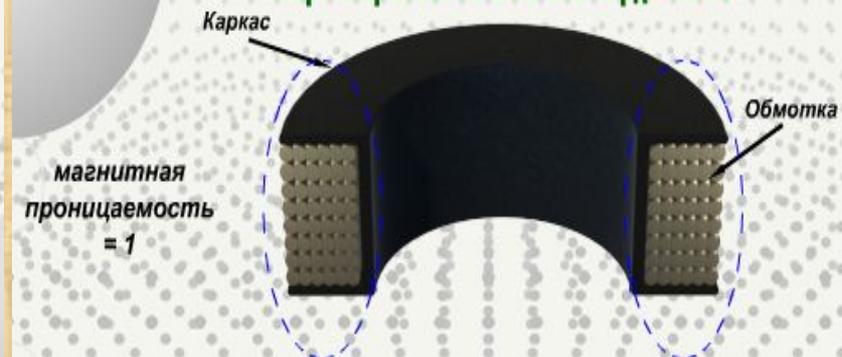
Параметрический ВТП без сердечника



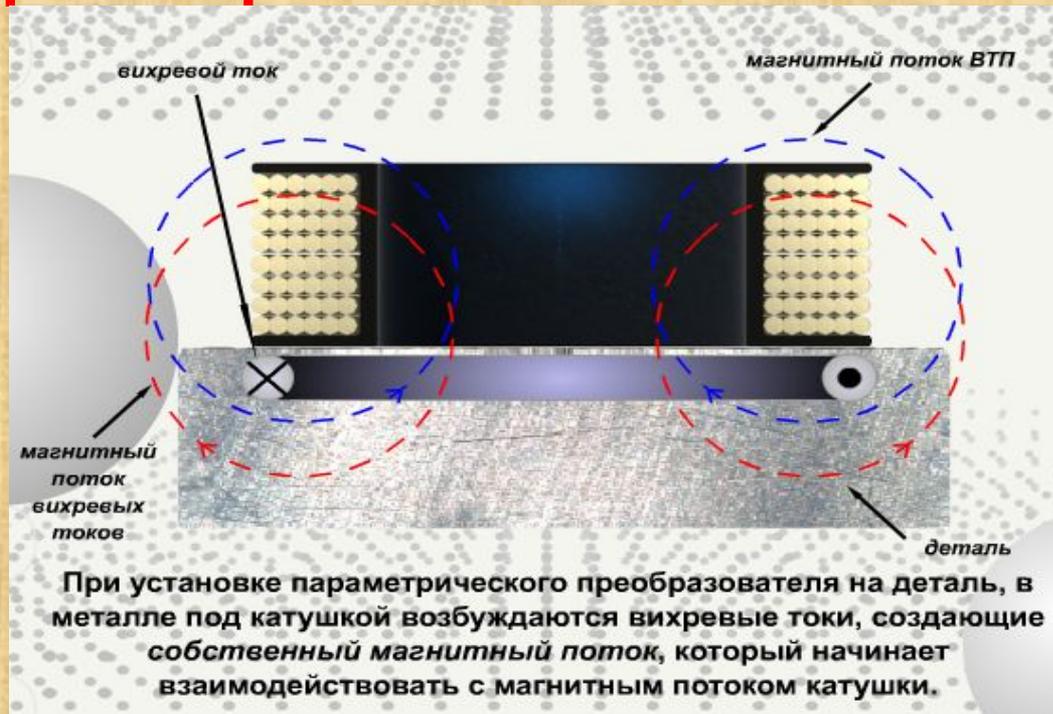
Параметрический ВТП с сердечником



Параметрический ВТП без сердечника



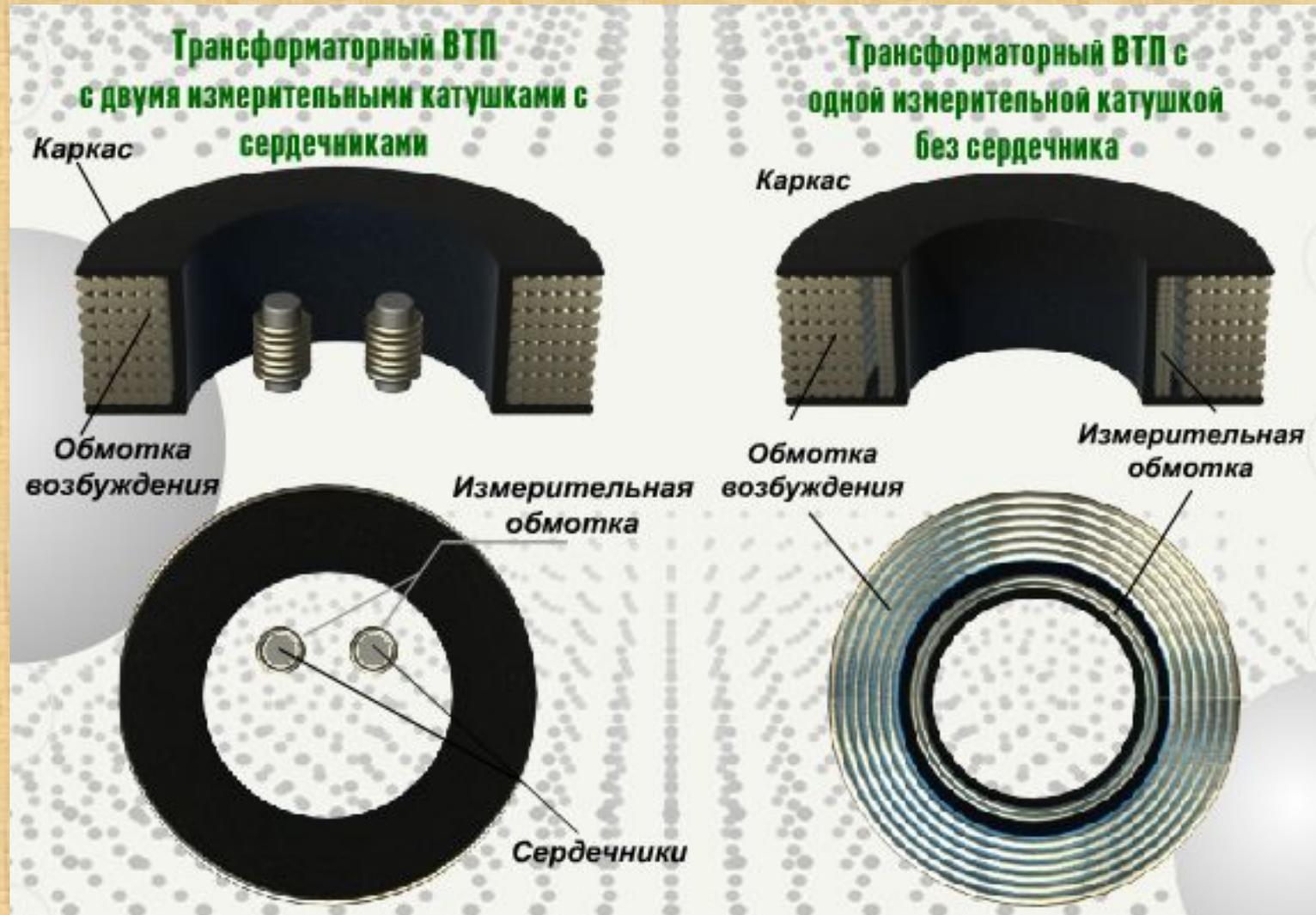
Параметрический преобразователь и ОК



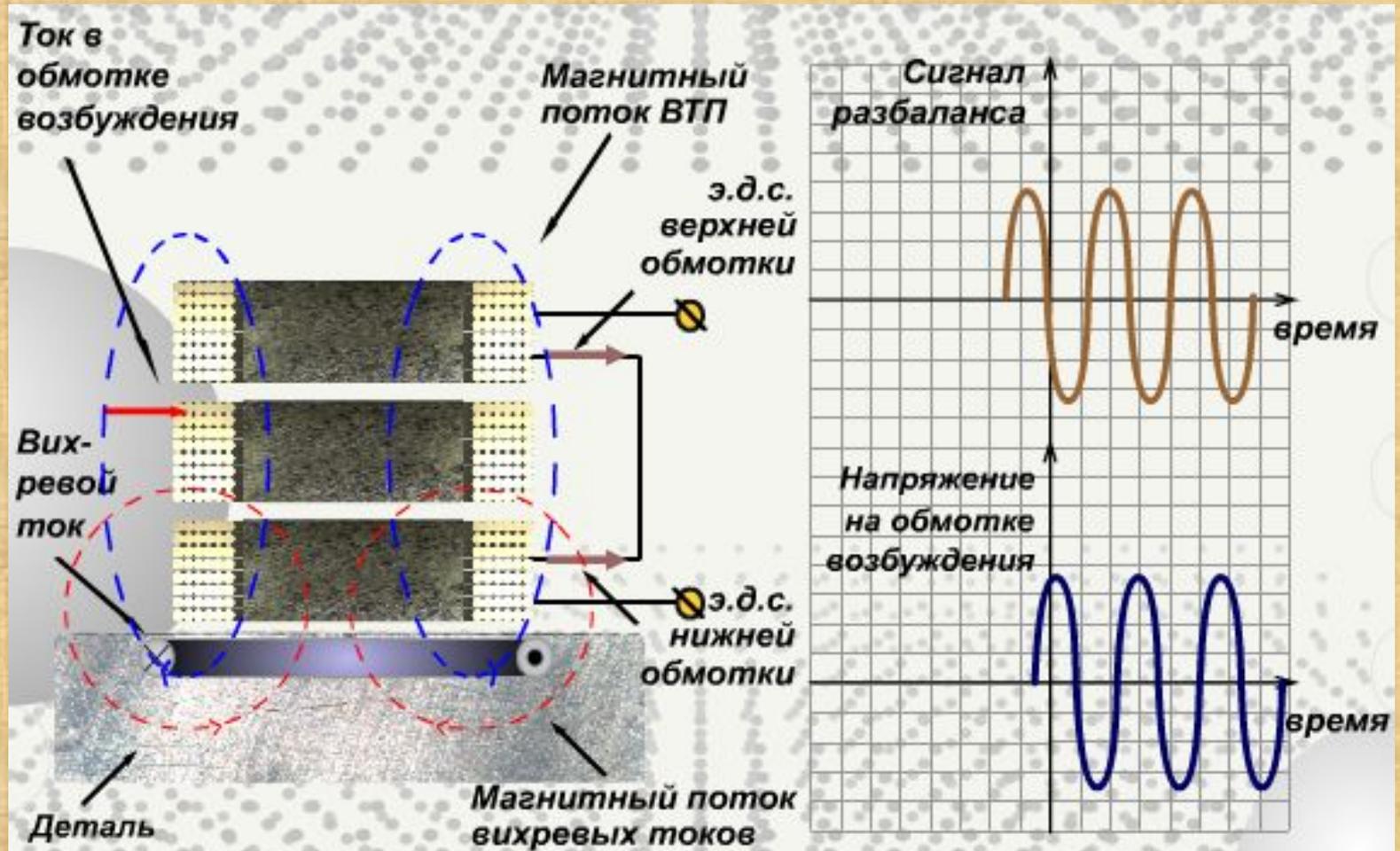
Результирующий магнитный поток и полное электрическое сопротивление катушки зависят от электромагнитных свойств металла контролируемой детали.

При наличии в металле дефекта в виде трещины траектории и значения вихревых токов изменяются и изменяется порождаемый ими магнитный поток, а следовательно и полное сопротивление катушки. Анализ изменения полного электрического сопротивления катушки позволяет выявить наличие дефекта.

