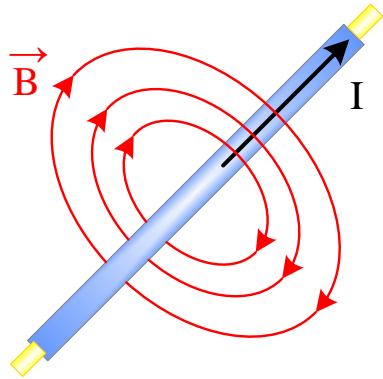
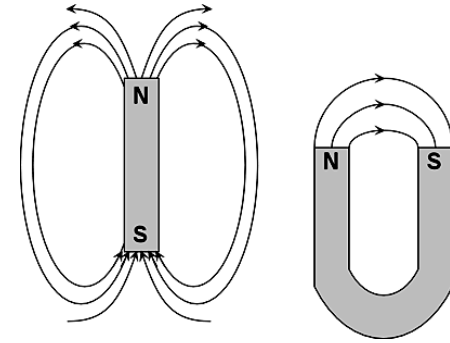


# ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ

- Основни понятия, величини и зависимости
- Основни закони
- Влияние на електромагнитното поле върху феромагнитните материали



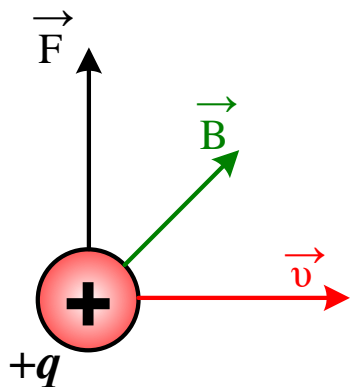
**Магнитно поле** – наблюдава се в пространството около проводници, по които протича ток, или около постоянни магнети.



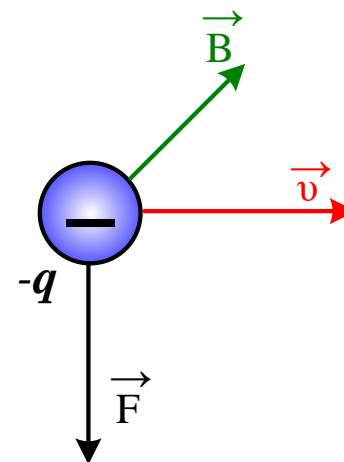
### **4.1. Особенности на магнитното поле**

- Магнитното поле не притежава елементарни източници.
- Източници на магнитното поле са движещи се електрически заряди (проводници с ток), или постоянни магнети.
- Неговото съществуване се открива чрез силовите или индукционни прояви.
- Магнитното поле е векторно поле.
- Основната силова характеристика на магнитното поле е векторната величина магнитна индукция  $\vec{B}$ .
- Полето се визуализира чрез своите силови линии, към които тангира вектора на магнитната индукция  $\vec{B}$ .

Върху електрически заряд  $q$ , който се движи в магнитно поле, действа сила  $F$ . Нейната големина се определя от произведението на алгебричната стойност на заряда  $q$  и векторното произведение на скоростта му  $\vec{v}$  и силовата характеристика на магнитното поле, наречена *магнитната индукция*  $B$ .



$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$



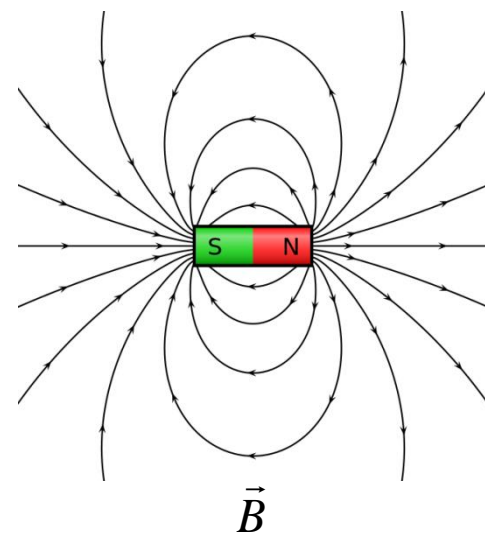
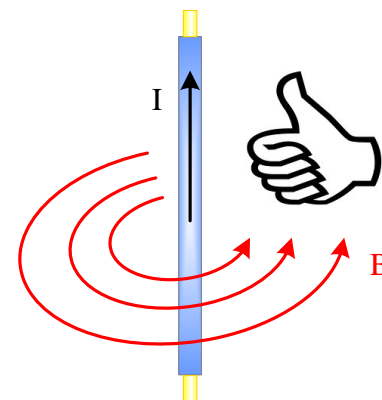
Големината на магнитната индукция  $B$  в дадена точка от магнитното поле се определя от отношението на максималната сила  $F_{\max}$ , която действа на движещ се заряд, и произведението от големината на заряда  $q$  и скоростта му  $v$ . Мерната единица за магнитна индукция се нарича «тесла» (Т).

