

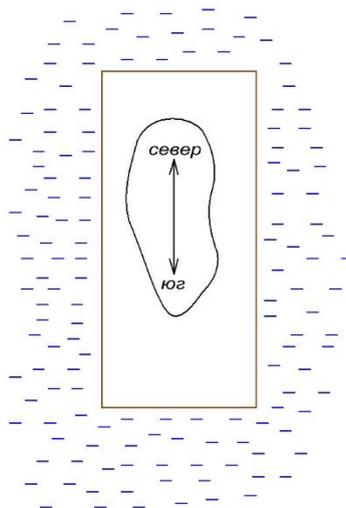
# Магнитные цепи

## Магнитное поле тока

Согласно одной из легенд, когда-то давным-давно жил в Греции пастух по имени Магнес. И вот шел он как-то со своим стадом овец, присел на камень и обнаружил, что конец его посоха, сделанный из железа, стал притягиваться к этому камню. С тех пор стали называть этот камень магнетит в честь Магнеса. Этот камень представляет из себя оксид железа.



Если такой камень положить на деревянную доску на воду или подвесить на нитке, то он всегда выстраивался в определенном положении. Один его конец всегда показывал на СЕВЕР, а другой — на ЮГ.



Этим свойством камня пользовались древние цивилизации. Поэтому, это был своего рода первый компас. Потом уже стали обтачивать такой камень и делать из него разные фигурки. Например, так выглядел китайский древний

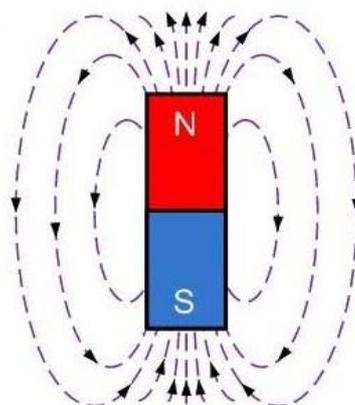
компас, ложка которого была сделана из того самого магнетита. Ручка у этой ложки всегда показывала на ЮГ.



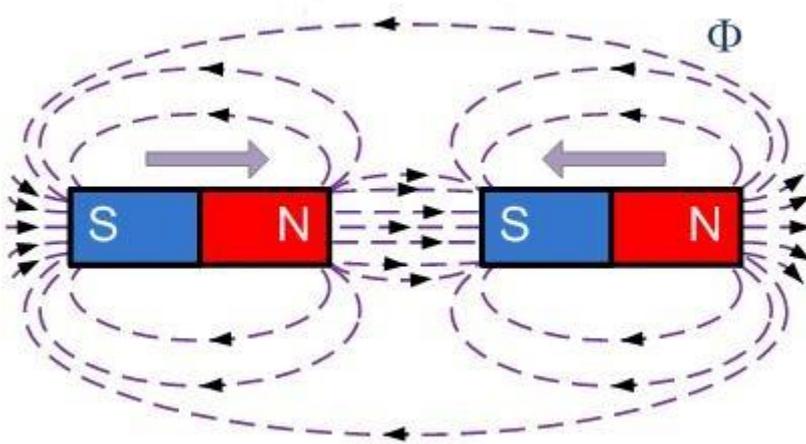
Ну а далее дело шло за практичностью и маленькими габаритами. Из магнетита вытачивали маленькие стрелки, которые подвешивали на тонкую иглу посередине. Так стали появляться первые малогабаритные компасы.



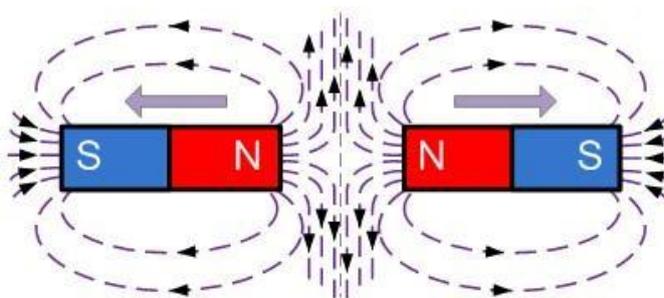
Вокруг магнита экспериментальным путем были обнаружены магнитные силовые линии. Эти магнитные линии создают так называемое магнитное поле.



Как вы могли заметить на рисунке, концентрация магнитных силовых линий на самых краях магнита намного больше, чем в его середине. Это говорит о том, что магнитное поле является более сильным именно на краях магнита, а в его середине практически равна нулю. Направлением магнитных силовых линий считается направление от севера к югу. Если приблизить два разноименных полюса, то произойдет притягивание магнитов



Если же приблизить одноименными полюсами, то произойдет их отталкивание

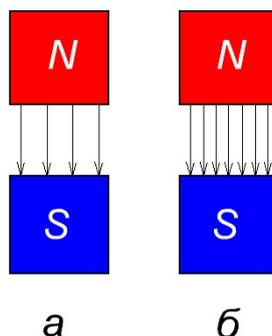


Итак, ниже перечислены важные свойства магнитных силовых линий:

- Магнитные линии не поддаются гравитации.
- Никогда не пересекаются между собой.
- Всегда образуют замкнутые петли.
- Имеют определенное направление с севера на юг.
- Чем больше концентрация силовых линий, тем сильнее магнитное поле.
- Слабая концентрация силовых линий указывает на слабое магнитное поле.

Магнитные силовые линии, которые образуют магнитное поле, называют также магнитным потоком.

Итак, давайте рассмотрим два рисунка и ответим себе на вопрос, где плотность магнитного потока будет больше? На рисунке «а» или на рисунке «б»?



Видим, что на рисунке «а» мало силовых магнитных линий, а на рисунке «б» их концентрация намного больше. Отсюда можно сделать вывод, что плотность магнитного потока на рисунке «б» больше, чем на рисунке «а».

В физике формула магнитного потока записывается как

$$\Phi = BSc \cos \alpha$$

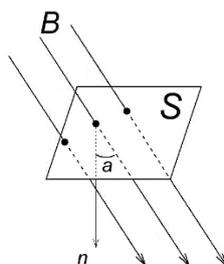
где

$\Phi$  — магнитный поток, Вебер

$B$  — плотность магнитного потока, Тесла

$\alpha$  — угол между перпендикуляром  $n$  (чаще его зовут нормалью) и плоскостью  $S$ , в градусах

$S$  — площадь, через которую проходит магнитный поток,  $m^2$



Что же такое 1 Вебер? Один вебер — это магнитный поток, который создается полем индукцией 1 Тесла через площадку  $1m^2$  расположенной перпендикулярно направлению магнитного поля.

