

Elektrotechnika

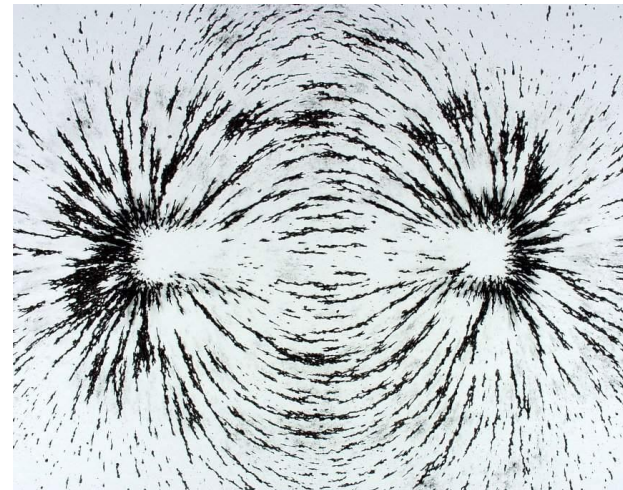
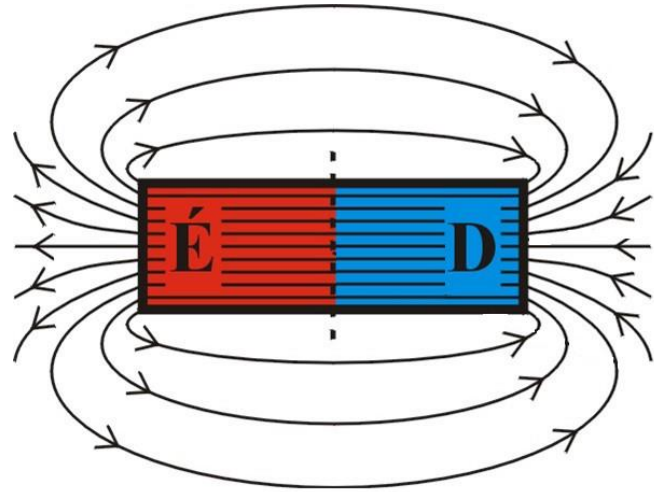
Mágnességtan



Áttekintés, bevezetés

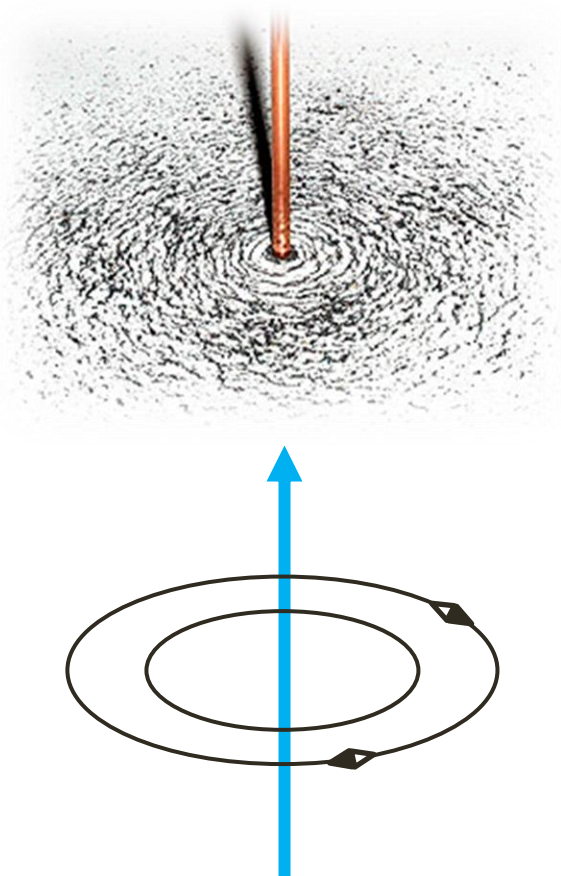
- A térnek azt a részét, ahol a mágneses kölcsönhatás kimutatható, mágneses térnek nevezzük;
- A mágneses tér az ember számára nem érzékelhető, ezért csak hatásai alapján tudjuk észlelni:
 - Erőhatás
 - Árammal átjárt vezető
 - Indukáló hatás
- A mágneses teret erővonalakkal vagy indukcióvonalakkal szemléltetjük:
 - A sűrűségük a mező erősségével arányos;
 - Figyeljük meg, hogy az erővonalak mindig zártak (É → D): a mágneses tér forrásmentes (Maxwell III. egyenlete):

$$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$



Az áram mágneses tere

- Mágneses teret nem csak állandó mágnesek hoznak létre maguk körül, hanem árammal átjárt vezetők is (tekercsek);
- Ennek leírására a mágneses térerősség szolgál. Jele: $\mathbf{H}$, mértékegysége $[\mathbf{A/m}]$.
- A kísérlet azt mutatja, hogy a iránytű állásait burkoló görbék a vezetőt körülvevő koncentrikus körök;
- Ezek a görbék (erővonalak) minden esetben zártak, a körvonal bármely pontján húzott érintő az adott pólusra ható erő irányát és nagyságát mutatja
- A mágneses térerősség anyagfüggetlen!
- Áramirány és mágneses tér kapcsolata: jobbkéz szabály

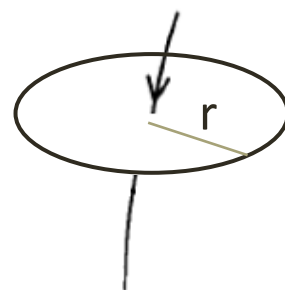
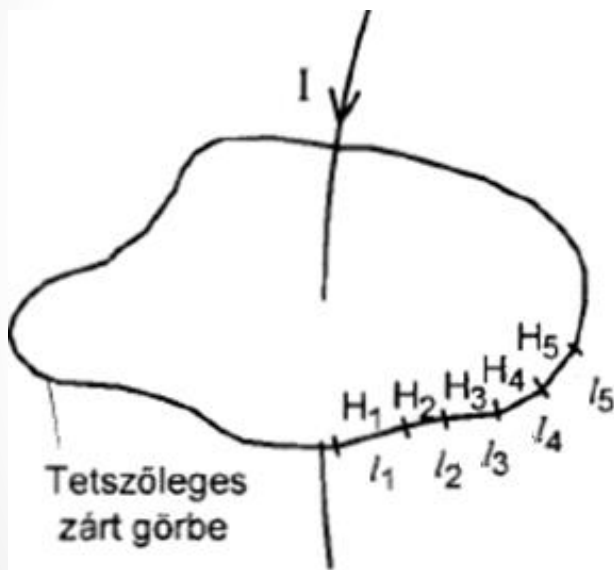


Ampère törvénye

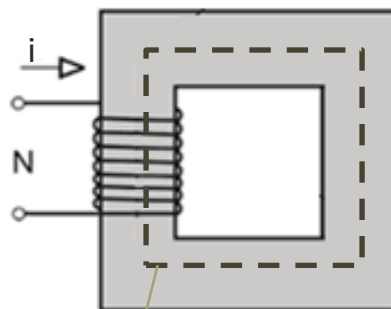
$$\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_A \mathbf{J} d\mathbf{A}$$



$$\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_A \mathbf{J} d\mathbf{A} = Ni$$



$$i = \theta = H_1 l_1 = H 2\pi r$$



$$Ni = \theta = H l_{köz}$$

közepes erővonalhossz

$$\theta = H_1 l_1 + H_1 l_1 + H_1 l_1 + \dots + H_n l_n$$

Mágneses indukció, mágneses tér és anyag kapcsolata

- A mágneses térerősség mágneses indukciót hoz létre valós anyagokban. Jele: **B**, mértékegysége [**Vs/m²** = **T**] vagy [**G**] (Gauss) 1T = 10000G
- A létrehozott mágneses indukció kiszámítható a:

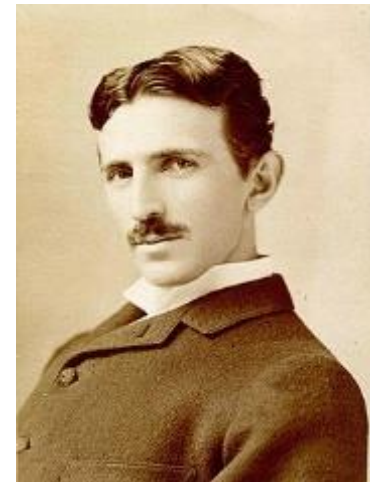
$$B = \mu H$$

- A mágneses erővonalak haladhatnak

Levegőben
($B = \mu_0 H$)

Vasmagban
($B = \mu_0 \mu_r H$)

- ahol, μ_0 a vákuum permeabilitása
- A permeabilitás két részből áll:
 - A vákuum permeabilitása: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} [\frac{Vs}{Am}]$
 - Relatív permeabilitás: μ_r
- μ_r a relatív permeabilitás, amely megmutatja, hogy az indukció hányszor lesz nagyobb, ha a teret vákuum helyett valamilyen anyag tölti ki;
- A valóságban –villamos gépek esetén- a korábban említett két lehetőség együttese a jellemző (vas + légrés).