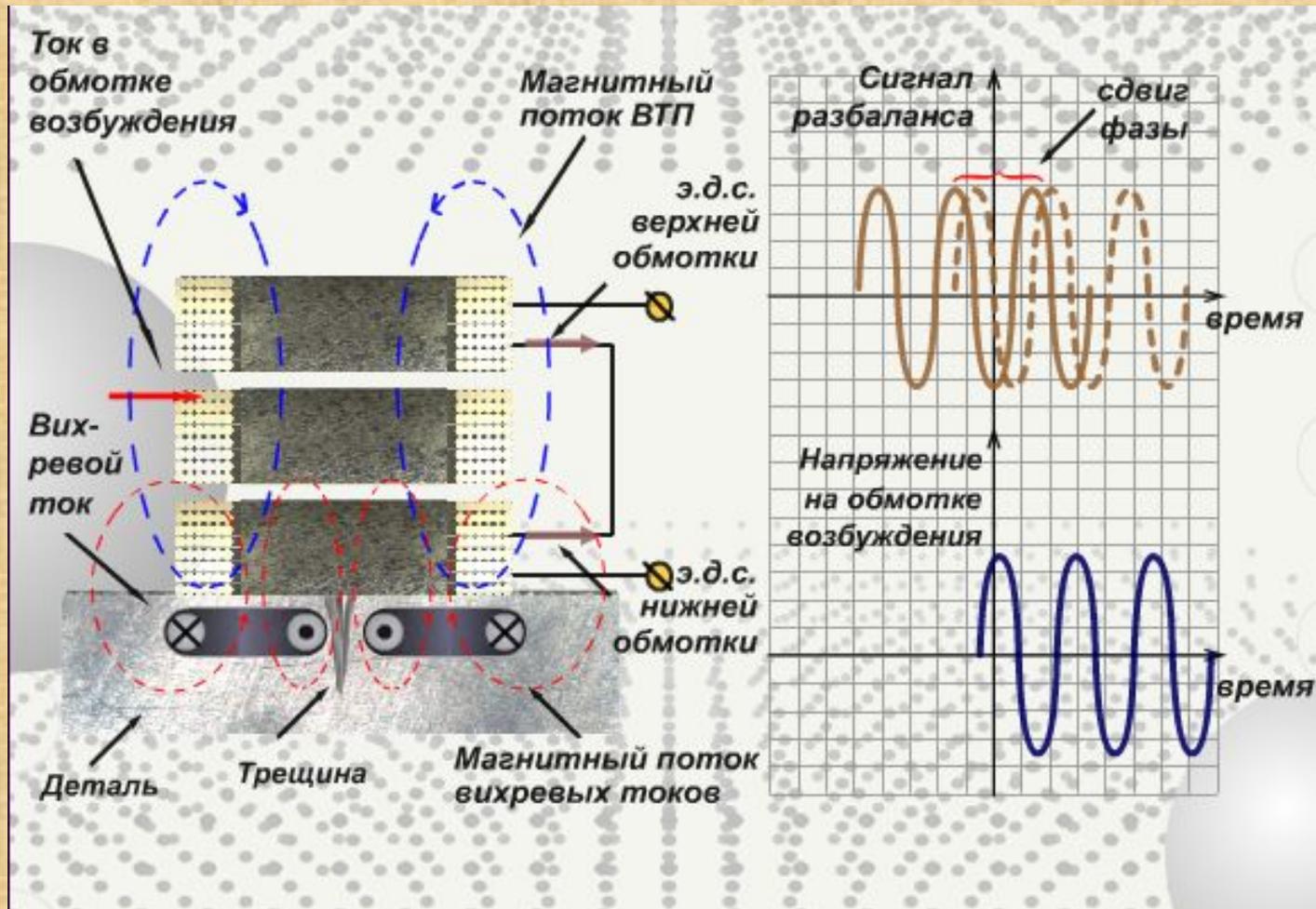
Трансформаторный ВТП



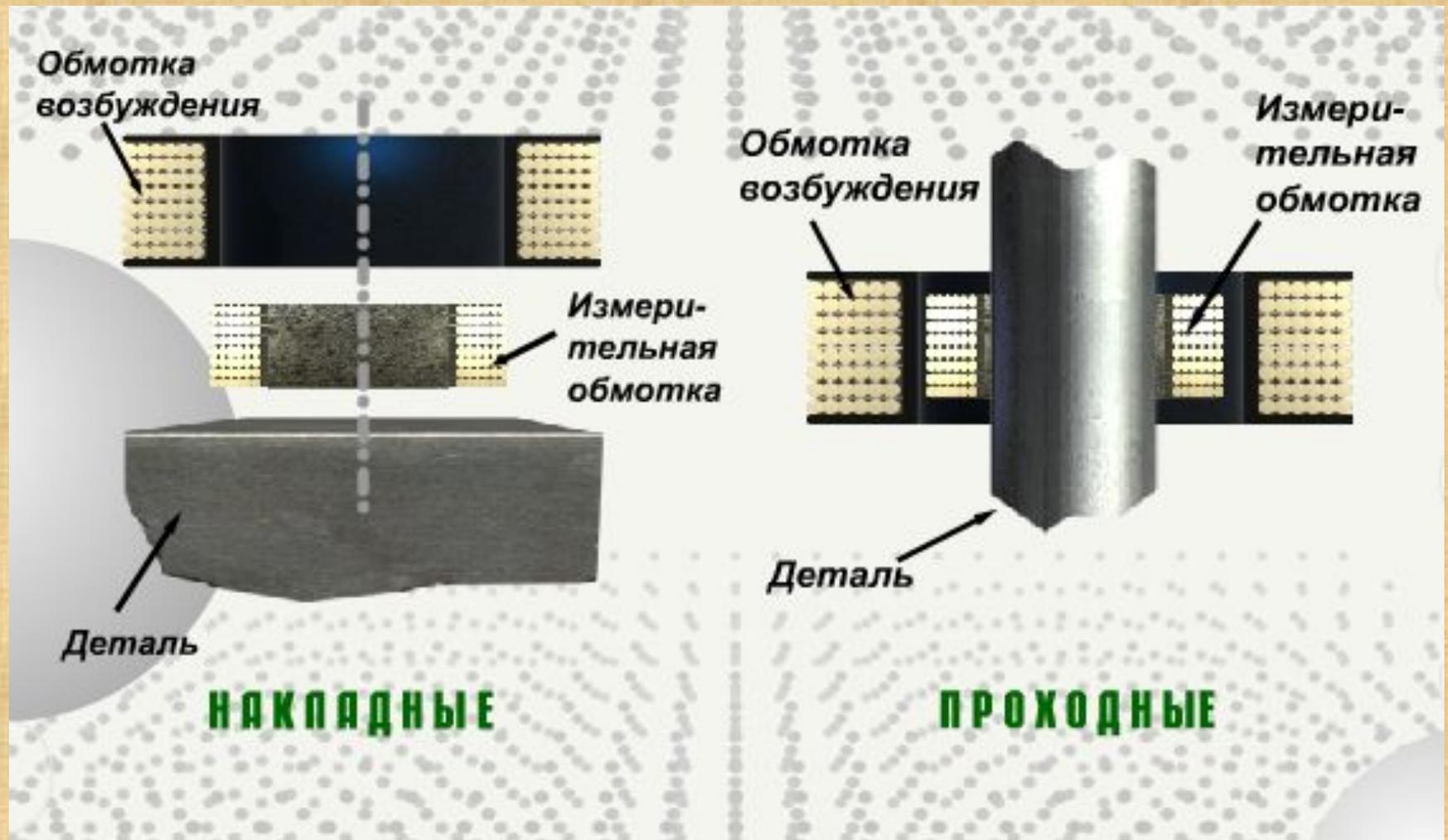
Взаимодействие трансформаторного вихретокового ВТП с объектом контроля без дефекта