$$B = \frac{F_{\max}}{|q| \cdot v}$$

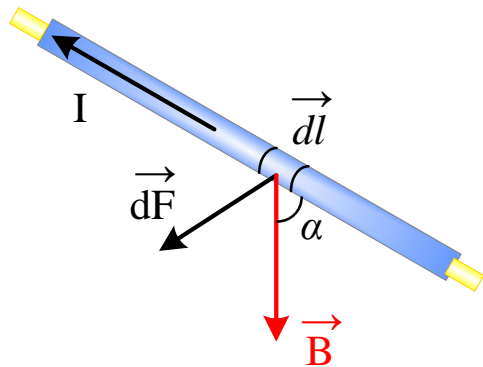
Графична представа за разпространението на магнитното поле дават неговите *силови линии*. Това са **затворени насочени линии**, тангентите към които съвпадат с вектора на магнитната индукция  $\vec{B}$ .

### Особености на магнитните силови линии

- Посоката им се определя по правилото на дясната ръка, ако полето се създава от проводник с ток, или от *северния магнитен полюс (N) към южния полюс (S)*, ако полето е създадено от постоянен магнит.
- *Тези линии са винаги затворени*. От това следва, че магнитното поле *не се поражда от магнитни заряди*. Магнитни заряди в природата не съществуват.
- *Магнитните силови линии никога не се пресичат* взаимно.
- *Гъстотата* им е пропорционална на магнитната индукция в разглежданата точка от пространството.



Разглежда се елементарен елемент с дължина  $dl$ , през който протича ток  $I$ . Елементарната сила  $d\vec{F}$ , с която външно магнитно поле с индукция  $\vec{B}$ , действа върху елемента, е



$$d\vec{F} = I.(d\vec{l} \times \vec{B})$$

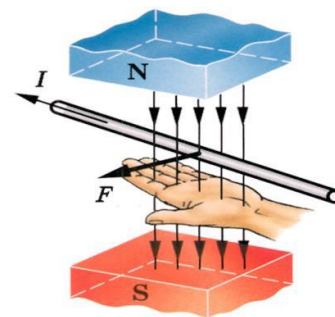
Магнитната сила  $\vec{F}$ , действаща върху целия проводник с дължина  $l$ , е получена след векторно сумиране на силите, приложени към всички токови елементи на проводника.

$$\vec{F} = I.\int_0^l d\vec{l} \times \vec{B}$$

Големината на силата се определя не само от големините на тока  $I$ , магнитната индукция  $B$  и дължината на проводника  $l$ , но и от ориентацията му спрямо магнитното поле  $\alpha$ .

$$|\vec{F}| = I.l.B.\sin\alpha$$

Посоката на магнитната сила може да се определи или чрез прилагане на правилата за векторно произведение на два вектора, или чрез прилагане на *правилото на лявата ръка*.

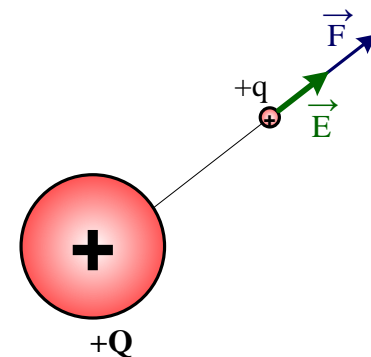


Електрически и магнитни сили

➤ Електрическите сили действат върху зарядите независимо дали те са в покой или се движат. Магнитните сили действат само върху движещи се заряди.