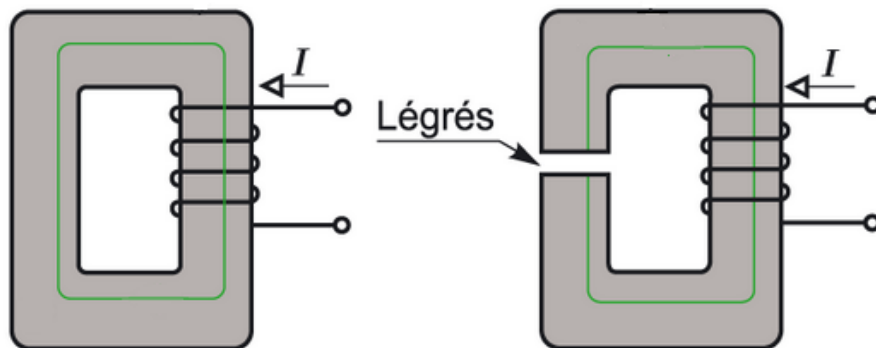


$$(B = \mu_0 H)$$

Légrés nélküli mágneses kör

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

Légrést is tartalmazó mágneses kör



- Az alkalmazott vasmagok relatív permeabilitása (μ_r) átlagosan 2000-6000 között van (típustól függően);
- A légrés alkalmazásának oka pl.: tekercsek esetén a telítődés elkerülése (késleltetése), ugyanakkor pl.: forgógépek esetén a légrés együtt jár a villamos gép kialakításával;
- Megállapítható, amennyiben vasmagot alkalmazunk, kisebb gerjesztőárammal sokkal nagyobb mágneses indukciót vagyunk képesek létrehozni (ld. a példát később);
- A mágneses indukciót (B) szokás mágneses fluxussűrűségnek is hívni: B mérőszáma alatt ugyanis egy zárt felületen áthaladó erővonalak sűrűségét értjük;
- Az összes fluxus amely egy adott felületen áthalad, kiszámítható B felületre vett integráljával, azaz:

$$\Phi = \oint_A \mathbf{B} dA = BA$$

- A fluxus mértékegysége:

$$\Phi = \frac{Vs}{m^2} m^2 = [Vs] \text{ vagy } [Wb]$$

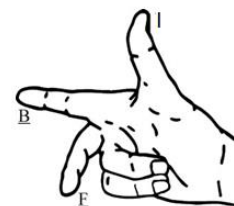
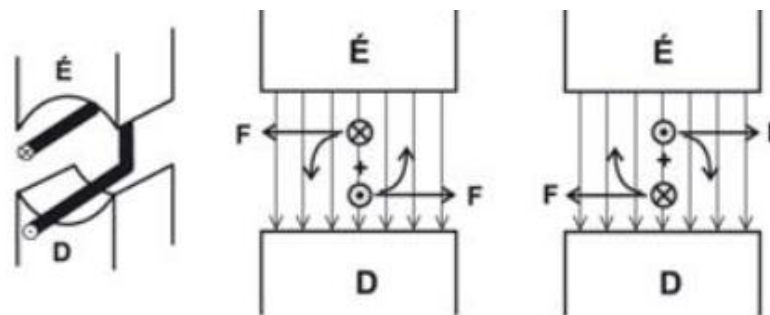
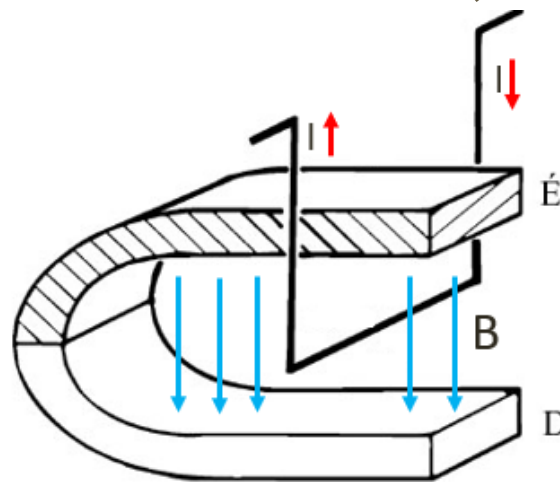
Erőhatás mágneses térben,

- Két mágneses tér egymásra való hatása erőként nyilvánul meg (vonzás, taszítás);
- Az erőhatás elérhető állandó mágnessel vagy áramjárta vezető (pl.: tekercselés) segítségével;
- Ha az áram merőleges a mágneses tér irányára, a vezetőre ható erő egyenesen arányos:
 - Az áramerősséggel
 - A mezőben lévő vezető hosszával
 - A mágneses indukcióval (erővonsűrűséggel):

$$F = BIl \text{ [N]}$$

- Amennyiben a mágneses tér és az áram nem merőleges egymásra, mindig kisebb erő keletkezik, csak a merőleges vetületet szabad figyelembe venni, azaz:

$$F = BIl \sin(\theta)$$



Reluktancia

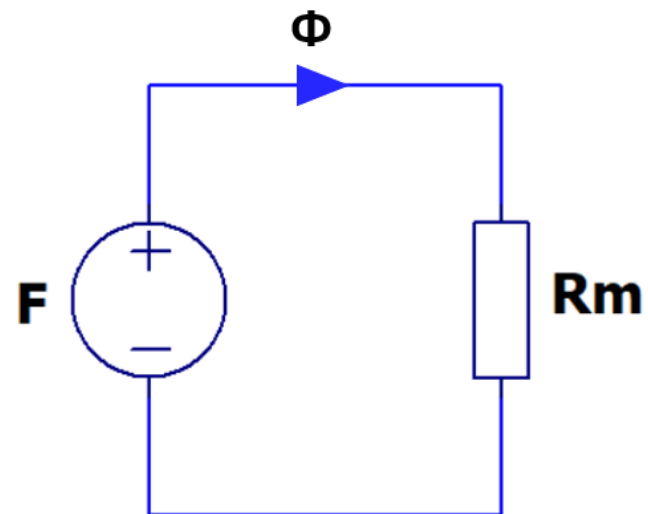
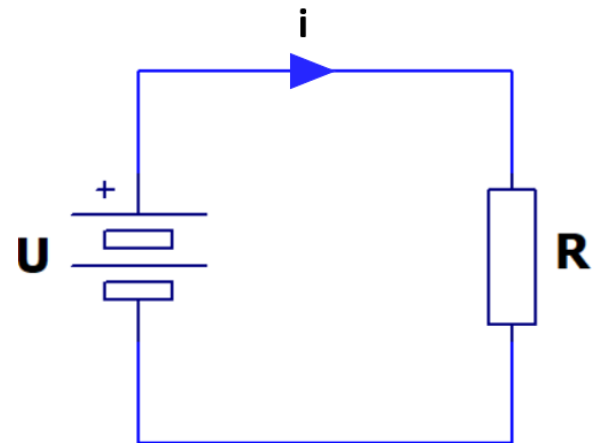
- A reluktancia a fluxus útjának mágneses ellenállását jelenti;
- A villamos kör analógiájára a reluktancia megfeleltethető az ellenállásnak, azaz:

$$\left. \begin{array}{l} \Phi = BA \\ B = \mu H \\ H = \frac{Ni}{l} \end{array} \right\} \Phi = \frac{\mu ANi}{l} = \frac{Ni}{\frac{l}{\mu A}} = \frac{F}{\mathfrak{R}_m}$$