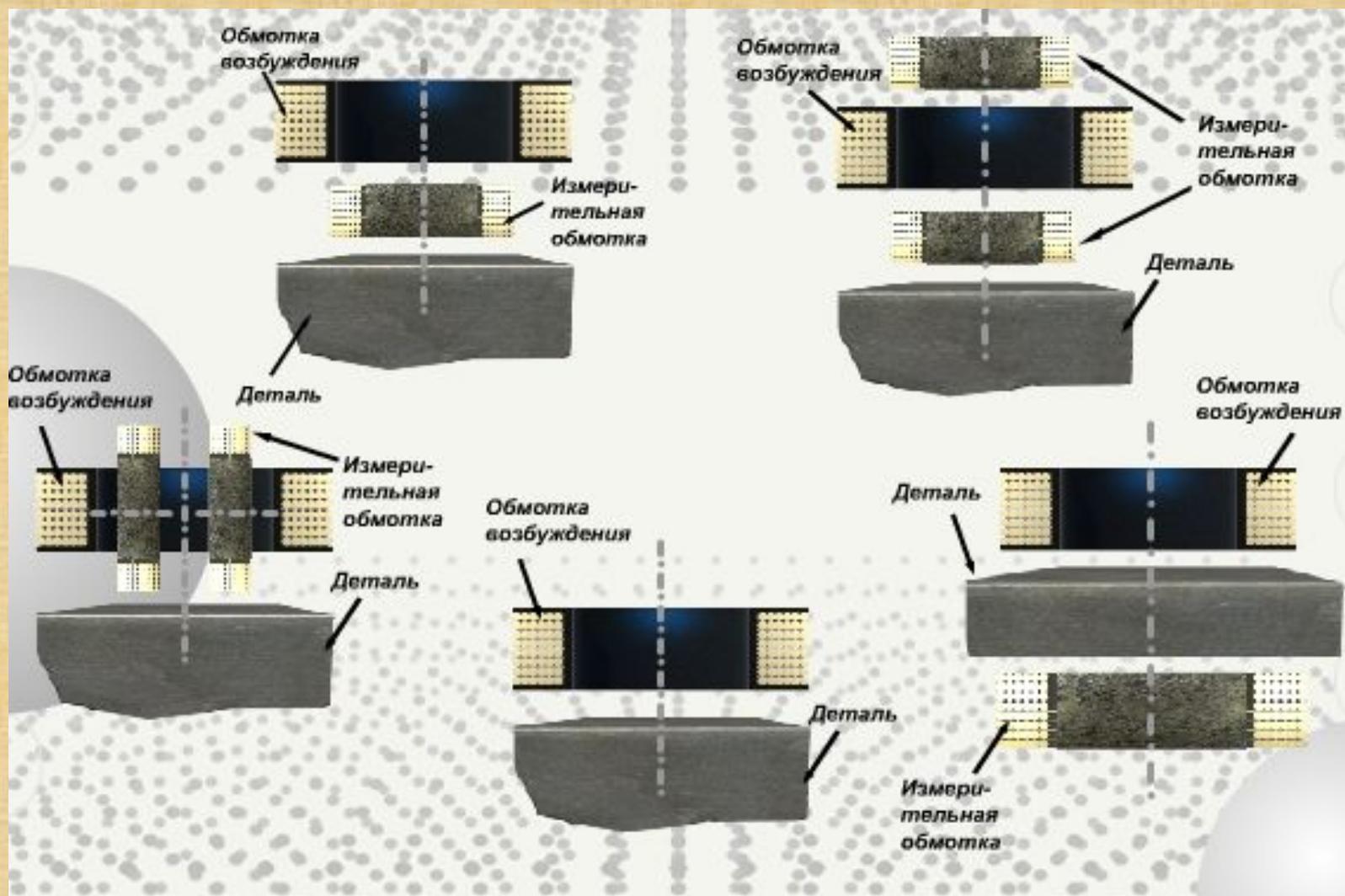
Взаимодействие трансформаторного вихретокового ВТП с объектом контроля без дефекта