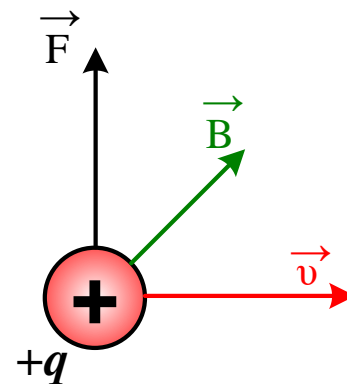
➤ Докато електрическите сили действат по посока на електрическия интензитет  $\vec{E}$ , магнитните сили действат перпендикулярно на магнитната индукция  $\vec{B}$ .

➤ При преместване на електрическия заряд в електрическо поле електрическите сили извършват работа. Преместването на заряд в магнитно поле не е свързано с извършване на работа от магнитните сили.



$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

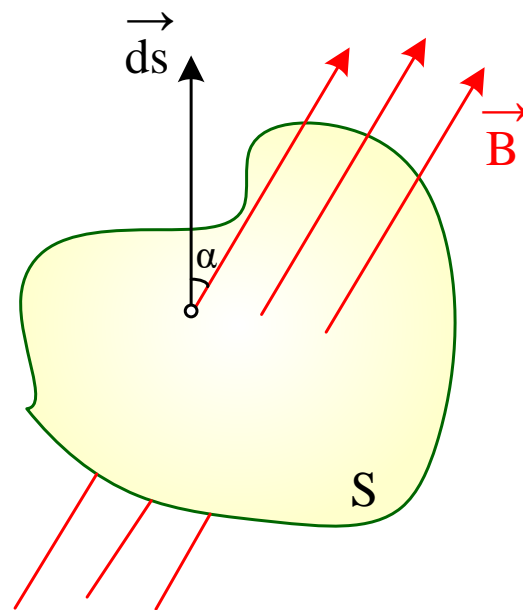


Магнитният поток  $\Phi$  е скаларна величина, с която се описва броя на линиите на магнитната индукция  $\vec{B}$ , които преминават през някаква произволна повърхност  $S$ . Той се определя като се сумират (интегрират) елементарните магнитните потоци през безкрайно малките равнинни повърхности  $d\vec{s}$ .

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

В случаите, когато магнитното поле има постоянна големина на магнитната индукция ( $B = \text{const}$ ), а разглежданата повърхнина е равнина,  $\Phi$  се определя с:

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



Магнитният поток се измерва във «вебер» (Wb),  $\text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{V} \cdot \text{s}$

Векторната величина магнитна индукция  $B$  зависи от свойствата на веществените среди, в които се разпространява магнитното поле.

Интензитетът на магнитното поле  $H$  е векторна величина, която зависи единствено от характеристиките на източниците на магнитното поле и не се влияе от свойствата на материалните среди, в които се разпространява полето. Тя се дефинира като отношение на магнитната индукция  $B$  в точка от пространството и *магнитната проницаемост*  $\mu$  на *средата* в същата точка. Магнитният интензитет се измерва в «ампер на метър», A/m.

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

Магнитната проницаемост  $\mu$  е характеристиката на веществените среди, която отразява техните магнитни свойства. Определя се като произведение от магнитната проницаемост на вакуум  $\mu_0$  ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ ) и *относителната магнитна проницаемост*  $\mu_r$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$



## 1. Закон за пълния ток (закон на Ампер)

Законът за пълния ток дава връзка между големината на токовете протичащи в определен участък от пространството и големината на създаденото от тях магнитно поле.

**Def.:** Циркулацията на вектора на интензитета на магнитното поле  $\vec{H}$  по произволен затворен контур  $l$  е равна на алгебричната сума на токовете, обхванати от контура:

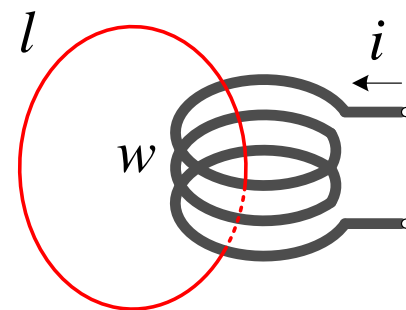
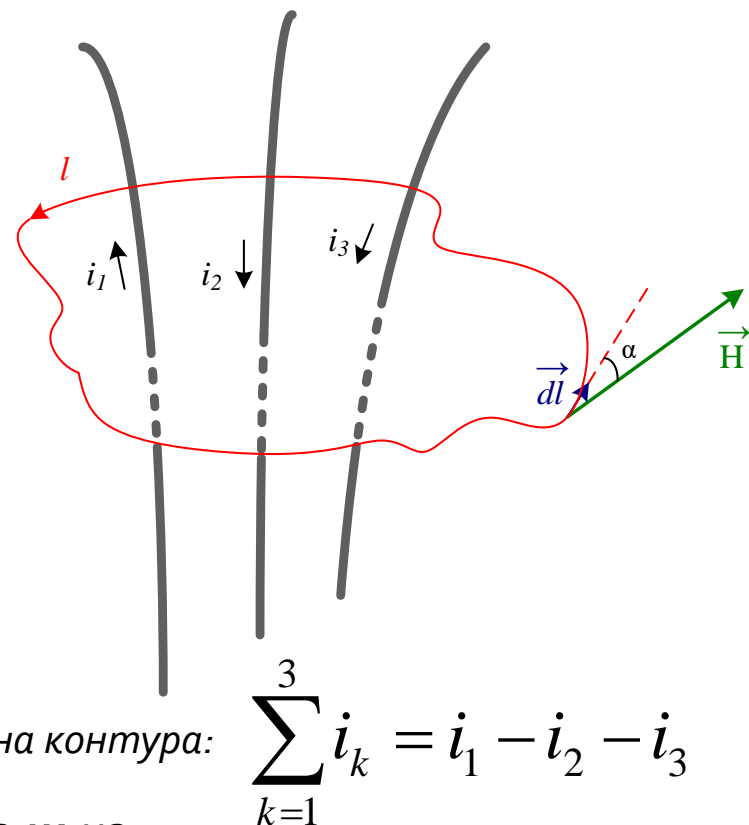
$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{k=1}^n i_k$$

За примера на фигурата и показаната посока на обхождане на контура:

Когато контурът  $l$  обхваща навивките на намотка с  $w$  на брой навивки, се получава:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{k=1}^n i_k = w \cdot i = F$$

Величината  $F$  се нарича **магнитодвижещо напрежение**, измерва се в **ампери**, А.



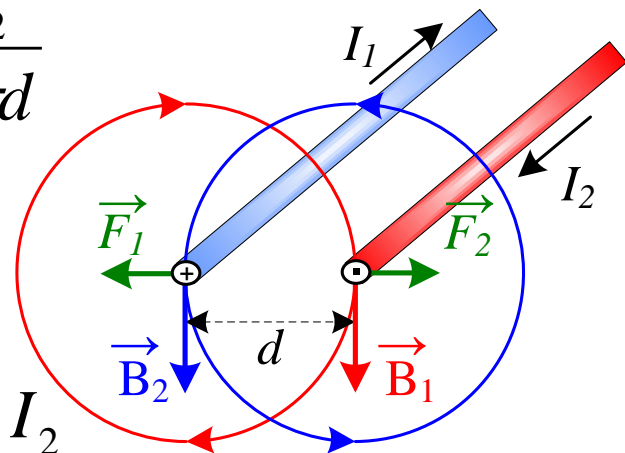
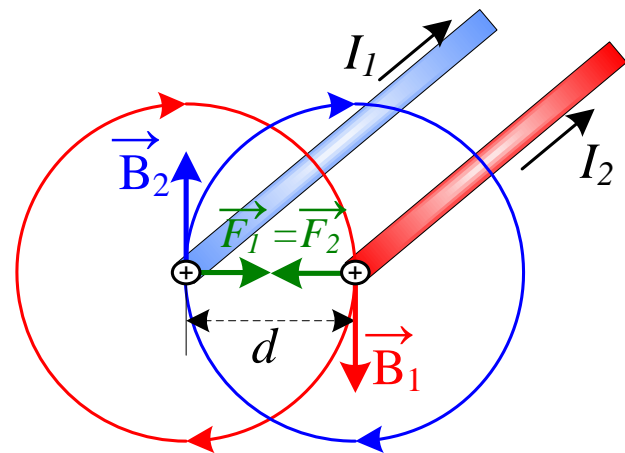
Силовото взаимодействие между два проводника, през които протичат токове  $I_1$  и  $I_2$ , може да се разглежда като взаимодействие между магнитното поле, създадено от единия проводник, и тока, протичащ през другия.