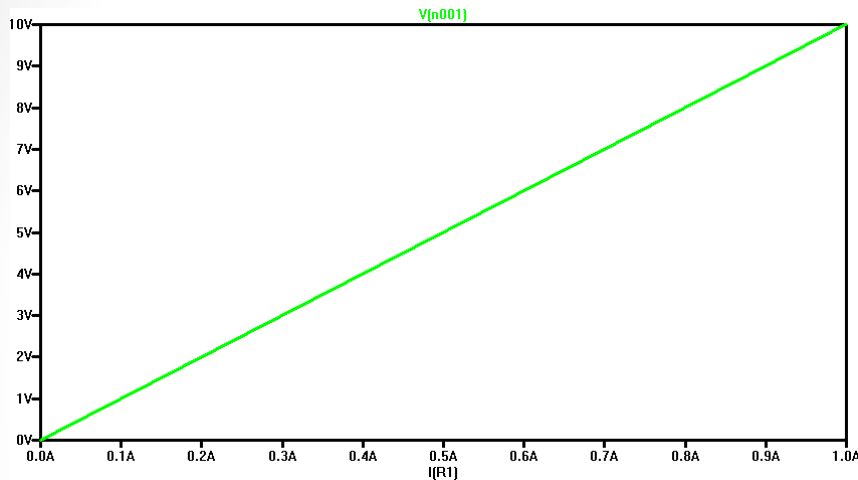
- Analógia:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad R_m = \frac{l}{\mu A}$$

villamos mágneses

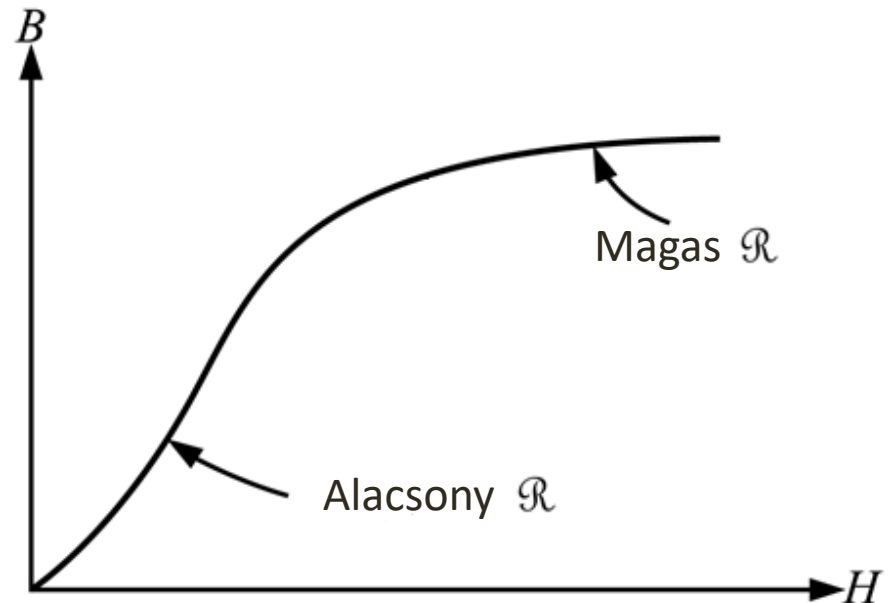


Mágneses és villamos körök karakterisztikája



- Egy ellenálláson az U/I hányados állandó és lineáris mennyiséget határoz meg, melyet ellenállásnak nevezünk
- Az ábráról leolvasható, hogy nagyobb feszültségértékhez nagyobb áramérték tartozik ($R=U/I$)

- Mágneses körök esetén az anyagok mágneses ellenállása nemlineáris, függ a mágneses térerősség nagyságától
- Egy bizonyos térerősség után már hiába alkalmazunk egyre nagyobb, az indukció nem változik, az anyag telítésbe kerül, szaturál



Egyszerű mágneses kör

$$l_{köz} = 60mm \cdot 4 = 240mm = 0,24m$$

Vasmaggal:

$$B = \mu H \rightarrow H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{0,2T}{4\pi 10^{-7} \cdot 2000}$$

$$= 79,57 \frac{A}{m}$$

$$NI = Hl$$

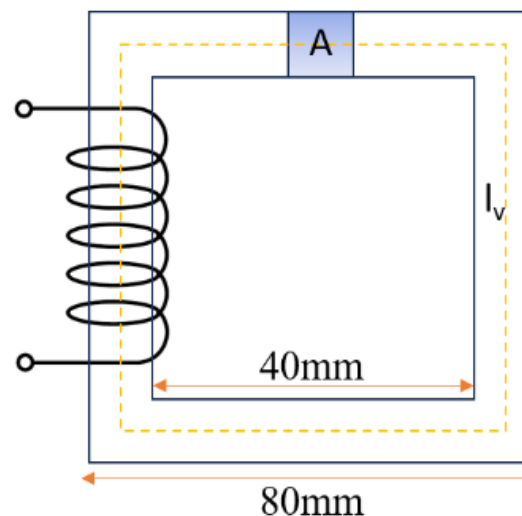
$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{79,57 \frac{A}{m} \cdot 0,24m}{250} = 76,387mA$$

Vasmag nélkül:

$$B = \mu H \rightarrow H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,2T}{4\pi 10^{-7}}$$

$$= 159154,9 \frac{A}{m}$$

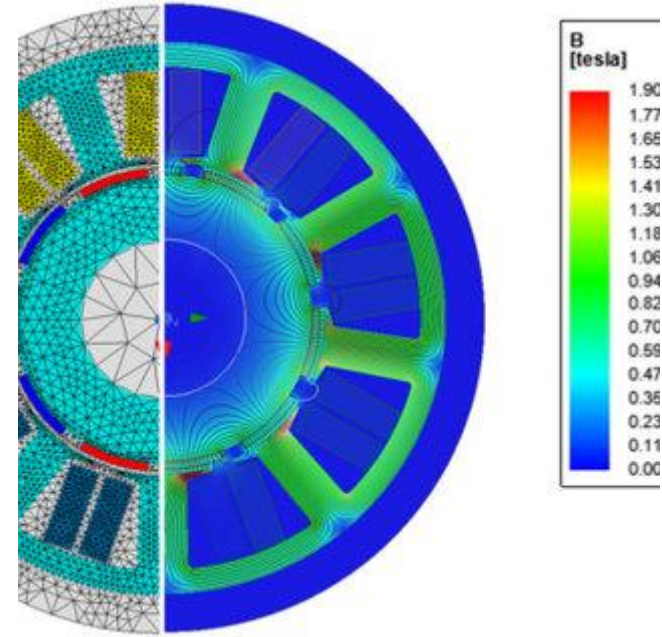
$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{159154,9 \frac{A}{m} \cdot 0,24m}{250} = 152,78A$$



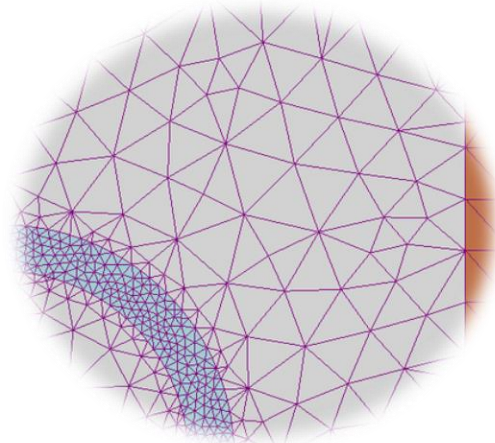
- Adatok:
- $I = ?$
- $N = 250$
- $B_{max} = 0,2T$
- $\mu_v = 2000$
- $A = 4cm^2$

Végeselem szimuláció

- Az elektromos és mágneses terek viselkedését a Maxwell egyenletek írják le:
 - Ezek megoldása valós esetekben „kézzel, papíron” nem kivitelezhető
 - Nemlineáris egyenletek (pl.: BH-karakterisztika)
- Végeselem szimuláció:
 - A geometriát véges számú elemre bontják (síkbeli problémáknál például háromszögekre vagy négyszögekre, térbeli esetben esetleg hasábokra vagy tetraéderekre)
 - Azokon a részen, ahol a megoldás szempontjából kritikus lehet az eredmény, ott a háló „finomsága” sűrűbb, ahol pedig a változások várhatóan kisebb mértékűek lesznek, ott nagyobb méretű elemeket választanak



$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}$$

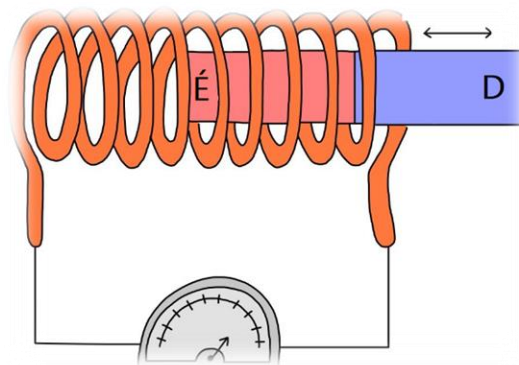
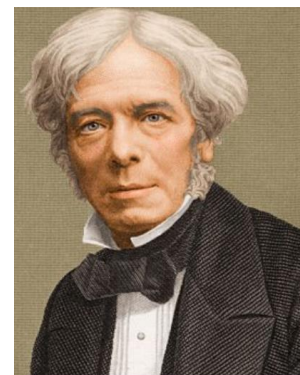


Elektromágneses indukció

- A mágneses mezőben lezajló változásokkal kapcsolatos jelenségeket elektromágneses indukciónak nevezzük. Ennek vizsgálata Faraday nevéhez fűződik (1831)

$$u_i = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

- Az indukált feszültség iránya mindig olyan, hogy akadályozza az őt létrehozó mozgást változást (Lenz törvénye)
- Az elektromágneses indukciónak több megjelenési formája is létezik
 - Mozgási indukció
 - Nyugalmi indukció
 - Önindukció
 - Kölcsönös indukció



Mozgási indukció (generátor elv)