Слышали ли вы когда-нибудь такое выражение: «напряженность между ними все росла и росла». То есть по сути напряженность — это что-то невидимое, какая-то сдерживающая сила, энергия. Здесь почти все то же самое. Напряженностью магнитного поля также часто называют силой магнитного поля. Напряженность магнитного поля напрямую зависит от плотности магнитного потока и выражается формулой

$$H = \frac{B}{\mu_0}$$

где

$H$  — напряженность магнитного поля, Ампер/метр

$B$  — плотность магнитного потока, Тесла

$\mu_0$  — магнитная постоянная =  $4\pi \times 10^{-7}$  Генри/метр или если написать по-простому  $1,2566 \times 10^{-6}$  Генри/метр.

Эта формула работает только тогда, когда между витками катушки находится воздух, либо вакуум. Более крутая формула выглядит вот так.

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0}$$

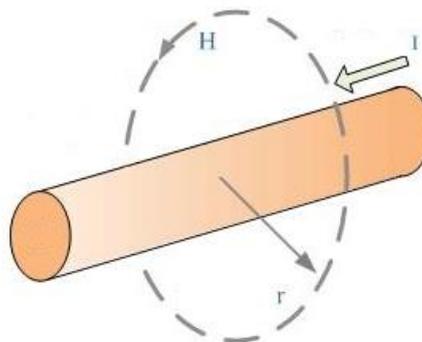
где

$\mu$  — это относительная магнитная проницаемость.

У разных веществ она разная

Диамагнетики	
Вода	0.999991
Медь	0.999990
Стекло	0.999987
Парамагнетики	
Воздух	1.00000038
Алюминий	1.000023
Кислород	1.0000019
Ферромагнетики	
Железо	8000
Никель	1100

Итак, имеем какой-либо проводник, по которому течет электрический ток.



Для того, чтобы вычислить напряженность магнитного поля на каком-то расстоянии от проводника при условии, что проводник находится в

воздушном пространстве либо в вакууме, достаточно воспользоваться формулой

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

где

$H$  — напряженность магнитного поля, Ампер/метр

$I$  — сила тока, текущая через проводник, Ампер

$r$  — расстояние до точки, в которой измеряется напряженность, метр

Оказывается, если через какой-либо проводник пропустить электрический ток, то вокруг проводника образуется магнитное поле.

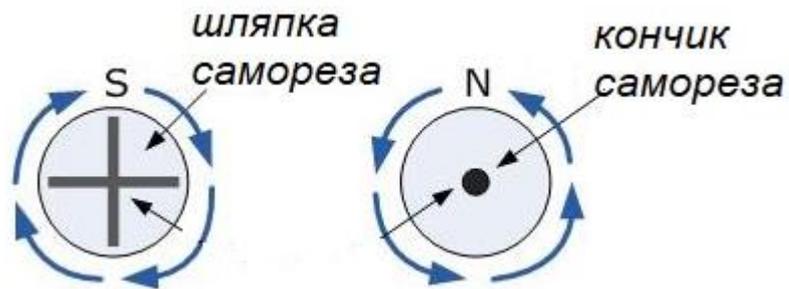


Здесь можно вспомнить знаменитое правило буравчика, но для наглядности лучше будем использовать правило самореза, так как почти все хоть раз в жизни ввинчивали либо болт, либо саморез.

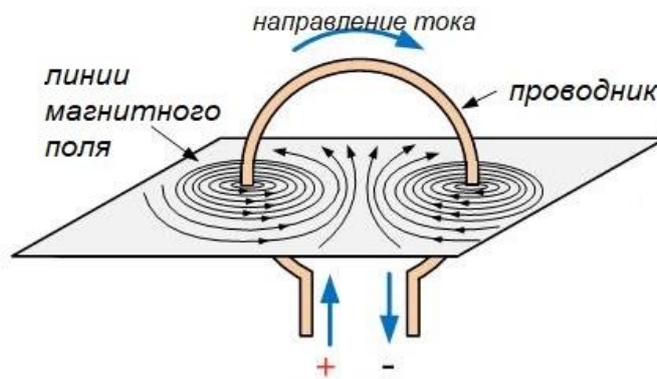


Ввинчиваем по часовой стрелке — саморез идет вниз. В нашем случае он показывает направление электрического тока. Движение наших рук показывает направление линий магнитного поля. Все то же самое, когда мы начинаем откручивать саморез. Он начинает вылезать вверх, то есть в нашем случае показывает направление электрического тока, а наша рука в этом время рисует в воздухе направление линий магнитного поля.

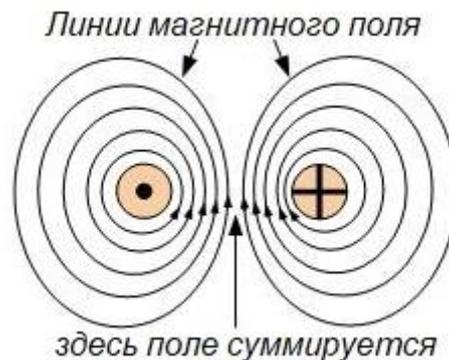
Также часто в учебниках физики можно увидеть, что направление электрического тока от нас рисуют кружочком с крестиком, а к нам — кружочком с точкой. В этом случае опять представляем себе саморез и уже в голове увидим направление магнитного поля.



Как думаете, что будет если мы сделаем вот такую петельку из провода?  
 Что изменится в этом случае?

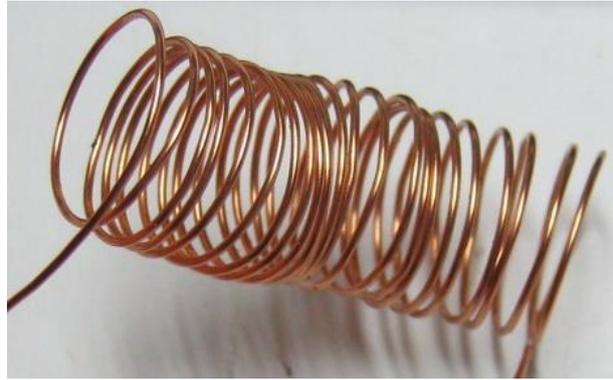


Давайте же рассмотрим этот случай более подробно. Так в этой плоскости оба проводника создают магнитное поле, то по идее они должны отталкиваться друг от друга. Но если они хорошо закреплены, то начинается самое интересное. Давайте рассмотрим вид сверху, как это выглядит.