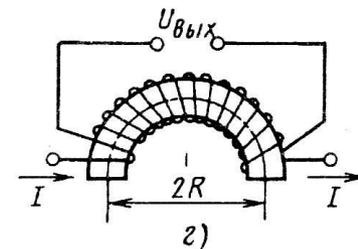
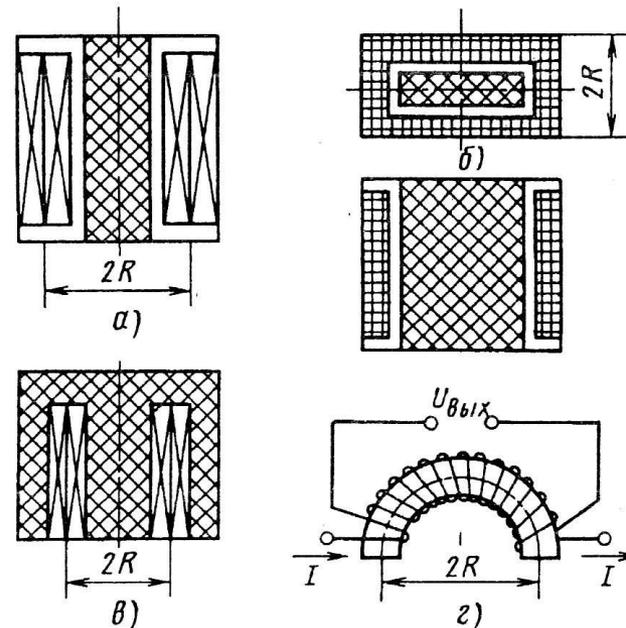
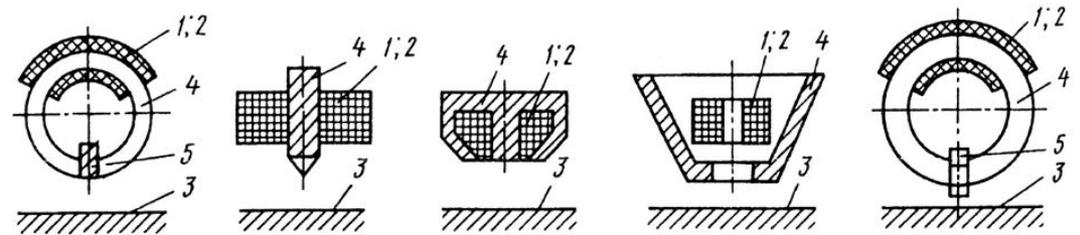
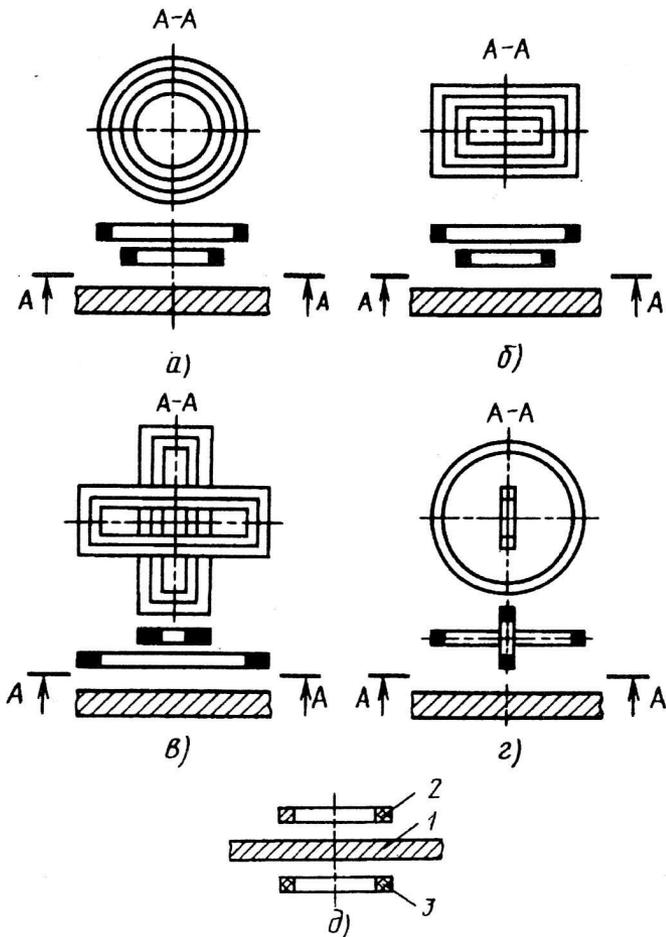
Проходные и накладные ВТП



