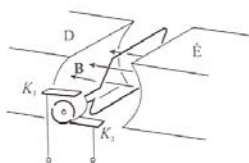


## 19. AZ INDUKCIÓ ÉS AZ ÁRAM MÁGNESES HATÁSÁNAK NÉHÁNY ELEKTROTECHNIKAI ALKALMAZÁSA

Az elektromágneses indukció jelenségének és az áram mágneses hatásának sokféle technikai alkalmazása között fontos helyet foglalnak el az elektromos gépek (pl. a generátorok, a motorok, a transzformátorok), valamint az elektrotechnikai eszközök (pl. a mikrofon, a hangszóró, a lemezjátszó, a magnetofon). E gépek és eszközök működésének fizikai alapjait lényegében véve már az előzőekben megismertük. A konstrukciójukkal és működésükkel kapcsolatos kérdések részletesebb vizsgálata pedig az elektrotechnika körébe tartozik. Fontosságukra való tekintettel azonban néhány alkalmazási típusal - ha vázlatosan is, de - az alábbiakban megismerkedünk.

### 19.1. Elektromos generátorok és motorok

- (a) Egyenáramú generátorok és motorok
- (b) Váltakozó áramú generátorok; a háromfázisú áram
- (c) Váltakozó áramú motorok; a forgó mágneses tér



19-1. ábra

#### (a) Egyenáramú generátorok és motorok.

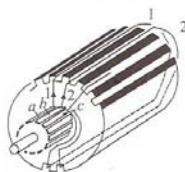
(i) *Egyenáramú generátorok.* A 15.2.(b) pontban láttuk, hogy homogén mágneses térben forgó zárt drótkeretben váltakozó áram keletkezik, amelyet felhasználhatunk, ha a keretet egy helyen felmetsszük, és két végét egy-egy fémgyűrű és kefe közvetítésével a fogyasztóba vezetjük. Ez a váltakozó áramú generátor működésének alapelve. Ha a fenti módon kapott váltakozó áram „egyenirányításáról” gondoskodunk, akkor egyenáramú generátort kapunk.

Egyenirányításra a mágneses térben forgatott lapos tekeres forgástengelyére szerelt, egymástól elszigetelt két félhenger - a *kommutátor* - szolgálhat. A  $K_1$  és  $K_2$  keféket (19-1. ábra) úgy állítják be, hogy azok, amikor az áram iránya megfordulna - tehát a keret síkjának a  $B$  indukcióvonalakra merőleges helyzetében (semleges zóna) - a kommutátor egyik szeletéről a másikra jussanak. Ily módon lüktető egyenáramot kapunk. Ez az erős lüktetés

csökkenthető, ha több, megfelelően elhelyezett tekercset és több szegmensből álló kommutátort alkalmazunk.

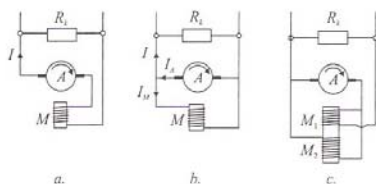
Az egyenáramú generátor fő részei: a mágneses teret keltő *mezőmágnes*; a mágneses térben forgatott tekercsrendszer - az *armatúra* -, amelyben az áram indukálódik; az egyenirányítást végző *kommutátor*; a kommutátor szegmenseivel érintkező *kefék*. A mezőmágnes az egyenáramú gép állórésze (sztátor), az armatúra a forgórész (rotor).

Az *armatúra* tekercsrendszerén áthaladó indukciófluxus növelése érdekében a lehető legjobban meg kell közelíteni a zárt mágneses kört, és ezért a tekercseket megfelelő vasmagon kell elhelyezni. Az ún. *dobarmatúra* vasmagja henger alakú test, amelyet az örvényáramok csökkentése végett egymástól pl. lakkréteggel elszigetelt, vékony dinamóvas korongokból állítanak össze. A tekercseket a henger alkotói mentén kiképezett vágatokba, hornyokba ágyazzák. Az ún. „hurkos tekercselés” esetében a kiindulásul választott 1 tekercs egyik vége pl. az *a* kommutátorszegmenshez, másik vége a szomszédos *b* szegmenshez csatlakozik; ebből indul ki a 2 tekercs, amely a *c* szegmensben végződik stb. (19-2. ábra), a tekercsek tehát sorba vannak kapcsolva. Emiatt az armatúra forgatásakor az 1, 2, ... tekercsekben indukált feszültségek összegződnek. Nagyobb számú tekercssel szinte teljesen „sima” (nem „lököttes”) feszültség érhető el.