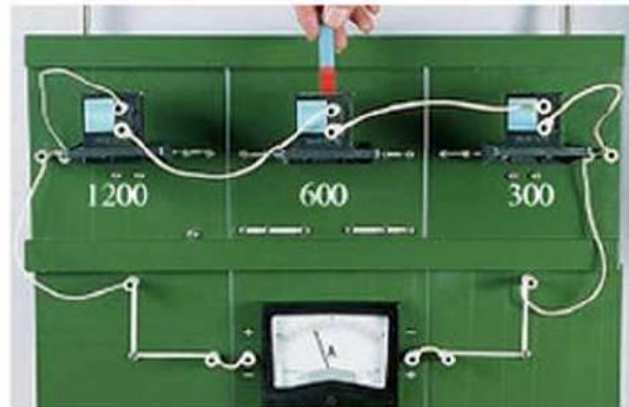
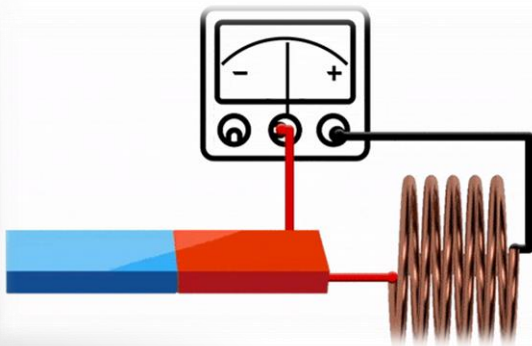
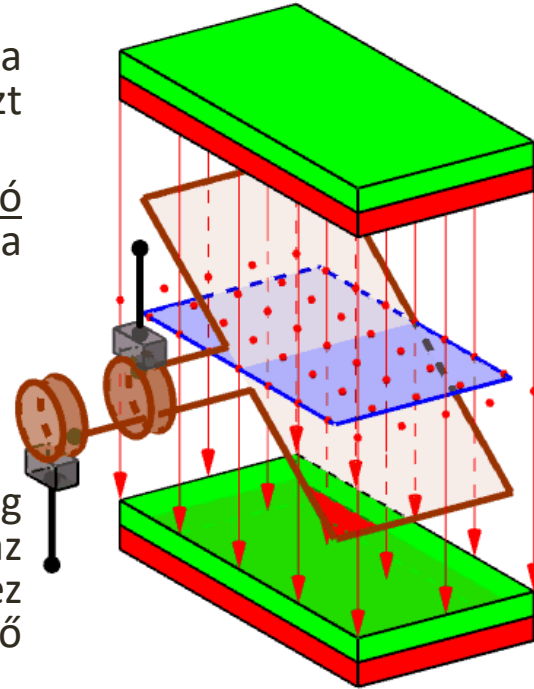
- Kísérlettel igazolható, ha valamely vezető a mágneses tér erővonalait metszi, a két vége közt feszültség indukálódik
- Az indukált feszültség nagysága függ az indukció nagyságától, a vezetőkeret hosszától, illetve a mozgás sebességétől

$$U_i = Blv$$

- Tekercsek esetén:

$$U_i = NBlv$$

- A korábbiakból megállapítva az indukált feszültség akkor a maximális ha a vezető merőleges az indukcióvonalakra (kék téglalap), amennyiben ez nem így van csak a merőleges irányba eső komponensét kell figyelembe venni!



Nyugalmi indukció

- Nyugalmi indukcióról beszélünk, ha a feszültséget létrehozó elemek (tekercs vagy mágnes) nem mozognak, e helyett a fluxus (áram) változik
- Két rendszer csatolásban van ha egyikből energia vihető át a másikba, vagyis az egyik által keltett indukcióvonalak áthaladnak a másik tekercsen is
- A tekercsek között tehát definiálható egy csatolási tényező, mely megadja az kölcsönhatás mértékét
- A második tekercsben keletkező indukált feszültség:

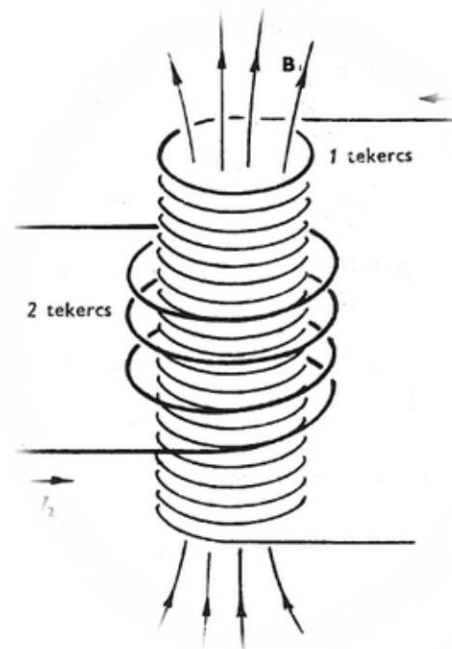
$$u_2 = M \frac{dI}{dt},$$

ahol M a kölcsönös induktivitás

- M függ a csatolási tényezőtől és tekercsek induktivitásától.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

- A gyakorlatban a csatolás mindig egynél kisebb, ezzel a szórt mennyiségeket vesszük figyelembe

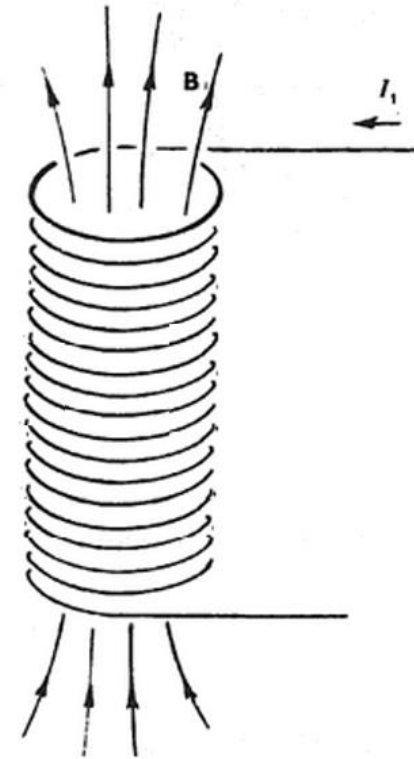


Önindukció

- Ha változik a tekercs árama (fluxusa), benne feszültség indukálódik. Természetesen ez fordítva is igaz!
- Korábban megállapítottuk, hogy tekercsek esetén az indukált feszültség arányos a tekercs menetszámával és a fluxus megváltozásával

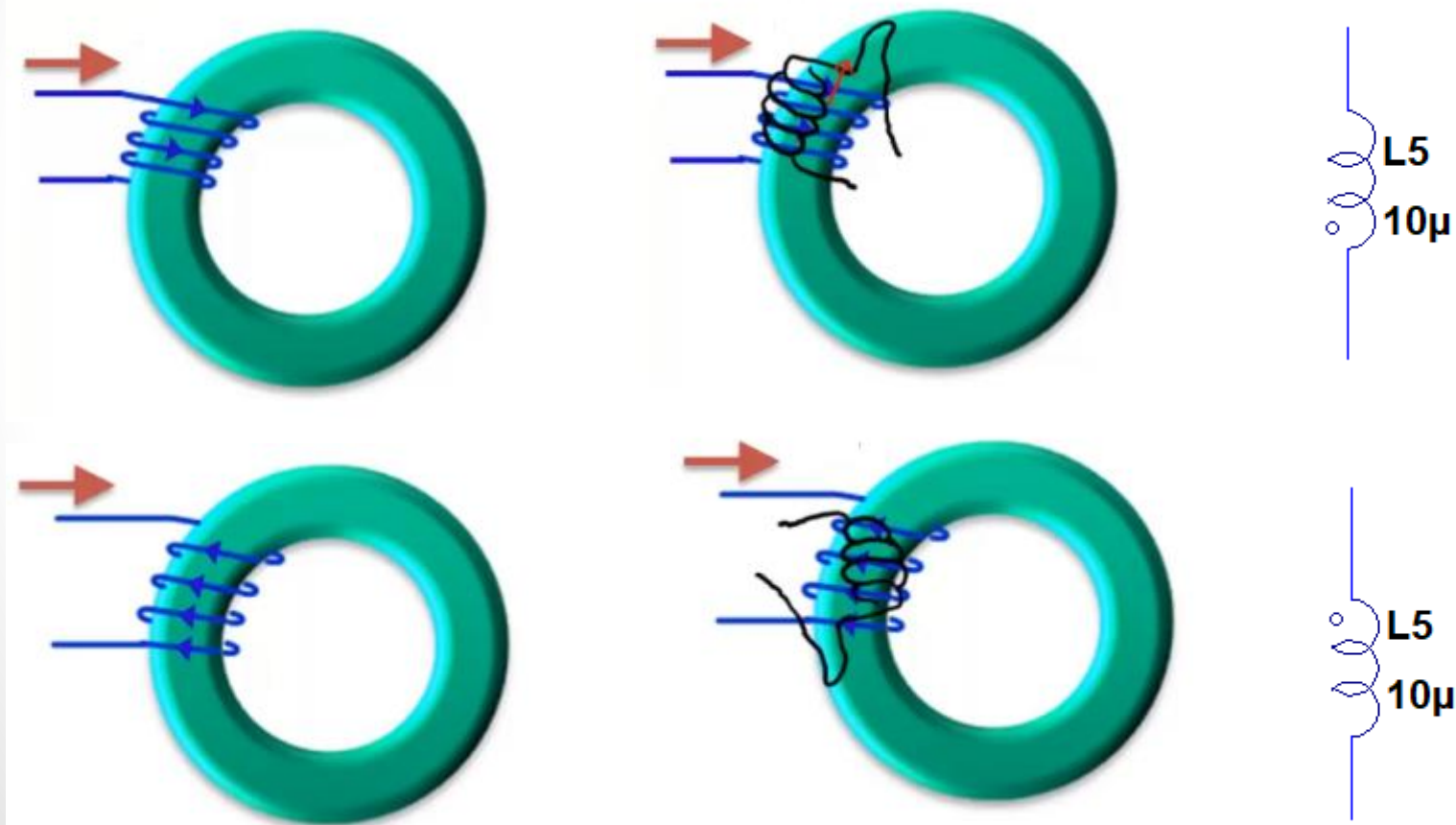
$$u_i = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$
$$u_i = -N \frac{N}{R_m} \frac{di(t)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