Накладные ВТП

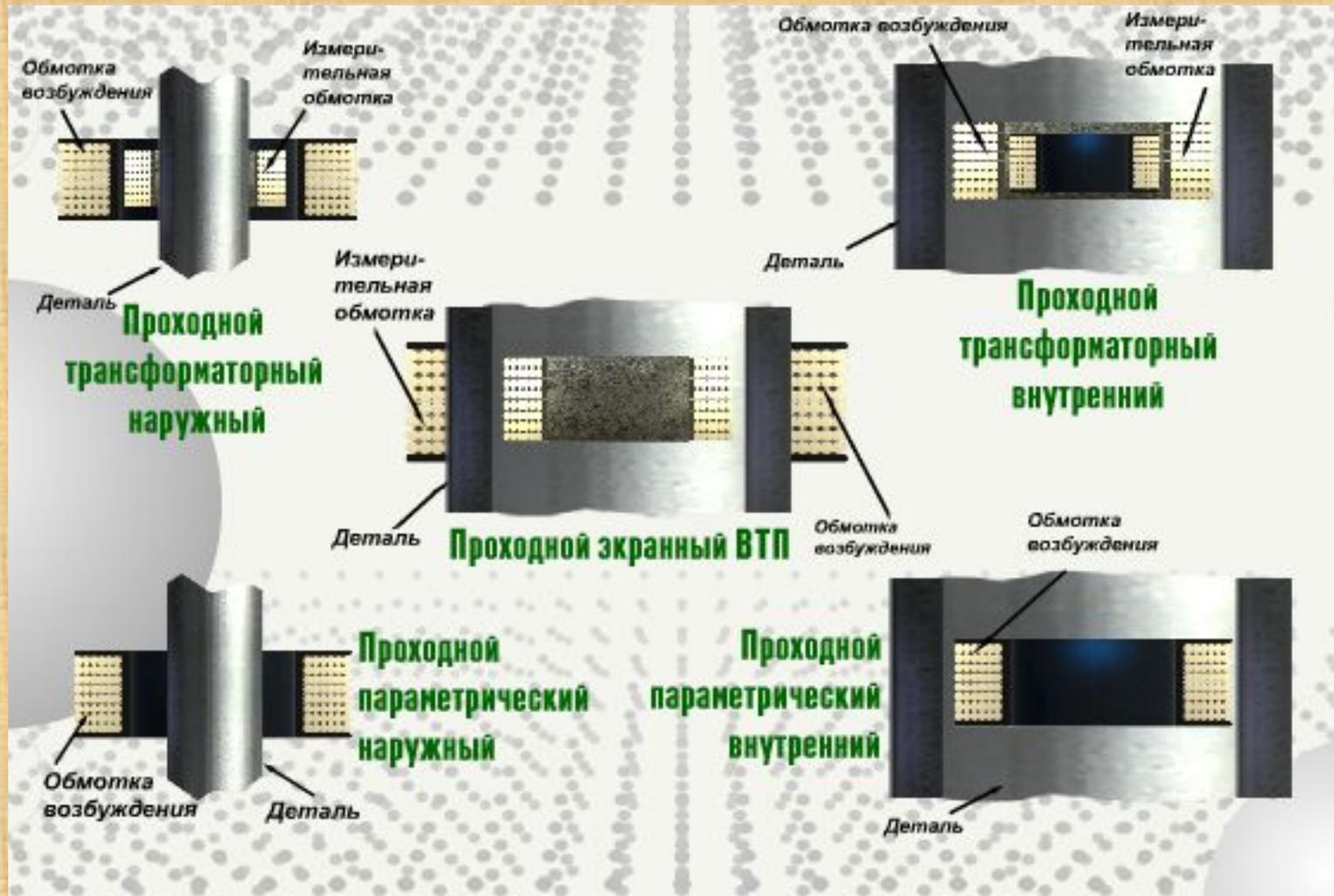


Накладные ВТП с различными видами катушек

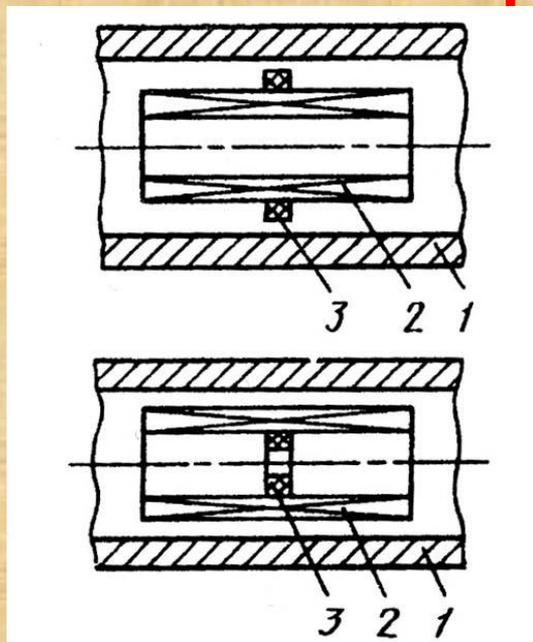


1, 2 – Возбуждающая и измерительная обмотки, 3 – ОК, 4 – магнитопровод, 5 - концентратор

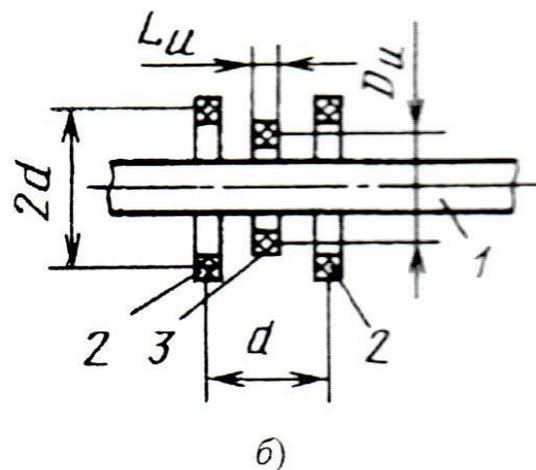
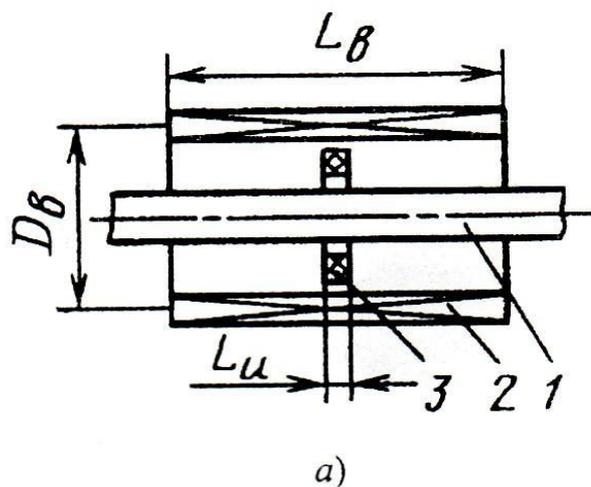
Проходные ВТП