Разглеждат се два праволинейни проводника, разположени успоредно на разстояние  $d$ . Магнитната индукция на полетата, създадени от токовете  $I_1$  и  $I_2$  в точки по оста на съответните проводници, се определя от изразите:

$$B_1 = \mu_0 \cdot H_1 = \mu_0 \cdot \frac{I_1}{2\pi d} \quad \text{и} \quad B_2 = \mu_0 \cdot H_2 = \mu_0 \cdot \frac{I_2}{2\pi d}$$

От закона на Ампер се определят големините на силите, които действат върху единица дължина от проводниците:

$$F_1 = B_2 I_1 = \mu_0 \frac{I_2}{2\pi d} I_1 \quad \text{и} \quad F_2 = B_1 I_2 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi d} I_2$$

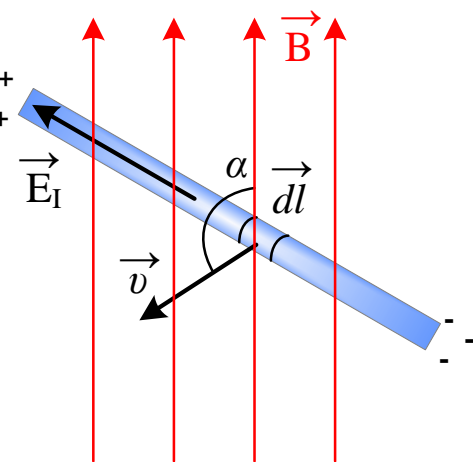


Както се вижда, двете сили са равни по големина. Техните посоки се определят с правилото на лявата ръка. При едноточни токове силите са на привличане, а при разноточни токове – на отблъскване.

Явлението електромагнитна индукция е открито през 1831 г. от английския учен Майкъл Фарадей.

**Def.:** Електромагнитната индукция е физическо явление, което отразява появата на потенциална разлика в краищата на проводник, подложен на въздействието на променящо се във времето магнитно поле.

**а)** При движение на проводник с дължина  $l$  в хомогенно магнитно поле с индукция  $\vec{B}$ , свободните му електрони търпят действието на магнитна сила, която променя концентрацията им в двата края на проводника.



Въздействието на магнитното поле върху свободните електрони на проводника може да се замени с действие на електрическо поле с интензитет  $E_I$ , вектора на който е насочен в указаната посока:

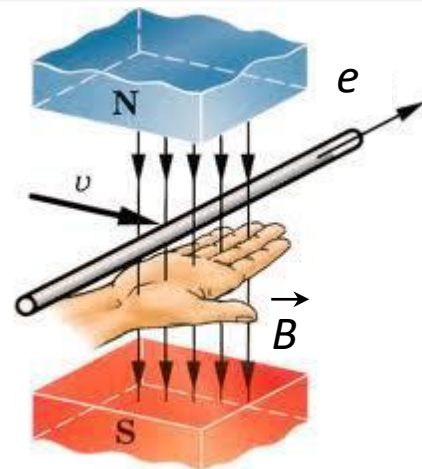
$$\vec{E}_I = (\vec{v} \times \vec{B})$$

Скаларното произведение на  $E_I$  и елементарната дължина на проводника  $dl$ , дефинира величината **индуцирано електродвижещо напрежение**  $e$  (е.д.н.), която за цялата му дължина  $l$ , се определя с :

$$e = \int_0^l \vec{E}_I \cdot d\vec{l} = \int_0^l (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

В хомогенно магнитно поле, големината на индукираното е.д.н. зависи от дължината на проводника  $l$ , магнитната индукция на полето  $B$ , скоростта на движение  $v$  и ъгъла  $\alpha$ , под който проводника пресича силовите линии на полето. Посоката му се определя от правилото на дясната ръка.

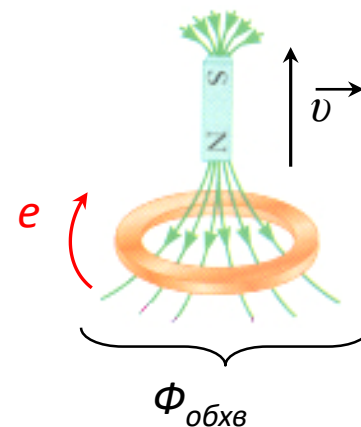
$$e = B.l.v.\cos\alpha$$



б) Опитът показва, че е.д.н. се появява и при неподвижен контур, когато се изменя потокът, обхванат от контура.