- L – a tekercs öninduktivitása, vagy önindukciós tényező, mértékegysége [H] (Henry)
- 1H az induktivitása annak a tekercsnek, amelyben 1V feszültség indukálódik akkor, ha az áramváltozás 1A 1s időtartam alatt.
- A valóságban az önindukciós feszültség a névleges sokszorosa is lehet (pl.: gyújtótranszformátor)

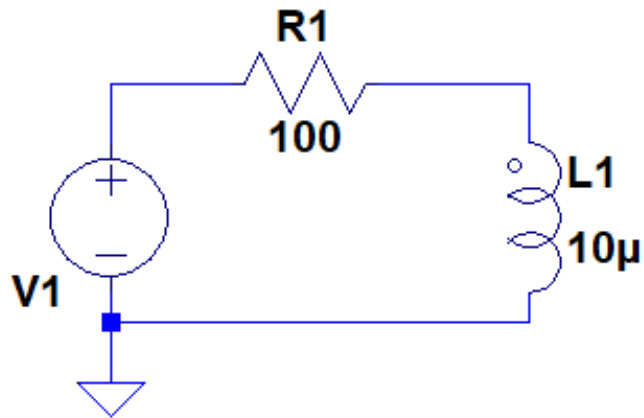


Önindukció

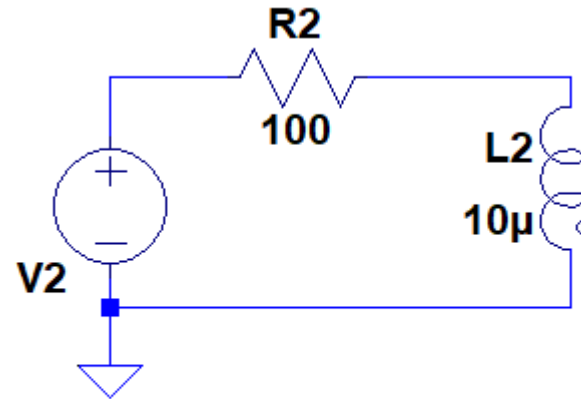
A mágneses tér a tekercselésnek megfelelően kétféle irányt is felvehet



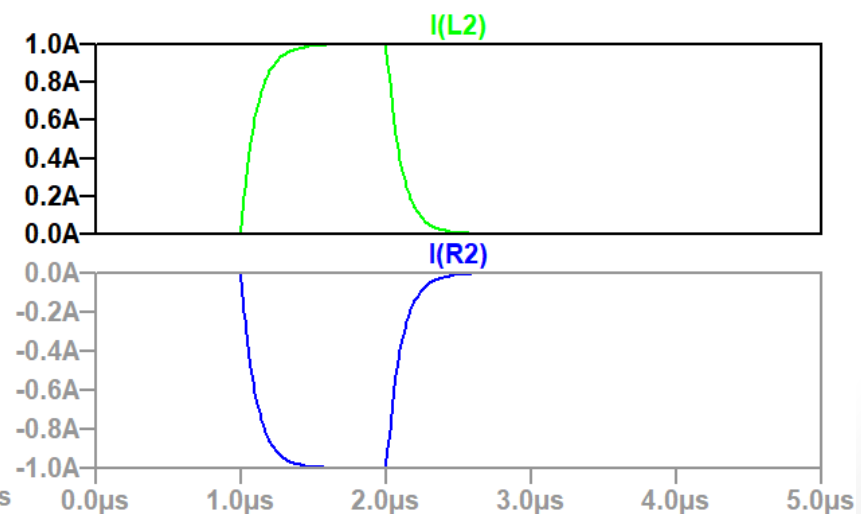
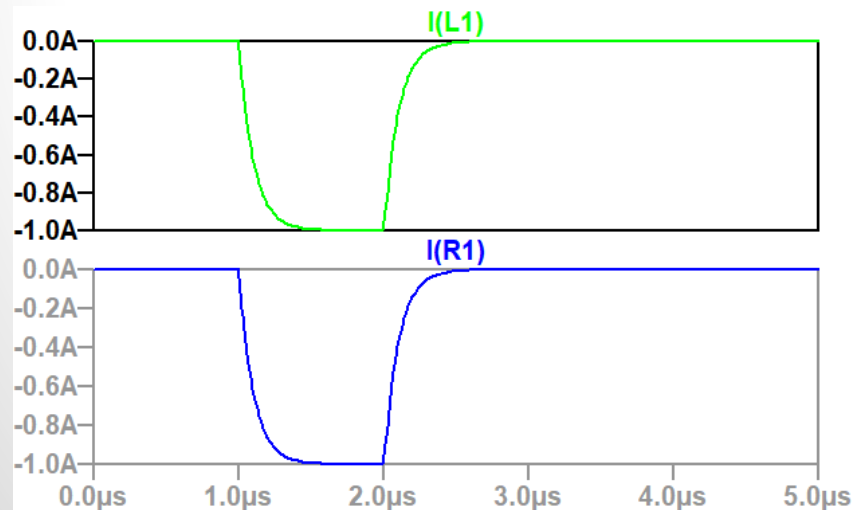
Önindukció



PULSE(0 100 10u 1n 1n 1u 20u 1)

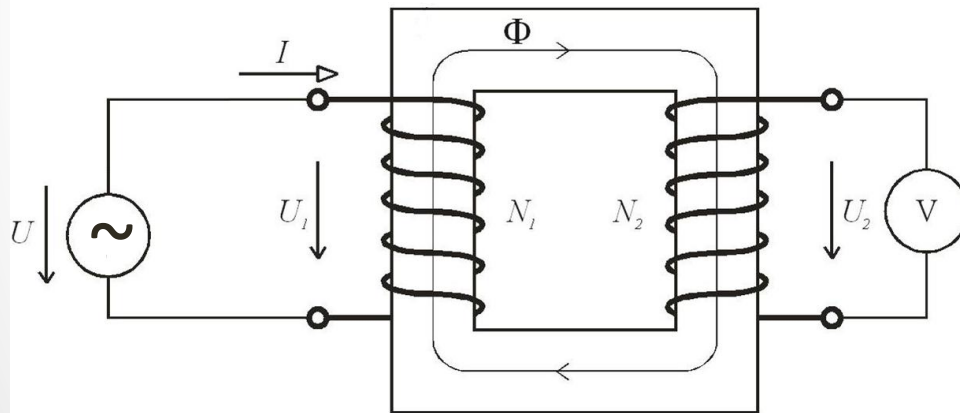


PULSE(0 100 10u 1n 1n 1u 20u 1)



Transzformátor elv

- Kísérlettel megállapítható, hogy egy váltakozó áramú tekercs közelébe helyezett másik tekercsben feszültség (áram) indukálódik (nyugalmi indukció). Utóbbi tekercsben erősebb lesz az indukált áram, ha közös vasmagon helyezük el.
- A közös vasmagot és a rajta lévő két tekercset együttesen transzformátornak nevezzük.