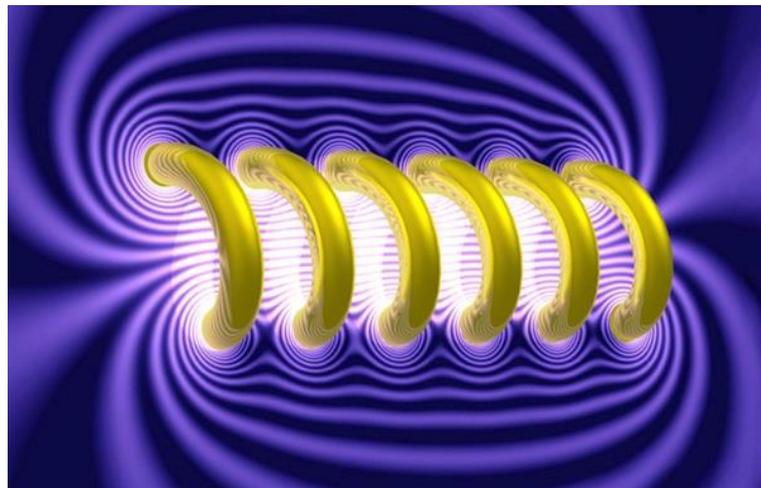


Как вы можете заметить, в области, где суммируются магнитные силовые линии плотность магнитного потока прям зашкаливает.

А что если сделать много-много таких петелек? Взять какую-нибудь круглую бобину, намотать на нее провод и потом убрать бобину. У нас должно получиться что-то типа этого.

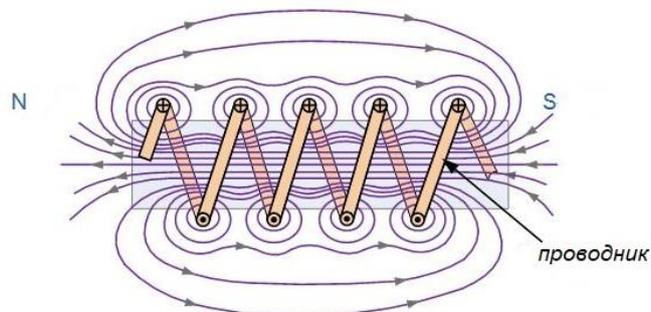


Если подать постоянное напряжение на такую катушку, магнитные силовые линии будут выглядеть вот так.



Вы только посмотрите, какая бешеная плотность магнитного потока внутри такой катушки! Получается, что от каждой петельки магнитное поле суммируется, что в итоге дает такую плотность магнитного потока. Такую катушку также называют катушкой индуктивности или соленоидом.

Вот также схема, показывающая как магнитные силовые линии складываются в соленоиде.



Плотность магнитного потока зависит от того, какая сила тока проходит через соленоид. Чтобы увеличить плотность магнитного потока, достаточно поверх витков намотать еще больше витков и вставить сердечник из специального материала — феррита.



Если в электрических цепях есть такое понятие, как ЭДС — электродвижущая сила, то и в магнитных цепях есть свой аналог — МДС — магнитодвижущая сила. Магнитодвижущая сила выражается в виде тока, протекающего через катушку из  $N$  витков и выражается в Амперах-витках.

$$\text{МДС} = I \times N$$

где

$I$  — это сила тока в катушке, Амперы

$N$  — количество витков катушки, штуки).

## Электромагниты

Электромагнит можно рассматривать как временный магнит, который функционирует с потоком электричества, и его полярность может быть легко изменена путем изменения направления тока. Также сила электромагнита может быть изменена путем изменения величины тока, протекающего через него. Сфера применения электромагнетизма необычайно широка. Например, магнитные выключатели являются предпочтительными в использовании тем, что они менее восприимчивы к изменениям температуры и способны поддерживать номинальный ток без ложного срабатывания.

Вот некоторые из примеров, где они используются: Моторы и генераторы. Благодаря электромагнитам стало возможным производство электродвигателей и генераторов, которые работают по принципу электромагнитной индукции. Это явление было открыто ученым Майклом Фарадеем. Он доказал, что электрический ток создает магнитное поле. Генератор использует внешнюю силу ветра, движущейся воды или пара, вращает вал, который заставляет двигаться набор магнитов вокруг спирального провода, чтобы создать электрический ток. Таким образом, электромагниты преобразуют в электрическую другие виды энергии.

Практика промышленного использования. Только материалы, сделанные из железа, никеля, кобальта или их сплавов, а также некоторые природные минералы реагируют на магнитное поле. Где используют электромагниты? Одной из сфер практического применения является

сортировка металлов. Поскольку упомянутые элементы используются в производстве, с помощью электромагнита эффективно сортируют железосодержащие сплавы. Где применяют электромагниты? С их помощью можно также поднимать и перемещать массивные объекты, например, автомобили перед утилизацией. Они также используются в транспортировке. Поезда в Азии и Европе используют электромагниты для перевозки автомобилей. Это помогает им двигаться на феноменальных скоростях.

Электромагниты часто используются для хранения информации, так как многие материалы способны поглощать магнитное поле, которое может быть впоследствии считано для извлечения информации. Они находят применение практически в любом современном приборе. Где применяют электромагниты? В быту они используются в ряде бытовых приборов. Одной из полезных характеристик электромагнита является возможность изменения магнитной силы, при изменении силы и направление тока, текущего через катушки или обмотки вокруг него. Колонки, громкоговорители и магнитофоны - это устройства, в которых реализуется этот эффект. Некоторые электромагниты могут быть очень сильными, причем их сила может регулироваться. Где применяют электромагниты в жизни? Простейшими примерами служат дверные звонки и электромагнитные замки. Используется электромагнитная блокировка для двери, создавая сильное поле. Пока ток проходит через электромагнит, дверь остается закрытой. Телевизоры, компьютеры, автомобили, лифты и копировальные аппараты - вот где применяют электромагниты, и это далеко не полный список

Электромагниты часто используются для хранения информации, так как многие материалы способны поглощать магнитное поле, которое может быть впоследствии считано для извлечения информации. Они находят применение практически в любом современном приборе. Где применяют электромагниты? В быту они используются в ряде бытовых приборов. Одной из полезных характеристик электромагнита является возможность изменения магнитной силы, при изменении силы и направление тока, текущего через катушки или обмотки вокруг него. Колонки, громкоговорители и магнитофоны - это устройства, в которых реализуется этот эффект. Некоторые электромагниты могут быть очень сильными, причем их сила может регулироваться. Где применяют электромагниты в жизни? Простейшими примерами служат дверные звонки и электромагнитные замки. Используется электромагнитная блокировка для двери, создавая сильное поле. Пока ток проходит через электромагнит, дверь остается закрытой. Телевизоры, компьютеры, автомобили, лифты и копировальные аппараты - вот где применяют электромагниты, и это далеко не полный список.