Изследванията установяват, че в такъв контур индуцираното е.д.н. зависи само от промяната на обхванатия от контура магнитен поток, или:

$$e = -\frac{d\Phi_{\text{обхв}}}{dt}$$



Изразът  $\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_{\text{обхв}}}{dt}$  описва количествено явления електромагнитна индукция –

*е.д.н., индуктирано в затворен контур, е равно на скоростта на изменение на обхванатия магнитен поток, взета с отрицателен знак.*

Анализът му позволява да се направи извода, че в затворен контур се индуктира електродвижещо напрежение ако:

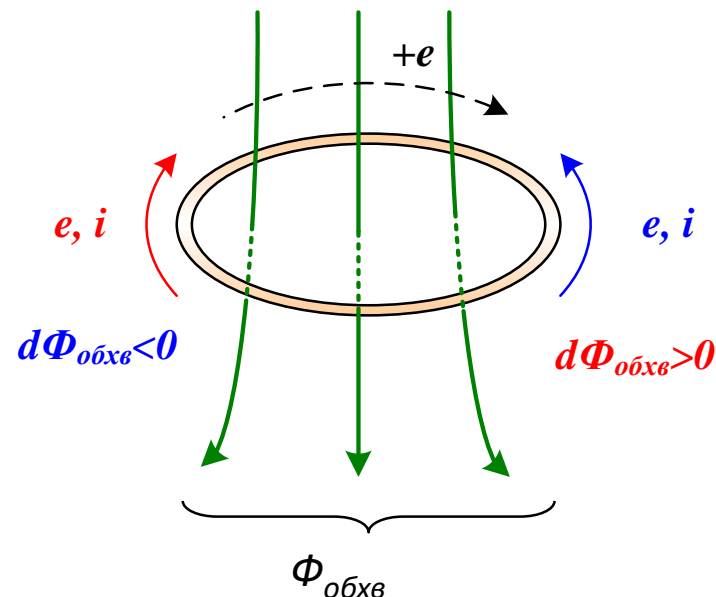
- ✓ *контурът се движи и пресича силовите линии на постоянно магнитно поле;*
- ✓ *контурът е неподвижен, но е облъчван от променливо във времето магнитно поле.*

Посоката на индуктираното е.д.н. (+  $\mathcal{E}$ ) се определя с правилото на Ленц. Той установява, че:

**Електрическите контури се стремят да запазят неизменен обхванатия магнитен поток  $\Phi_{\text{обхв}}$ .**

При промяна на  $\Phi_{\text{обхв}}$  в контура се индуктира е.д.н  $\mathcal{E}$  и протича ток  $i$  с такава посока, че той чрез своя магнитен поток се противопоставя на промяната.

Така, ако  $d\Phi_{\text{обхв}} > 0$ , то е.д.н. индуцираното от тази промяна ще бъде  $\mathcal{E} < 0$ .



Бобините са електрически съоръжения предназначени да създават магнитно поле. Съставени са от  $w$  навивки, в които протича един и същ ток  $i$ . Ако всяка навивка създава магнитен поток  $\Phi_L$ , то резултантния магнитен поток на бобината  $\Psi_L$  ще има големина:  $\Psi_L = w \cdot \Phi_L$ . Отношението на създадения магнитен поток  $\Psi_L$  и тока през бобината  $i$ , определя нейната индуктивност  $L$ . Измервателната единица за индуктивността е *хенри*,  $H$

$$L = \frac{\Psi_L}{i} \text{ , } H$$

Ако в бобина протича променлив ток, създадения от нея магнитен поток също е променлив, при което в бобината ще се индутира е.д.н. Явлението се нарича *самоиндукция*, а създаденото е.д.н  $e_L$  съответно *е.д.н. от самоиндукция*.

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt} \text{ , което при } \mathbf{L=const} \text{ приема вида: } e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

Индуктивността на всяка бобина зависи от броя на нейните навивки, магнитните свойства на средата в която се разпространява полето и от нейните размери.

Относителната магнитна проницаемост  $\mu_r$  е безразмерно число, което показва колко пъти магнитните характеристики на една веществена среда се различават от тези на вакуума.