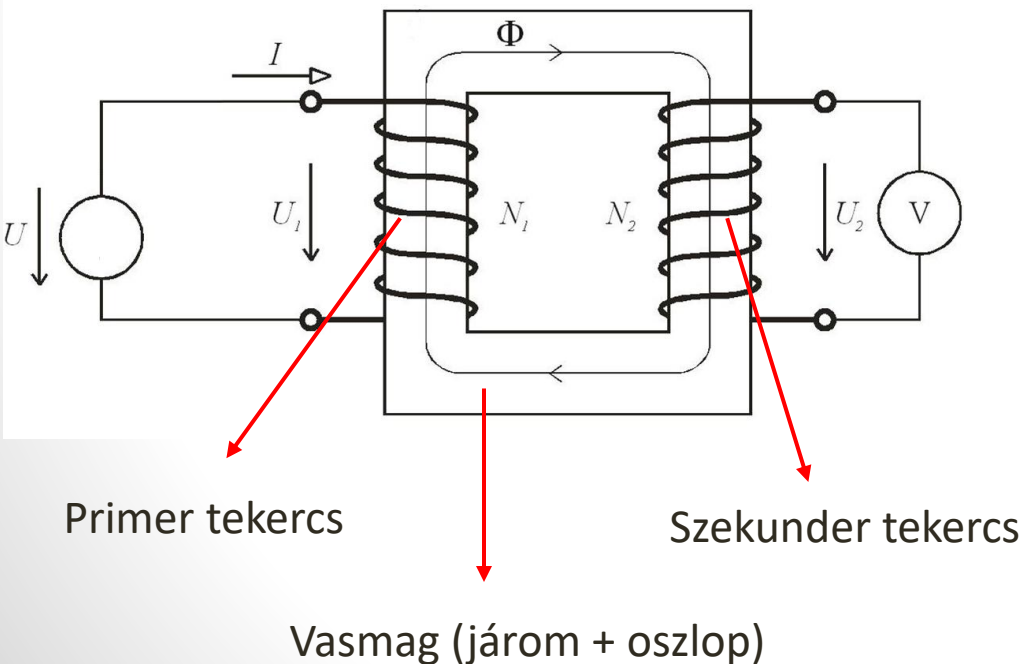
Rajzjel:



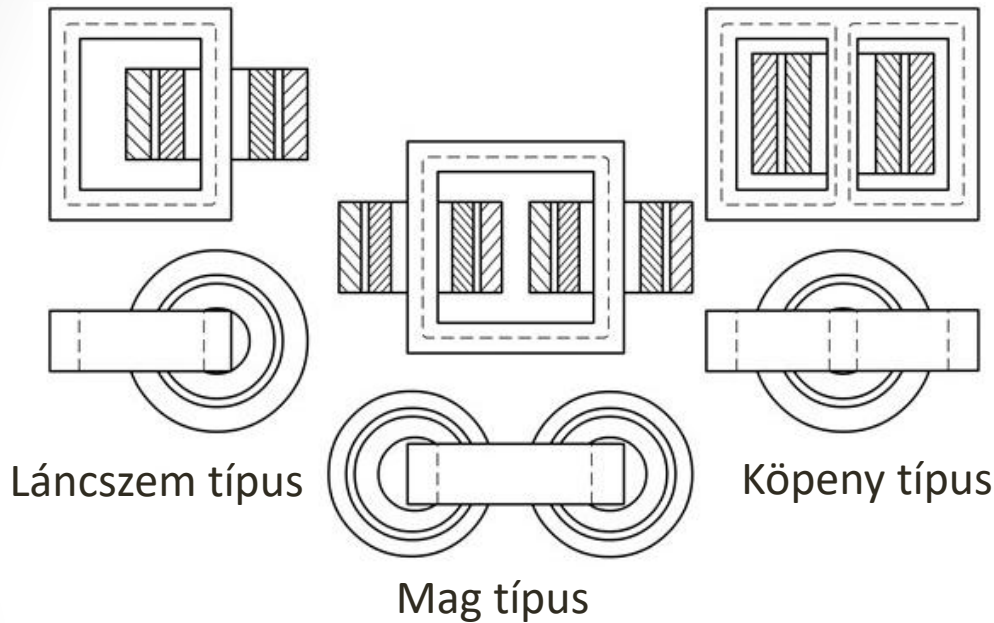
- $u_1(t) = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt}$
- $u_2(t) = N_2 \frac{d\phi(t)}{dt}$

Transzformátor (felépítés)

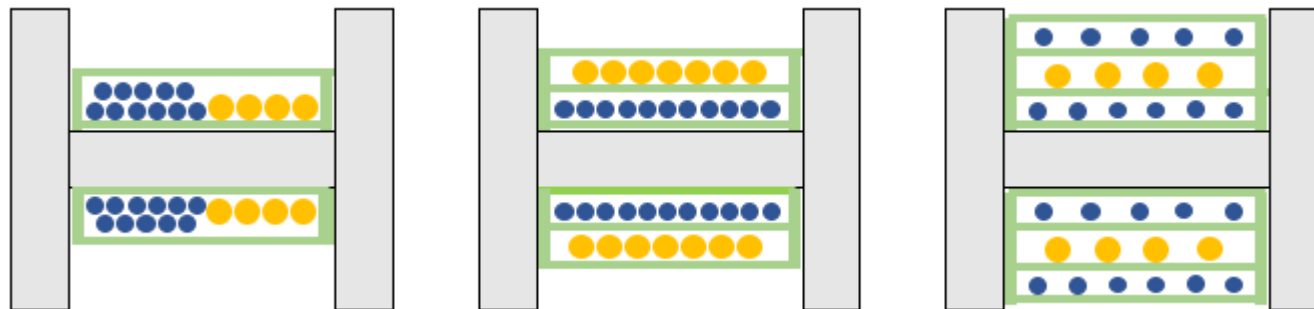
- A transzformátor a nyugalmi indukció elvén működő villamos gép, mely adott váltakozó feszültségű és áramú villamos teljesítményt más váltakozó feszültségű és áramú villamos teljesítménnyé alakít át
- Hatásfoka 95-99% (veszteségeket lásd később)
- Részei:



Transzformátor kialakítási lehetőségek, csatolás



Toroid

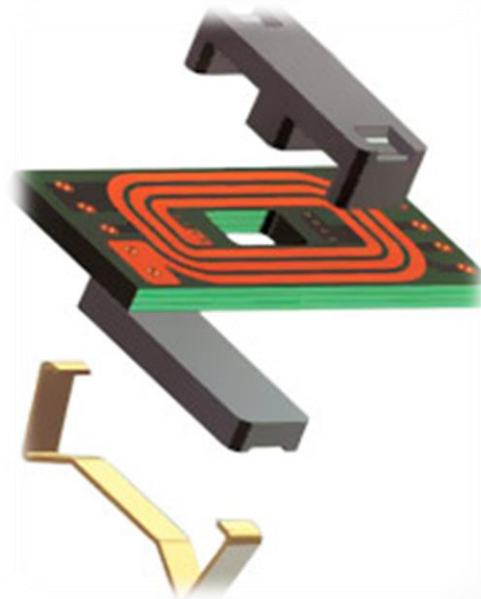
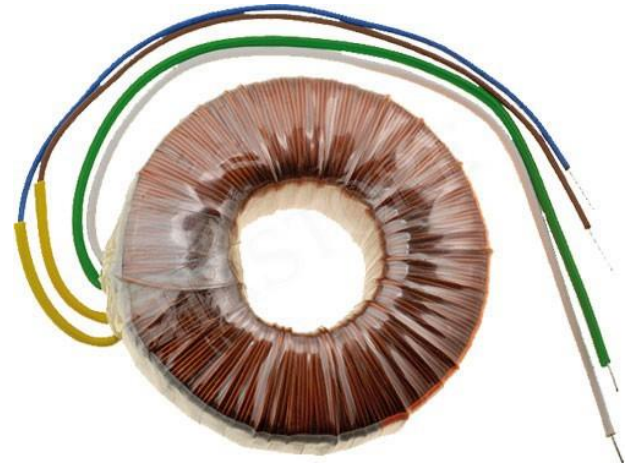


Laza csatolás

Szoros csatolás

Nagyon szoros csatolás

Transzformátorok a gyakorlatban



Transzformátor (működés)

- Vezessünk a primer tekercsbe váltakozó feszültséget. A korábbiaknak megfelelően ez változó fluxust hoz létre a vasmagban:

$$u_p(t) = N_p \frac{d\phi(t)}{dt}$$

- A változó fluxus hatására a szekunder tekercsben feszültség indukálódik, vagyis:

$$u_{sz}(t) = N_{sz} \frac{d\phi(t)}{dt}$$

- A szórásoktól eltekintve mindkét tekercs fluxusa ugyanaz, vagyis:

$$\frac{U_p}{U_{sz}} = \frac{N_p}{N_{sz}} = a \longrightarrow \text{Áttétel}$$

$$P_p = P_{sz}$$

$$U_p I_p = U_{sz} I_{sz}$$

$$\frac{U_p}{U_{sz}} = \frac{I_{sz}}{I_p}$$

- Megállapítások:

- A menetszámok egyenesen arányosak a feszültségek arányával
- A feszültség (menetszám) fordítottan arányos az áramerősséggel. Ha például a primer oldalon nagyobb a feszültség, ahhoz kisebb áram tartozik, a szekunder oldalon pedig fordítva, mivel $P_p = P_{sze}$
- A transzformátor egyenáramról nem működik (az indukciót térben nem csak időben változik)!!