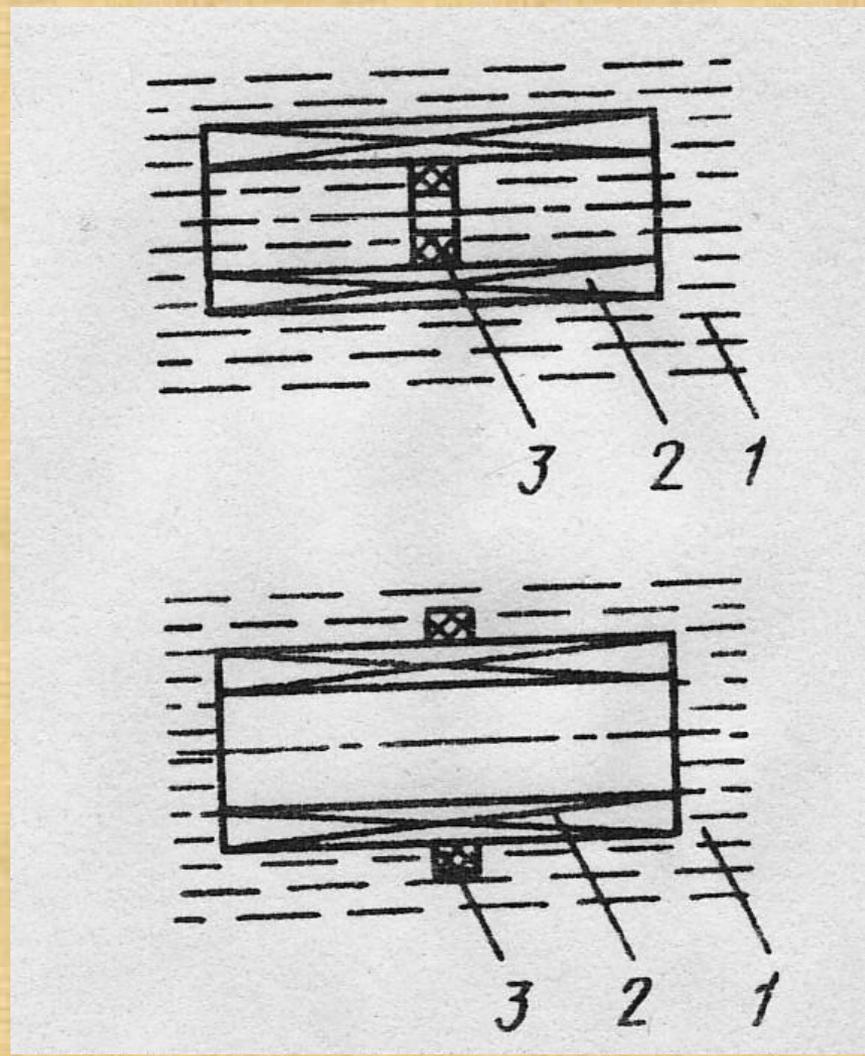
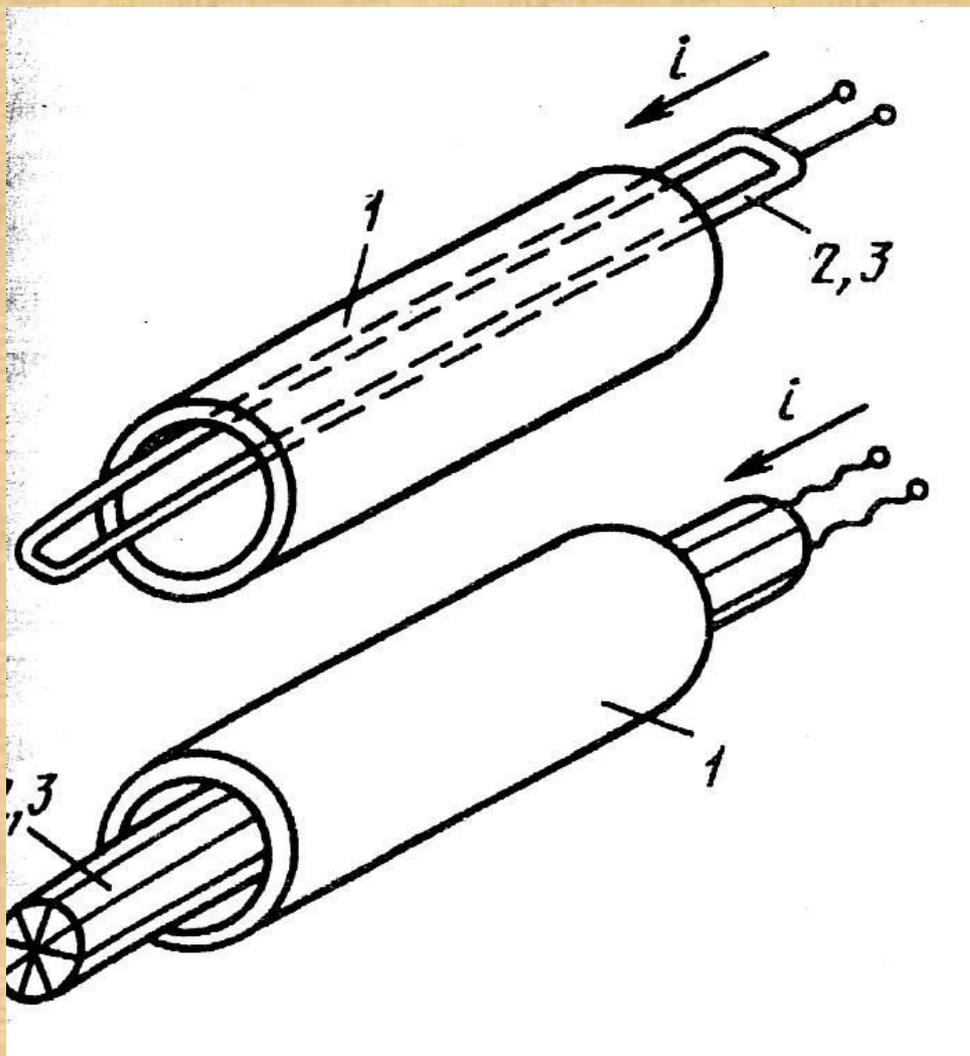
Наружные и внутренние проходные ВТП