Электромагнит создает магнитное поле с помощью обмотки, по которой протекает электрический ток. Основные составные части:

- катушка с расположенной на ней намагничивающей обмоткой (может быть несколько катушек и обмоток);
- сердечник выполняемый из ферромагнитного материала;
- подвижная часть магнитопровода (якорь).

На рисунке ниже показано как выглядят электромагниты.



Для изготовления таких магнитов используются различные металлы, чаще всего сталь и медь.

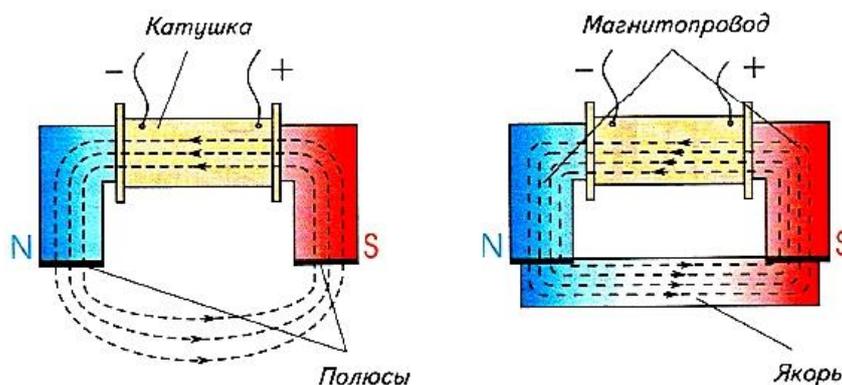
Электромагнит на практике представляет собой катушку изолированной медной проволоки, по которой протекает электрический ток, сообщая катушке свойства магнита. Для ещё большего усиления магнитных свойств в катушку вставляется стальной сердечник.



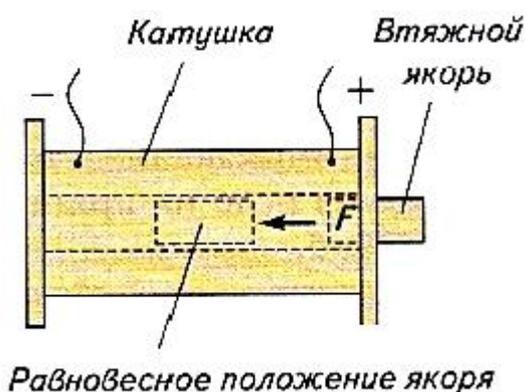
Многочисленные опыты показали, что для усиления магнитного поля электромагнита нужно либо увеличить число витков при одном и том же сердечнике, либо усилить ток в катушке, либо увеличить размер сердечника.

Электромагнит, как и постоянный магнит, имеет два магнитных полюса. Но в отличие от постоянного магнита электромагнитом можно управлять. Электромагнит притягивает к себе материалы только тогда, когда ток проходит по его обмотке. Если же ток выключен, электромагнит теряет магнитные свойства.

В электромагнитах, применяемых в различных приборах, обмотка изготавливается из изолированной медной проволоки. В зависимости от назначения она имеет различное сечение и число витков. Обмотка наматывается на каркас, который может быть изготовлен из картона, текстолита, пластмассы и других изоляционных материалов. Он удерживает обмотку и изолирует её от сердечника.



Сердечники, или магнитопроводы, электромагнита могут быть разной конструкции. Широко применяются электромагниты с протяжным и втяжным сердечником — якорем.

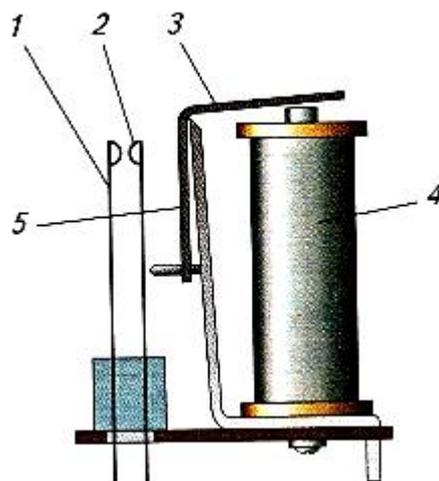


Если к полюсам электромагнита притягивается специальная железная пластинка (якорь), — это притяжная конструкция. Она используется в технике для выполнения какого-либо действия, например для замыкания или размыкания электрических контактов. После выключения электрического тока в катушке сердечник и якорь практически полностью размагничиваются, т. е. притяжение якоря к полюсам электромагнита прекращается.

Электромагниты с втяжным якорем, или тяговые электромагниты, используются в электротехнике в качестве привода. С помощью такого электромагнита можно привести в движение, например, стрелку электроизмерительного устройства. Втяжной якорь находится в состоянии устойчивого равновесия, если его концы одинаково удалены от середины катушки. Если же сердечник выведен из этого положения, то сила  $F$ , действующая на него со стороны магнитного поля катушки, стремится направить его обратно.

Рассмотрим применение электромагнитов на примере электромагнитного реле и электрического звонка.

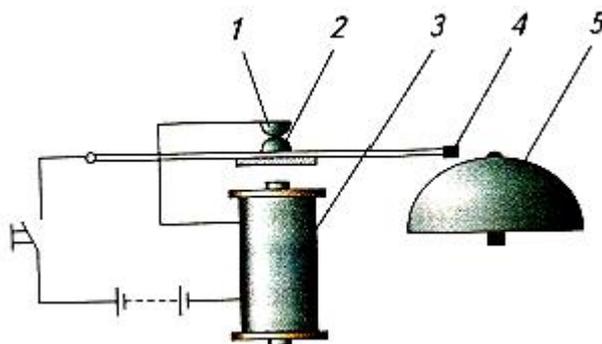
Электромагнитное реле — это прибор, с помощью которого управляют какими-либо другими электроприборами на расстоянии.



1,2 — контактные пластины, 3 — верхнее плечо якоря, 4 — обмотка,  
5 — нижнее плечо якоря

Под действием магнитного поля, создаваемого обмоткой катушки 4, верхнее плечо якоря 3 притягивается к сердечнику. Нижнее плечо якоря 5 отклоняет контактную пластину 2, пока она не соприкоснется с контактной пластиной 1. Соприкоснувшиеся контакты замыкают электрическую цепь, в которую включён какой-либо потребитель. При отключении тока якорь с контактной пластиной 2 отходит от сердечника, и электрические контакты 1, 2 расходятся, размыкая цепь.