Szinuszos gerjesztés

- A legtöbb villamos gép a hálózatról működik: A gerjesztő mennyiségek (feszültség, fluxus) szinuszosan változnak

$$\Phi(t) = \Phi_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

- A Faraday törvény értelmében az N menetes tekercs indukált feszültsége:

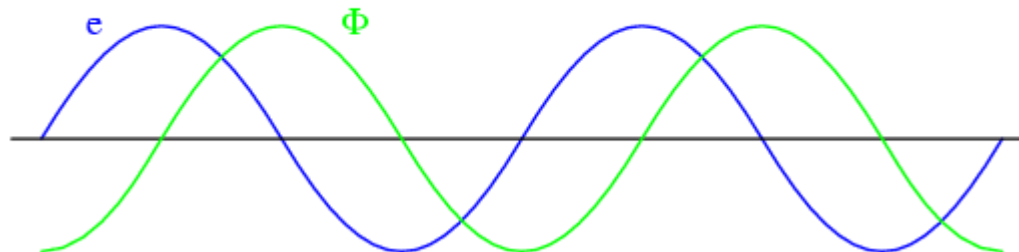
$$u(t) = N \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{d(\Phi_{max} \cdot \sin(\omega t))}{dt} = \underbrace{N\omega \Phi_{max}}_{U_{max}} \cos(\omega t)$$

- Megállapítható, ha a fluxus szinuszosan változik, a feszültség koszinuszosan (90°-ot siet a fluxushoz képest)

$$U_{RMS} = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega \Phi_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{N2\omega\pi f \Phi_{max}}{\sqrt{2}} = 4,44fN\Phi_{max}$$

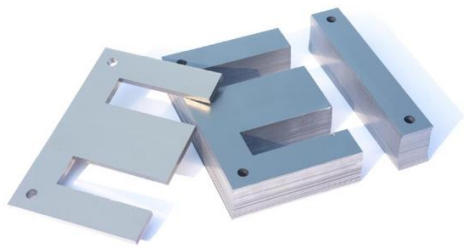
e = voltage

Φ = magnetic flux



Transzformátor vasmag kialakítási lehetőségek

LEMEZELT VASMAG
(LAMINATED CORE)



VAS ALAPÚ
AMORF MAGOK



POR MAGOK
(POWDER CORE)



KERÁMIA
MAGOK (FERRIT)



FREKVENCIA



Three-phase 200-V, 5-kVA,
50-Hz Transformer

Single-phase, 250-V, 5-kVA,
20-kHz Transformer

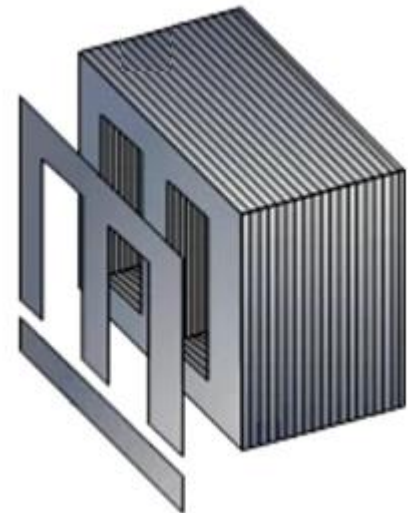
Lemezelt vasmag

- A hálózati frekvencia miatt ez a legelterjedtebb magtípus



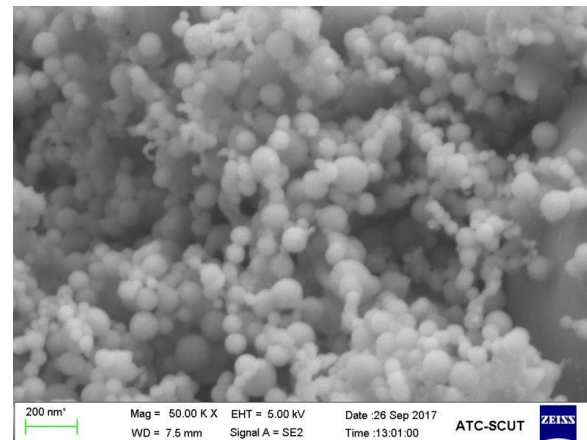
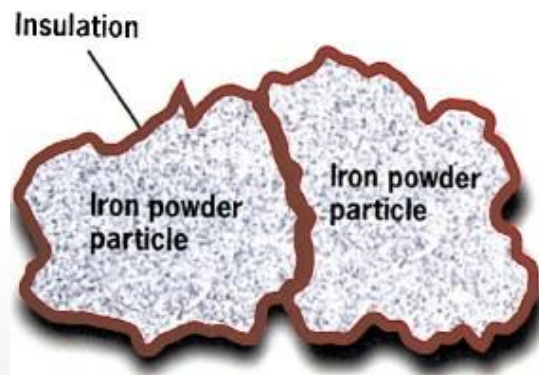
Így tehát jellemzően 50/60Hz-en alkalmazzuk, illetve alacsonyabb felharmonikusok esetén (néhány kHz)

- Két típust különböztetünk meg:
 - Szemcse orientál (Grain oriented) (alacsonyabb veszteség)
 - Nem szemcse orientált (Non grain oriented)
- Előnyök:
 - Viszonylag olcsó
 - Hegeszthető
 - 1,5 – 1,8T közötti maximális indukció (relatíve nagy)
 - Stabil a hőmérséklet függése
- Hátrányok:
 - Tömbösítés (lemezelés miatt)
 - Veszteségek (W/kg)
 - Zaj
 - Limitált frekvencia



Porvasmagok

- Jellemzően magasabb frekvenciákra: Alapharmonikus kb. 10kHz-ig, felharmonikus kb. 50kHz-ig
- Technikai kivitele:
 - A vas maganyagot porrá őrlik, majd a szemcséket oxidálják. Az így kapott port kötőanyaggal keverik és nagy erővel formába tömörítik (a kötőanyag szigetelési funkciókat is ellát)
 - Az így kapott maganyag sokkal kisebb veszteségekkel rendelkezik, mint a „hagyományos” transzformátor lemezek
 - Minél kisebb a szemcse, annál jobb a veszteségi értékük
 - Ugyanakkor a szemcsék közötti hézag/rés befolyásolja a permeabilitást. Minél kisebb a hézag, annál „tömörebb” az vas, annál nagyobb a permeabilitása (μ_r)
 - Gyakran hivatkoznak rá „elosztott légréses” vasmagként (*distributed air gap core*)
 - Az „elosztott” légrés miatt később kerülnek telítésbe (ld. későbbi dia)
- A piacon rengeteg porvasmag típus rendelkezésre áll, különböző márkanevek alatt.