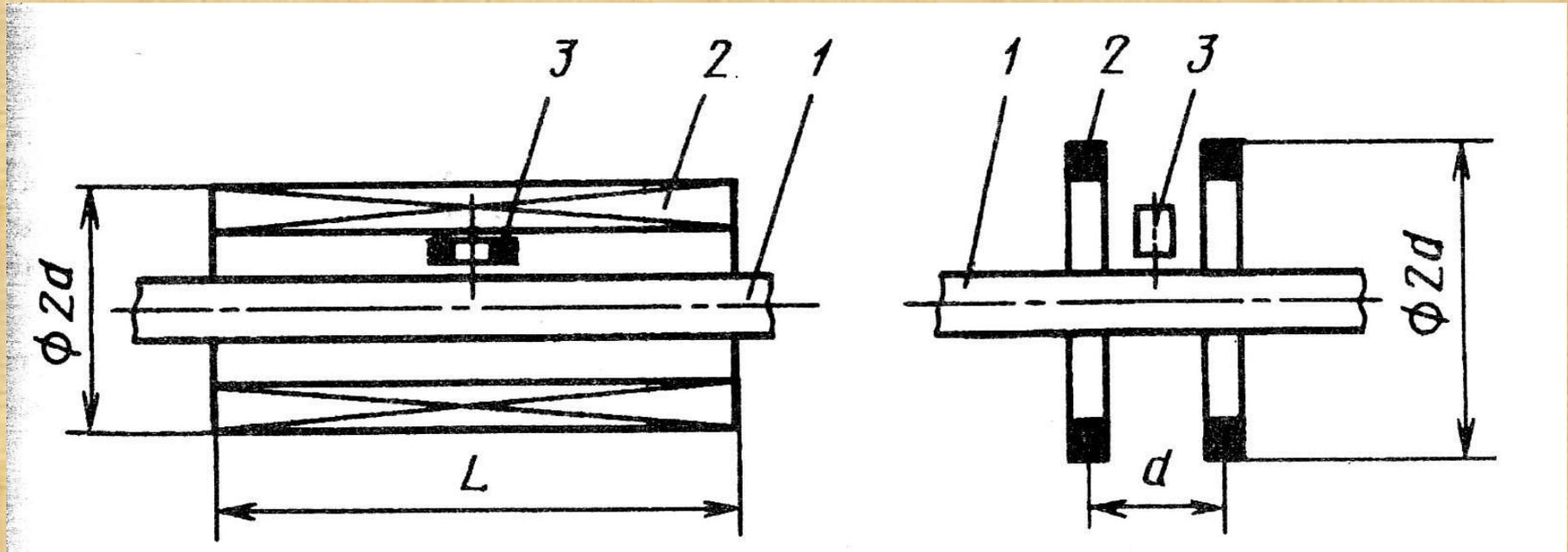
- 1 – Объект контроля
- 2 – Возбуждающая катушка.
- 3 – Измерительная катушка



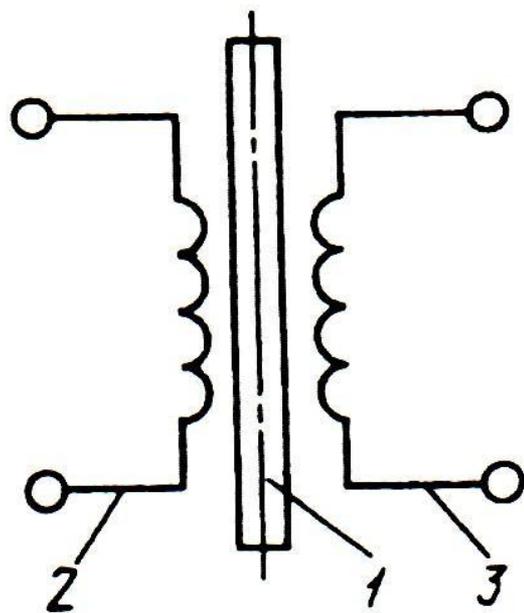
Линейные и погруженные вихретоковые преобразователи



Комбинированные ВТП с проходной возбуждающей и накладной измерительной катушкой

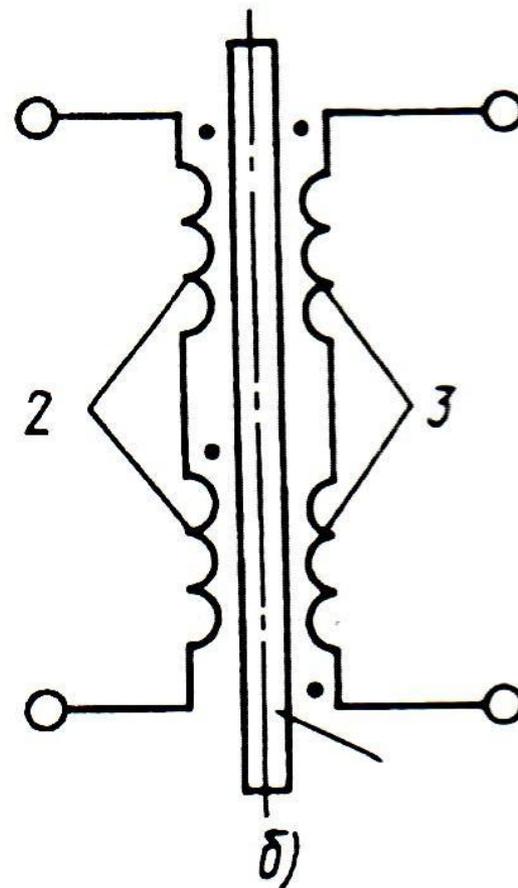


Абсолютной и дифференциальный ВТП



а)

а) Абсолютный



б)

б) Дифференциальный

Метод высших гармоник

- Метод высших гармоник основан на возбуждении синусоидального магнитного поля с большой амплитудой напряженности. Материал под преобразователем намагничивается до состояния близкого к насыщению, при этом проявляются нелинейные свойства материала, а в электрическом сигнале преобразователя появляются высшие гармоники, анализ которых позволяет судить о состоянии металла.