В зависимост от стойността на  $\mu_r$  веществените среди се разделят на **диамагнитни** ( $\mu_r < 1$ ), **парамагнитни** ( $\mu_r \geq 1$ ) и **ферромагнитни** ( $\mu_r \gg 1$ ).

**Диамагнитните среди** намаляват резултантното магнитно поле вътре в себе си ( $\mu_r \approx 0,95$ ). Такива свойства притежават среброто, медта и др.

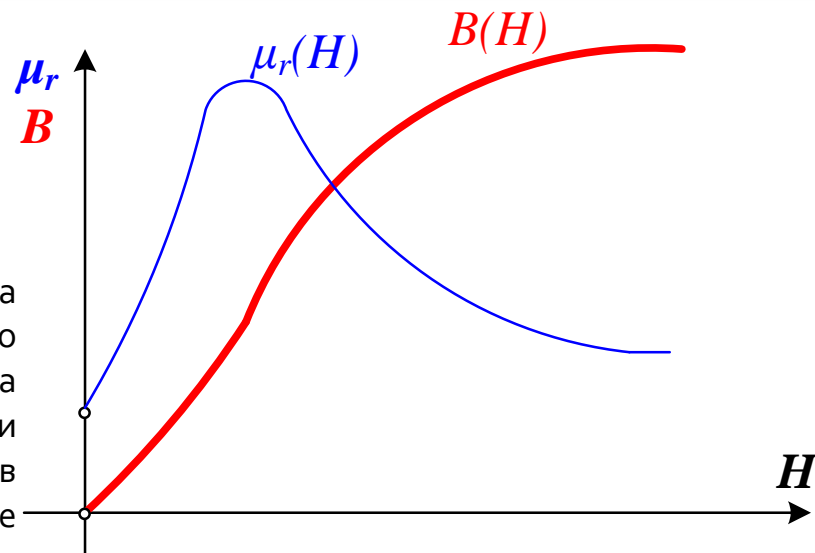
**Парамагнитните среди** са по-добри проводници на магнитните силови линии в сравнение с вакуума. В такива среди магнитно поле е с малко по-голяма индукция ( $\mu_r \approx 1,05$ ). Парамагнитни свойства притежават алуминия, хрома и др.

**Ферромагнитните среди** са най-добрите проводници на магнитните силови линии. В такива среди магнитно поле се съсредоточава, а получената магнитна индукция многократно надвишава тази на вакуума ( $\mu_r \gg 1$ ). Ферромагнитни свойства притежават желязото, никела, платината и др.

Относителната магнитна проницаемост  $\mu_r$  на феромагнитните материали се изменя в широки граници от  $\mu_r \approx 50$  до  $\mu_r \approx 10^4$ , като за някои материали тя може да достигне до стойности от  $\mu_r \approx 10^6$

Феромагнитните материали притежават микрообласти на спонтанно намагнитване, наречени *домени*. В случаите, когато домовете са разположени така, че техните магнитни полета взаимно се компенсират, тялото се проявява макроскопически като ненамагнитено. Ако едно такова тяло се постави във външно магнитно поле, домовете започват да променят своите размери и да се ориентират по посока на полето. Техните магнитни полета се наслагват към възбудителното.

Резултантната магнитна индукция във феромагнитната среда се образува от участието на двете полета: възбуждащото и полето на ориентиралите се области. При това втората съставка е многократно по-голяма от първата.



Изследването на изменението на индукцията  $B$  на магнитното поле вътре в материала при промяна на интензитета  $H$  на външното магнитно поле установява, че зависимостта е **нелинейна**. Получената характеристика  $B(H)$  е известна като **основна крива на намагнитване** на феромагнитните материали.

При увеличаване на интензитета  $H$  на външното магнитно поле, индукцията вътре в материала  $B$  достига насищане. Следователно относителната магнитна проницаемост на тези материали  $\mu_r$  не е константа, а зависи от интензитета  $H$  т.е.  $\mu_r(H)$ .