Электрический звонок применяют для звуковой сигнализации, в устройствах автоматического контроля, защиты в быту и на производстве.



1,2 — контакты, 3 — обмотка электромагнита, 4 — якорь с  
молоточком, 5 — чашечка звонка

Основной частью электрического звонка является электромагнит. При нажатии на кнопку (в устройствах защиты и контроля это контакты реле или выключателей) электрическая цепь замыкается. Ток, проходя по обмотке электромагнита 3, намагничивает сердечник, который притягивает к себе якорь с молоточком 4 и контактом 2, при этом молоточек ударяет по чашечке звонка 5, контакты 2 и 1 размыкаются, и электрическая цепь разрывается. В результате сердечник размагничивается и отпускает якорь, контакт 2

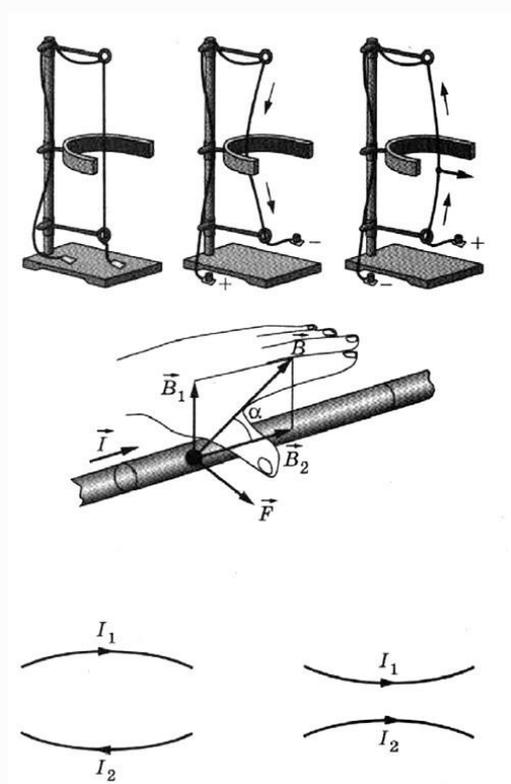
вследствие упругости снова соединяется с контактом 1, и всё повторяется сначала.

### Действие магнитного поля на проводник с током

Если металлический проводник с током поместить в магнитное поле, то на этот проводник со стороны магнитного поля будет действовать сила, которая называется силой Ампера.

Сила Ампера зависит от длины проводника с током, силы тока в проводнике, модуля магнитной индукции и расположения проводника относительно линий магнитной индукции:  $F_A = BIl \sin \alpha$ .

Для определения направления силы Ампера применяют *правило левой руки*. Если левую руку расположить в магнитном поле так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а четыре пальца были направлены по току, то отогнутый большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.



Магнитное взаимодействие можно наблюдать между двумя параллельными токами (опыт Ампера): два параллельных проводника с током отталкиваются, если направления токов в них противоположны, и притягиваются, если направления токов совпадают.

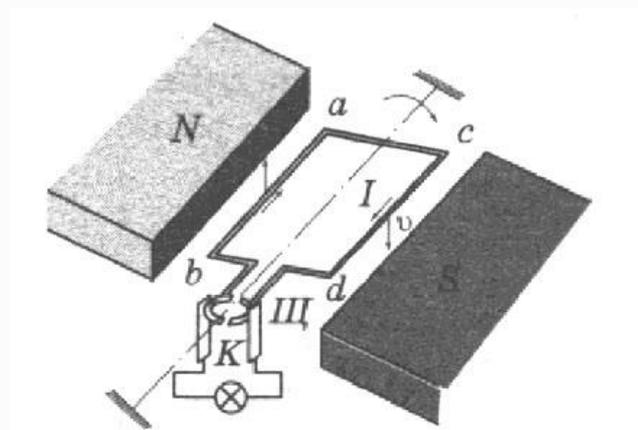
Экспериментальное исследование показывает, что сила Ампера прямо пропорциональна длине проводника  $l$  и силе тока  $I$  в проводнике. Коэффициентом пропорциональности в этом равенстве является модуль вектора магнитной индукции  $B$ . Соответственно,  $F = BIl$ . В таком виде зависимость силы, действующей на проводник с током в магнитном поле,

записывается в том случае, если линии магнитной индукции перпендикулярны проводнику с током. Из приведённой формулы понятно, что магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля.

Единица магнитной индукции  $[B] = 1\text{Н} / 1\text{А} \cdot 1\text{м} = 1\text{Тл}$ . За единицу магнитной индукции принимают магнитную индукцию такого поля, в котором на проводник длиной 1 м действует сила 1Н при силе тока в проводнике 1 А.

Магнитное поле действует также на движущиеся заряженные частицы. При этом сила (сила Лоренца) зависит от модуля магнитной индукции, заряда частицы, а также от модуля и направления её скорости.

Движение проводника с током в магнитном поле лежит в основе работы электрического двигателя. Если поместить прямоугольную рамку в магнитное поле и пропустить по ней электрический ток, то рамка повернётся, потому, что на стороны рамки действует сила Ампера. При этом сила, действующая на сторону рамки **ab**, противоположна силе, действующей на сторону **cd**.



Для того чтобы рамка не остановилась в тот момент, когда её плоскость перпендикулярна линиям магнитной индукции, и продолжала вращаться, изменяют направление тока в проводнике. Для этого к концам рамки припаяны полукольца, по которым скользят контакты, соединённые с источником тока. При повороте рамки на  $180^\circ$  меняются контактные пластины, которых касаются полукольца и, соответственно, направление тока в рамке.

В электрическом двигателе энергия электрического и магнитного полей превращается в механическую энергию.

### **Явление электромагнитной индукции, самоиндукции и взаимной индукции**

Результатом взаимного влияния друг на друга электрического и магнитного полей является закон электромагнитной индукции, открытый великим физиком М. Фарадеем. На этом законе основан принцип взаимной индукции, который широко используется на практике, например, в

трансформаторах переменного тока. Частный случай явления электромагнитной индукции — самоиндукция. Дадим определение понятию самоиндукции.

Самоиндукция — явление возникновения электродвижущей силы в проводнике в результате изменения тока, протекающего по проводник

Возникающую при этом явлении ЭДС называют ЭДС самоиндукции, а ток — индукционным.