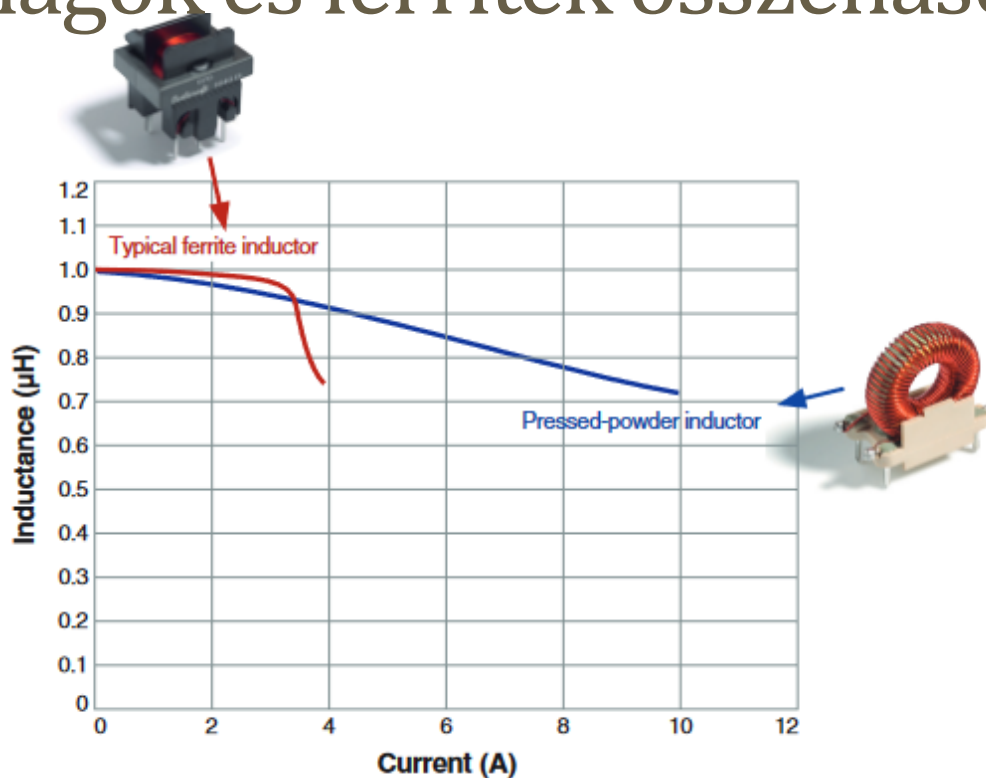


Ferritek

- A ferritek polikristályos kerámiák, melyek vas-oxidból állnak. Ehhez oxidokat vagy karbonátokat kevernek hozzá:
 - mangán (Mn)
 - nikkel (Ni)
 - cink (Zn)
- Az anyagokat préselik, majd kiégetik
- A fémek oxidjait (azaz a fénoxidokat) kerámiának nevezik, innen név
- Előnyök:
 - A legtöbb kerámia nagy ellenállású szigetelő, ami csökkenti az örvényáramokat
 - Nagy permeabilitással rendelkeznek (tipikusan $\mu_r=40\ldots10000$)
- Hátrány:
 - Kis mágneses indukció (jellemzően $< 0,5T$)
 - Könnyen törnek
- Magasfrekvenciás alkalmazás esetén (jellemzően RF (kHz és MHz-es tartomány), mivel a vesztesége magasabb frekvencián relatíve alacsony
- Tipikusan kapcsolóüzemű tápegységek nagyfrekvenciás transzformátoraihoz, szűrő és hangoló tekercsekhez használatos, jellemzően a teljesítményelektronikában



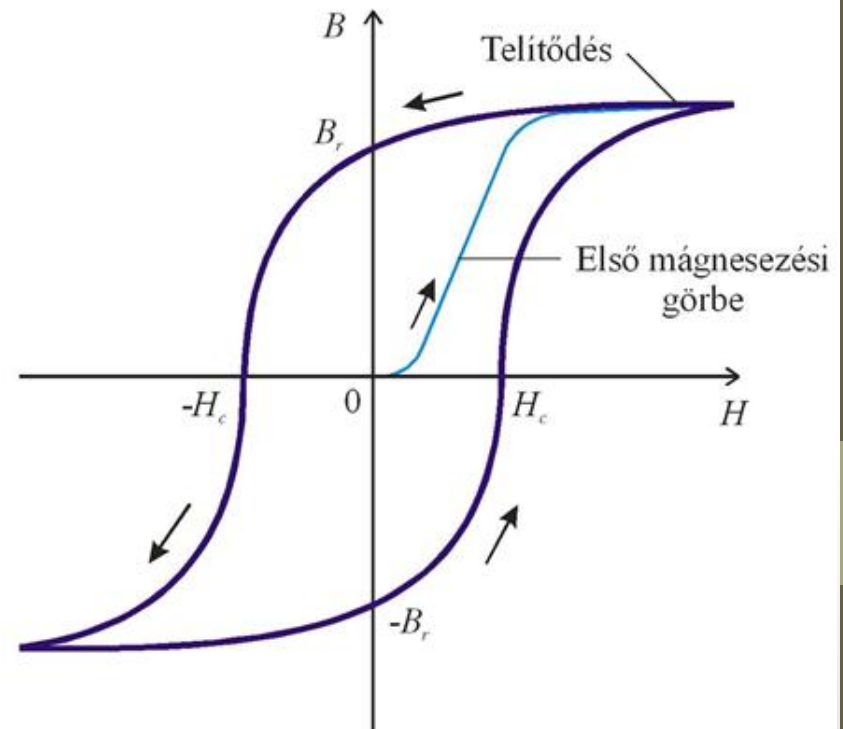
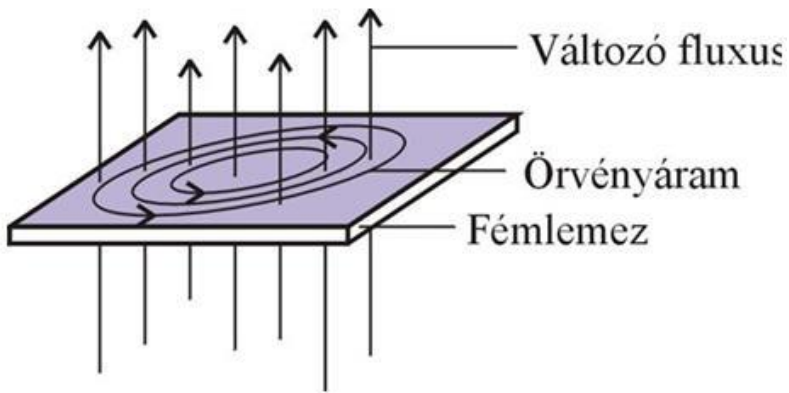
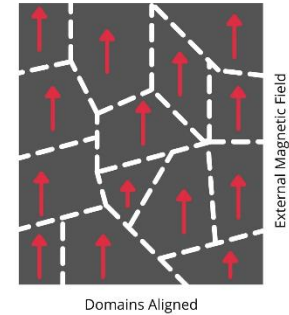
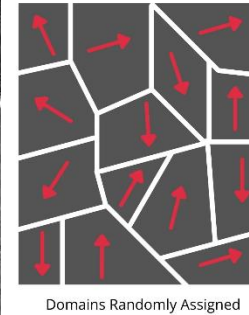
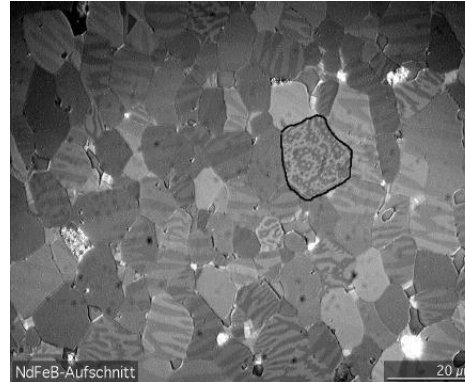
Porvasmagok és ferritek összehasonlítása



Porvasmag	Tulajdonság	Ferrit
Viszonylag alacsony	Permeabilitás (μ_r)	Viszonylag magas
Viszonylag nagy magveszteség nagy fluxussűrűség esetén	Magveszteség (P_v)	Viszonylag alacsony magveszteség nagy fluxussűrűség esetén
Lágy telítési jellemzők (soft saturation)	Egyéb	Törékeny (pl.: sarkok)

Vasmag veszteségei

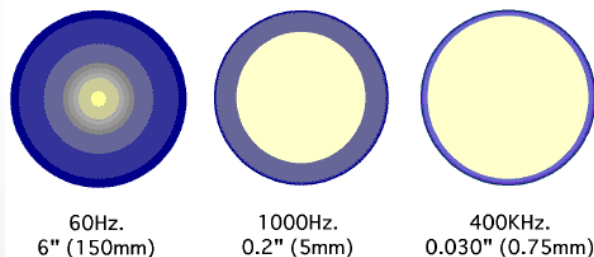
- Domének
- BH görbe
 - A vasanyag viselkedését mutatja be a mágneses térben
- Szűzgörbe
- B_r – Remanens mágnesesség
- H_c – Koercitív térerősség
- Örvényáram csökkenetése
- $P_{Vas} = P_{hiszt} + P_{\text{örvény}}$



Tekercselő anyagok

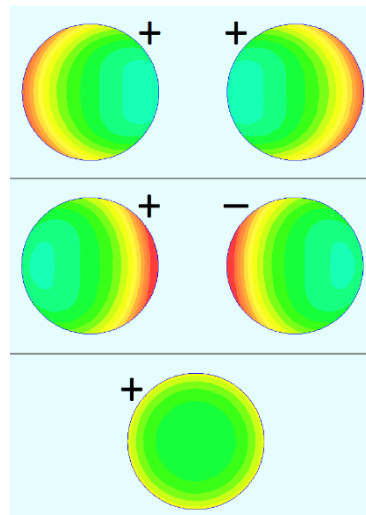
- A tekercselés fontos paramétere az áramsűrűség, mely a tekercselő huzal keresztmetszeti paraméterével van szoros összefüggésben
- Tervezés során jó kiindulóérték lehet a $3 - 5 \text{ A/mm}^2$ (alkalmazástól függ)
- A tekercselés további fontos jellemzője a DC ellenállás, mely tipikusan $\text{m}\Omega$ nagyságrendű (négypontos ellenállásmérés, $\text{m}\Omega$ mérter)
- Magasabb frekvencián a mágneskörben található vezető nem vezet teljes keresztmetszetében:

Szkinhatás



Frekvencia	Behatolási mélység		
	Acél	Réz	Ön
50 Hz	1,00 mm	9,30 mm	24,00 mm
150 kHz	0,22 mm	0,17 mm	0,44 mm
30 MHz	41,00 μm	12,00 μm	31,00 μm
1 GHz	7,10 μm	2,10 μm	5,40 μm

Közelségi hatás



Tekercselő anyagok



Litze-huzal



Alumínium



Kör keresztmetszetű réz huzal



Lapos rézhuzal