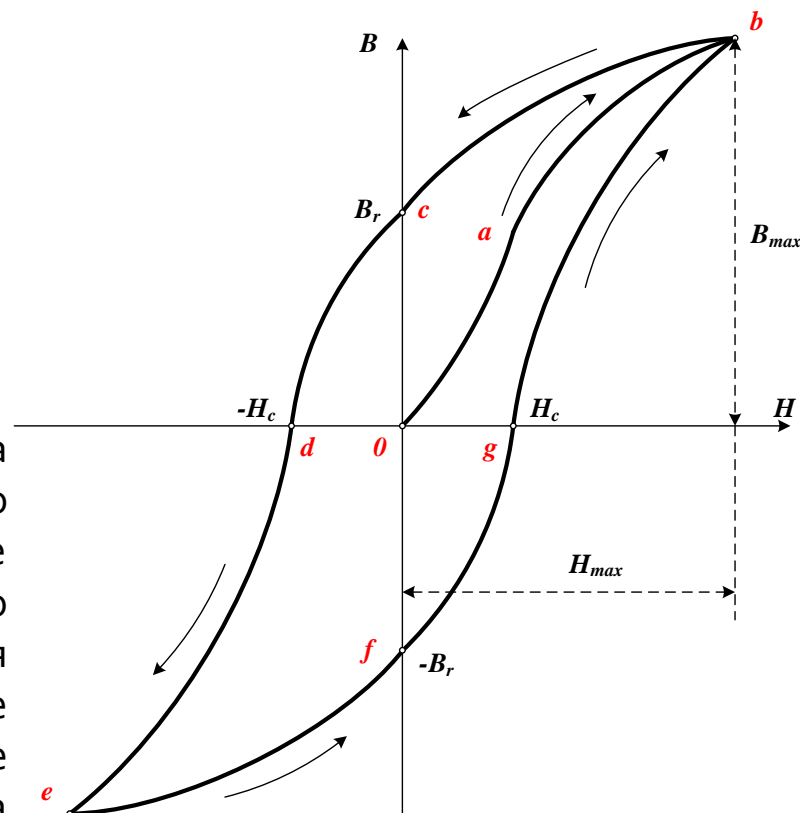


Кривата на първоначално намагнитване се получава при постепенно еднопосочно намагнитване на ненамагнитено тяло. Ако феромагнитното тяло се пренамагнитва циклично до едни и същи максимални стойности на интензитета  $H$ , графиката на зависимостта  $B(H)$  образува затворена крива. Графичното изображение на зависимостта  $B(H)$  за този материал представлява неговата **хистерезисна крива** - " $bcdefgb$ ".

Явлението, описващо противопоставянето на феромагнитните материали на въздействието на външно магнитно поле, което циклично променя посоката си, се нарича **хистерезис (изоставане в размагнитването)**. То се съпътства със загуби на електрическа енергия (**хистерезисни загуби**). Лесно се доказва, че **хистерезисните загуби** за еднократно пренамагнитване на единица обем от феромагнитното тяло са пропорционални на площта, заградена от хистерезисния цикъл.

Кривата отразява възможността на тези материали да се намагнитват. Така при премахване на външното поле, т.е.  $H=0$ , в материала се наблюдава **остатъчна магнитна индукция**  $+B_r$  (точка  $c$ ) или  $-B_r$  (точка  $f$ ).

Феромагнитния материал може да се размагнити напълно ( $B=0$ ), ако му се въздейства с подходящо външно магнитно поле с интензитет  $-H_c$  (точка  $d$ ) или с интензитет  $+H_c$  (точка  $g$ ). Стойността на  $H_c$ , при която във феромагнитния материал  $B=0$ , се нарича **коерцитивна сила**.



Според вида на хистерезисната крива феромагнитните материали се делят на магнитно меки и магнитно твърди вещества. Тези названия нямат нищо общо с механичната им твърдост.

Магнитно меките (цикъл 1) материали се характеризират с малка остатъчна индукция, следователно, лесно се намагнитват и имат малки хистерезисни загуби. Тяхната хистерезисна крива е сравнително "тясна", огражда малка площ. Това е показател за малки топлинни загуби при пренамагнитването им. Тези свойства на магнитно меките материали обуславят използването им в електрическите машини и апарати. Към тях спадат електротехническата стомана, пермалоят и др.

Магнитно твърдите (цикъл 2) материали се характеризират с голяма остатъчна индукция. Те трудно се намагнитват, но веднъж намагнитени, запазват стабилно магнитното си поле след премахване на възбудителя. Хистерезисната им крива е широка и огражда по-голяма площ, което е показател за по-големи загуби на топлина при пренамагнитването. Тези материали се използват за направата на постоянни магнити.