### Примечание 1

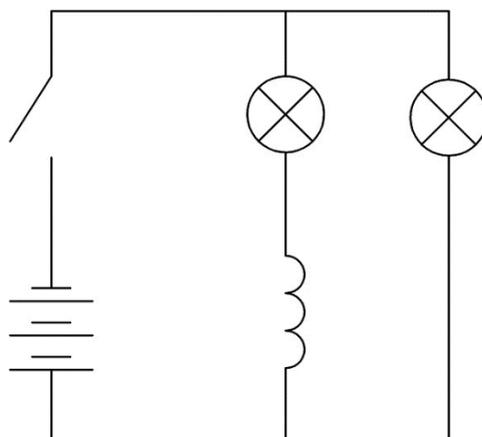
Взаимоиндукция (взаимная индукция) — возникновение тока в одной из двух индукционно связанных обмоток при изменении тока в другой

### Примечание 2

Так же как и закон электромагнитной индукции, явление самоиндукции наблюдается в замкнутом контуре и не наблюдается в прямом проводнике

Индукционный ток в цепи направлен так, чтобы уменьшить действие вызвавшего его внешнего поля.

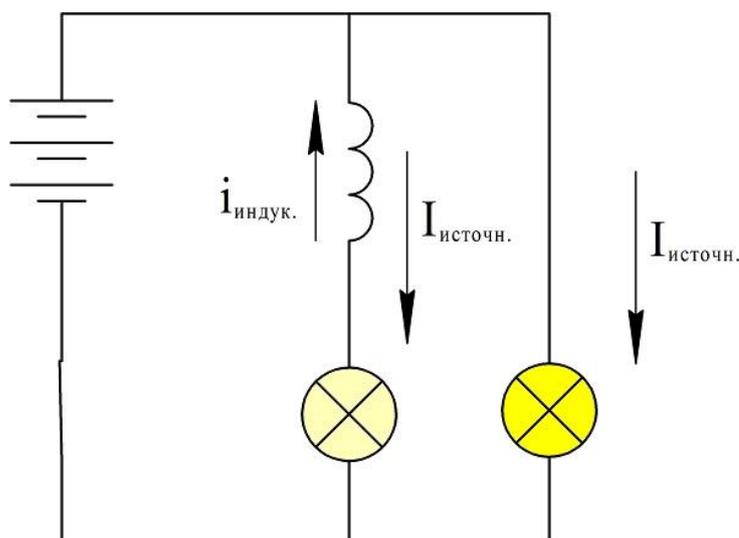
Кратко опишем процесс появления самоиндукции в проводнике. Возьмем простой замкнутый контур, состоящий из катушки, двух ламп накаливания и источника тока.



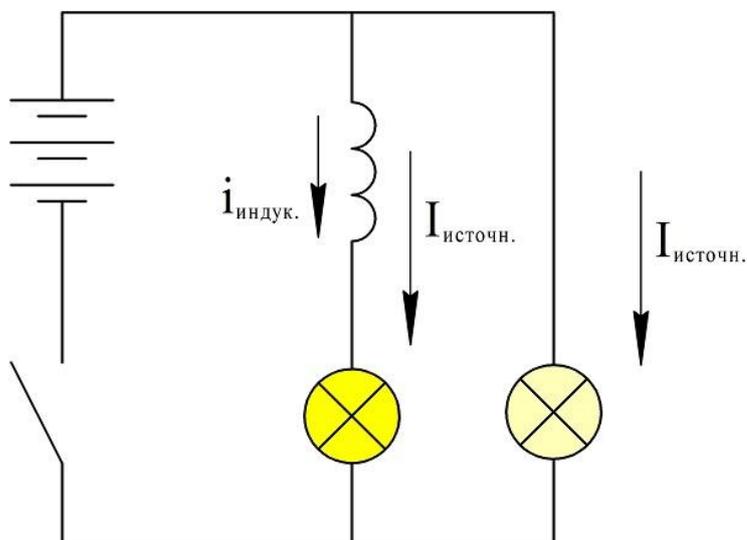
Если подключить схему к источнику, можно наблюдать, как при замыкании цепи лампа за катушкой будет загораться позже другой лампы. При размыкании цепи лампа за катушкой также потухнет позже.

После замыкания ключа по цепи начинает проходить ток, при этом сила тока будет постепенно нарастать в течение некоторого времени. В результате через витки катушки начинает проходить равномерный магнитный поток, также нарастающий со временем.

По закону электромагнитной индукции под действием меняющегося во времени магнитного поля образуется вихревое поле и, следовательно, индукционный ток. По правилу Ленца направление индукционного тока будет противоположным направлению тока источника, именно по этой причине лампа загорается не сразу после замыкания ключа.



Теперь отключим источник тока. Сила тока в цепи начнет убывать, как и магнитный поток, проходящий через обмотку катушки. Индукционный ток при этом будет сонаправлен с током источника. Лампа, находящаяся за катушкой, потухнет спустя некоторое время после размыкания ключа.

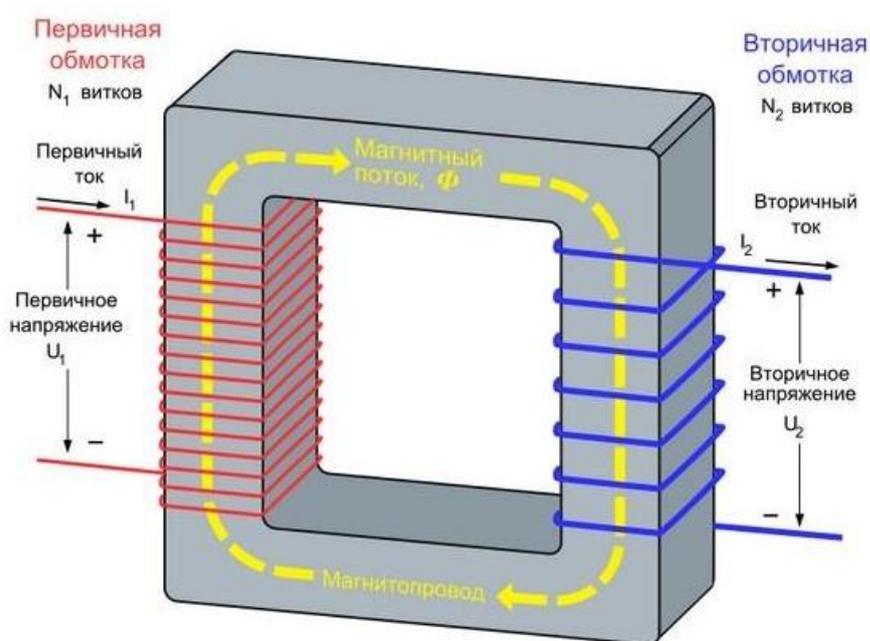


При резком размыкании цепи можно столкнуться с таким явлением, как скачок тока. Значение величины ЭДС самоиндукции в этот момент может значительно превышать ЭДС источника энергии.

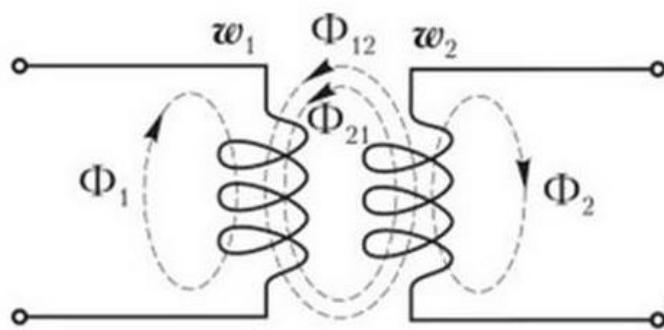
Резкое возрастание тока в цепи при ее размыкании находит применение в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания и сетевых фильтрах (с помощью явления самоиндукции сглаживаются скачки напряжения и заполняются «провалы»).

Не стоит путать ЭДС индукции и ЭДС самоиндукции. Основное отличие этих двух явлений состоит в том, что ЭДС индукции возникает при изменении магнитного потока, пронизывающего проводящий контур. Первичная причина появления ЭДС самоиндукции заключается в изменении тока, проходящего по контуру.

Что такое взаимная индукция? Когда в одном из двух проводников меняются показатели тока или же меняется взаимное расположение этих проводников, то наблюдается изменение магнитного потока, возникающего под воздействием тока первого проводника и проходящего по второму проводнику. В результате во втором проводнике возникает электродвижущая сила (ЭДС). Под ее действием в этом проводнике образуется индуцированный ток, но при условии, что проводник замкнут. И, наоборот, изменение тока во втором контуре способствует возникновению ЭДС в первом. Это явление получило название взаимная индукция или взаимоиндукция. Именно на нем основана работа трансформаторов.



Явление взаимной индукции — это частный случай электромагнитной индукции, открытой Фарадеем. Измеряется она в тех же единицах, что и индуктивность — Генри (Гн).



При прохождении тока по контуру  $\omega_1$  возникает магнитный поток, который пронизывает витки контура  $\omega_2$ . Когда параметры тока на контуре  $\omega_1$  меняются, на  $\omega_2$  возникает ЭДС индукции. И наоборот, когда меняется ток на контуре  $\omega_2$ , возникает ЭДС в  $\omega_1$ . Это явление получило название взаимной индукции, а контуры называются связанными.

Типичным примером двух катушек, связанных магнитным полем, является трансформатор. Он широко применяется в электротехнике с целью изменения силы переменного тока и напряжения. Изобретен трансформатор Яблочковым в 1876 году. Его основная характеристика — коэффициент трансформации. Он показывает во сколько раз ЭДС во вторичном контуре меньше (или больше) ЭДС в первом. Сила тока в обмотках находится в обратно пропорциональной зависимости от количества витков этих обмоток и ЭДС. Следовательно, применение трансформатора с соответствующим коэффициентом трансформации позволяет повышать или понижать значение электродвижущей силы и, соответственно, повышать или понижать силу тока.

Трансформаторы повышающего действия применяются в линиях передачи электроэнергии на большие расстояния, а с понижающим — в устройствах для электросварки и прочих, где требуется высокое значение тока при низком напряжении.

### Вихревые токи

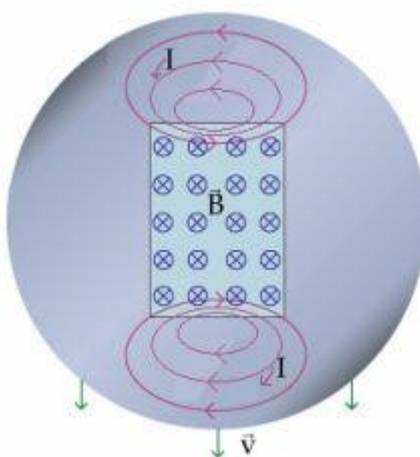
В электрических аппаратах, приборах и машинах металлические детали иногда движутся в магнитном поле или неподвижные металлические детали пересекаются силовыми линиями меняющегося по величине магнитного поля. В этих металлических деталях индуцируется ЭДС самоиндукции.

Под действием этих э. д. с. в массе металлической детали протекают вихревые токи (токи Фуко), которые замыкаются в массе, образуя вихревые контуры токов.

Вихревыми токами (также токами Фуко) называются электрические токи, возникающие вследствие электромагнитной индукции в проводящей среде (обычно в металле) при изменении пронизывающего ее магнитного потока.

Вихревые токи порождают свои собственные магнитные потоки, которые, по правилу Ленца, противодействуют магнитному потоку катушки и ослабляют его. Кроме того, они вызывают нагрев сердечника, что является бесполезной тратой энергии.

Пусть имеется сердечник из металлического материала. Поместим на этот сердечник катушку, по которой пропустим переменный ток. Вокруг катушки окажется переменный магнитный ток, пересекающий сердечник. При этом в сердечнике станет наводиться индуцированная ЭДС, которая, в свою очередь, вызывает в сердечнике токи, называемые вихревыми. Эти вихревые токи нагревают сердечник. Так как электрическое сопротивление сердечника невелико, то наводимые в сердечниках индуцированные токи могут оказываться достаточно большими, а нагрев сердечника - значительным.

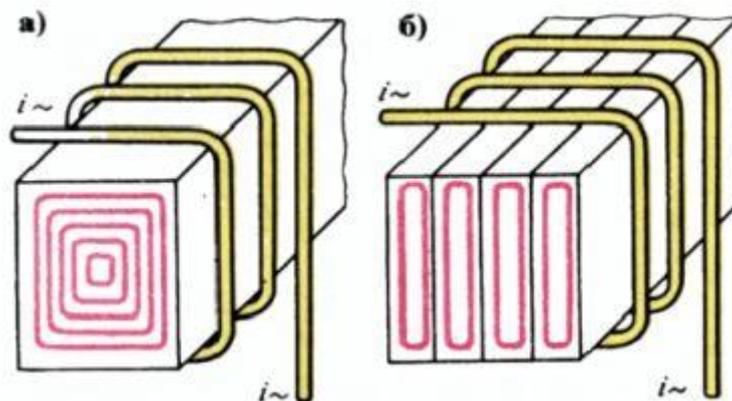


Возникновение токов Фуко (вихревых токов)

Впервые вихревые токи были обнаружены французским учёным Д.Ф. Араго (1786 - 1853) в 1824 г. в медном диске, расположенном на оси под вращающейся магнитной стрелкой. За счёт вихревых токов диск приходил во вращение. Это явление, названное явлением Араго, было объяснено несколько лет спустя М. Фарадеем с позиций открытого им закона электромагнитной индукции.

Вихревые токи были подробно исследованы французским физиком Фуко (1819 - 1868) и названы его именем. Он назвал явление нагревания металлических тел, вращаемых в магнитном поле, вихревыми токами.

В качестве примера на рисунке показаны вихревые токи, индуцируемые в массивном сердечнике, помещенном в катушку, обтекаемую переменным током. Переменное магнитное поле индуцирует токи, которые замыкаются по путям, лежащим в плоскостях, перпендикулярных направлению поля.



Вихревые токи: а - в массивном сердечнике, б - в пластинчатом сердечнике

Мощность, затрачиваемая на нагрев сердечника вихревыми токами, бесполезно снижает КПД технических устройств электромагнитного типа.

Чтобы уменьшить мощность вихревых токов, увеличивают электрическое сопротивление магнитопровода, для этого сердечники набирают из отдельных тонких (0,1- 0,5 мм) пластин, изолированных друг от друга с помощью специального лака или окалины.

Магнитопроводы всех машин и аппаратов переменного тока и сердечники якорей машин постоянного тока собирают из изолированных друг от друга лаком или поверхностной непроводящей пленкой (фосфатированных) пластин, выштампованных из листовой электротехнической стали. Плоскость пластин должна быть параллельна направлению магнитного потока.

При таком делении сечения сердечника магнитопровода вихревые токи существенно ослабляются, так как уменьшаются магнитные потоки, которыми сцепляются контуры вихревых токов, а следовательно, понижаются и индуцируемые этими потоками э. д. с, создающие вихревые токи.

В материал сердечника также вводят специальные добавки, также увеличивающие его электрическое сопротивление. Для увеличения электрического сопротивления ферромагнетика электротехническую сталь готовят с присадкой кремния.

Сердечники некоторых катушек (бобин) набирают из кусков отожженной железной проволоки. Полоски железа располагают параллельно линиям магнитного потока. Вихревые же токи, протекающие в плоскостях, перпендикулярных направлению магнитного потока, ограничиваются изолирующими прокладками. Для магнитопроводов приборов и устройств, работающих на высокой частоте, применяют магнитодиэлектрики. Чтобы снизить вихревые токи в проводах, последние изготавливают в виде жгута из отдельных жил, изолированных друг от друга.



Лицендрат - это система переплетенных медных проводов, в которой каждая жила изолирована от соседних. Лицендрат предназначен для использования на высокочастотных токах для предотвращения возникновения паразитных токов и токов Фуко.

В ряде случаев вихревые токи используются в технике, например для торможения вращающихся массивных деталей. Электродвижущая сила, наводимая в элементах детали при пересечении магнитного поля, вызывает в ее толще замкнутые токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем, создают значительные противодействующие моменты.

Широко применяется также такое магнитоиндукционное торможение для успокоения движения подвижных частей электроизмерительных приборов, в частности для создания противодействующего момента и торможения подвижной части электрических счетчиков.

В этих приборах диск, укрепленный на оси счетчика, вращается в зазоре постоянного магнита. Наводимые в массе диска при этом движении вихревые токи, взаимодействуя с потоком того же магнита, создают противодействующий и тормозящий моменты.

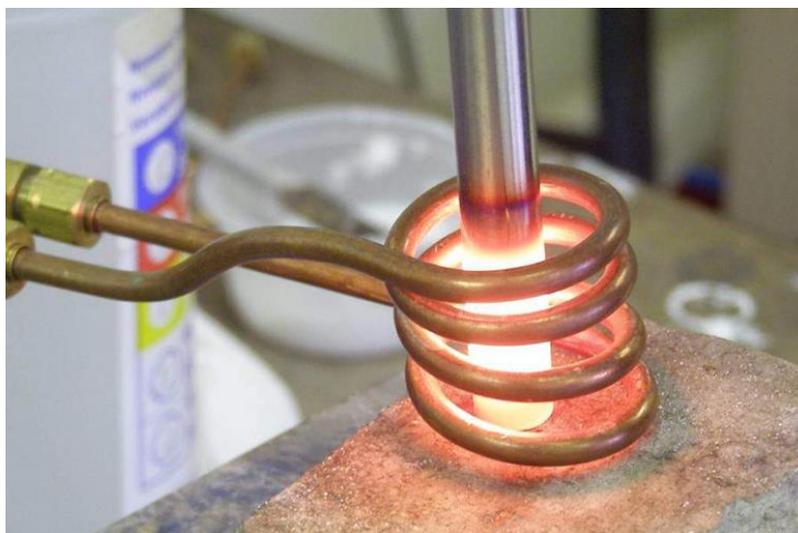
Например, вихревые токи нашли в устройстве магнитного тормоза диска электрического счетчика. Вращаясь, диск пересекает магнитные силовые линии постоянного магнита. В плоскости диска возникают вихревые токи, которые, в свою очередь, создают свои магнитные потоки в виде трубочек вокруг вихревого тока. Взаимодействуя с основным полем магнита, эти потоки тормозят диск.

В ряде случаев, применяя вихревые токи, можно использовать технологические операции, которые невозможно применить без токов высокой частоты. Например, при изготовлении вакуумных приборов и устройств из баллона необходимо тщательно откачать воздух и иные газы. Однако в металлической арматуре, находящейся внутри баллона, имеются остатки газа, которые можно удалить только после заваривания баллона.

Для полного удаления газа арматуры вакуумный прибор помещают в поле высокочастотного генератора, в результате действия вихревых токов арматура нагревается до сотен градусов, остатки газа при этом нейтрализуются.

Закалка сталей токами высокой частоты (ТВЧ) — это один из распространенных методов поверхностной термической обработки, который

позволяет повысить твердость поверхности заготовок. Применяется для деталей из углеродистых и конструкционных сталей или чугуна. Индукционная закалка ТВЧ является одним из самых экономичных и технологичных способов упрочнения. Она дает возможность закалить всю поверхность детали или отдельные ее элементы или зоны, которые испытывают основную нагрузку.



При этом под закаленной твердой наружной поверхностью заготовки остаются незакаленные вязкие слои металла. Такая структура уменьшает хрупкость, повышает стойкость и надежность всего изделия, а также снижает энергозатраты на нагрев всей детали.