19-2. ábra

A *mezőmágnes* nagyobb teljesítményű generátorokban mindig elektromágnes, amelynek tekercsét kezdetben külön áramforrásból táplálták. Ilyen *külső gerjesztésű generátorok* helyett ma már az *öngerjesztő generátorokat* vagy *dinamógépeket* alkalmaznak, amelyek a mágnesező áramot saját maguk állítják elő. JEDLIK ÁNYOS magyar fizikus jutott először arra a gondolatra, hogy a generátor elektromágnesét is maga a generátor táplálja (1861: *öngerjesztés elve*, vagy *dinamóelv*). Az elektromágnes vasmagjának ugyanis mindig van csekély remanens mágneses indukciója ( $B_0$ ), amelynek folytán a forgásba hozott armatúra tekercsében kis feszültség, illetve (zárt áramkör esetén) áram indukálódik. Ha ezt a gyenge áramot a megfelelő irányban átvezetjük a mezőmágnes tekercsein is, a mezőmágnesnek így megnövekedett indukciója már erősebb áramot kelt, amely tovább növeli az indukciót stb.: a mezőmágnes  $B$  indukciója és a keletkezett  $I$  áram kölcsönösen erősítik egymást bizonyos határig. Ez a határ - még a vasmag mágneses telítettsége előtt - azért alakul ki, mert  $I$  növekedésével  $B$  egyre lassabban nő.



19-3. ábra

A mezőmágneset gerjesztő tekercs és az armatúra kapcsolása szerint háromféle dinamógépet különböztethetünk meg: a *főáramkörü* (*soros gerjesztésű*) dinamót (19-3.a. ábra), a *mellékáramkörü* (*párhuzamos gerjesztésű* vagy *sönt-*) dinamót (19-3.b. ábra) és a *vegyes* vagy *kettős gerjesztésű* dinamót (19-3.c. ábra). Ezeket a generátorokat - tulajdonságaikat figyelembe véve - különböző területeken alkalmazzák.



JEDLIK ÁNYOS ISTVÁN (1800-1895), magyar fizikus, bencés szerzetes. A pesti Tudományegyetem professzora.

Érdeklődésének középpontjában elsősorban az elektromos kísérletek állottak. Különösen két találmánya biztosít számára maradandó emléket a nagy magyar fizikus felfedezők sorában. Az 1827-1828-as években létrehozta az első elektromágneses motort („villamdelejes forgonyok”). Jedlik a tervei alapján készített dinamógéphez egy használati utasítást mellékel, amelyben világosan leírta a dinamo vagy öngerjesztés elvét (1861). Sajnos, felfedezéseit szélesebb körben nem publikálta, így történhetett, hogy Siemens 1867-ben a berlini akadémia elé terjesztette a dinamoelvet, mit sem tudva Jedlik felfedezéséről.

(ii) *Egyenáramú motorok.* Az egyenáramú generátorok nyugalomban lévő armatúrája forgásba jön, ha a gép két sarkára - a fogyasztó helyett - megfelelő feszültségű áramforrást kapcsolunk. Ekkor a gép elektromos energiát alakít át mechanikai munkává, tehát mint *elektromotor* működik. Az elektromotor működési elvét a 8.5.(c) pontban már lényegében megismertük.

A mágneses térben forgó armatúrában - Lenz szabálya szerint - a motorra kapcsolt  $V$  feszültséggel ellentétes értelmű  $V_1$  feszültség indukálódik. Ezért - ha az egyszerűség kedvéért feltesszük, hogy a mezőmágnes permanens mágnes, és az armatúra  $R$  ellenállása mellett az áramkör többi részének ellenállása elhanyagolható - az armatúrában átmenő áram intenzitása:  $I = (V - V_1) / R$ . Mivel  $V_1$  értéke a fordulatszámmal nő, nagyobb fordulatszám, azaz kisebb terhelés mellett  $I$  kisebb lesz, vagyis a motor áramfelvétele automatikusan alkalmazkodik a külső terheléshez.

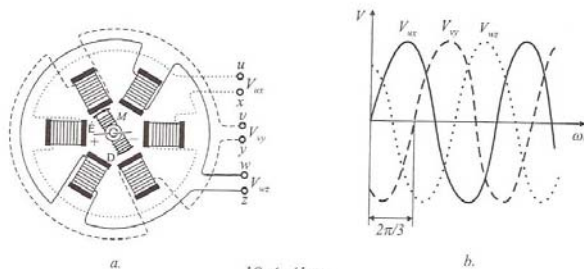
A *főáramkörü* vagy *soros motoroknak* mind a gerjesztőtekercsén, mind a forgórészén azonos áram folyik, így a keletkező nyomaték az áramerősség négyzetével arányos. A nagy indítónyomaték miatt főként az elektromos vontatásban alkalmazzák.

A *mellékáramkörü* vagy *söntmotor* elektromágneses közel állandó feszültséget kap, fordulatszámra változó terhelés esetén is közel állandó. Főleg szerszámgépekben alkalmazzák.

A *kettős gerjesztésű motor* egyesíti a fő- és mellékáramkörü motor előnyeit: nagy erővel indít, nagy nyomatéka van, közel állandó a fordulatszáma. Az ilyen motorokat főleg vontatásra (pl. trolibusz) használják.

(b) **Váltakozó áramú generátorok; a háromfázisú áram.** A váltakozó áramú generátorok közül az egyfázisú generátor működésének alapelvét már a 15.2.(b) pontban megismertük. A 15-5. ábrának megfelelő felépítésű, vagyis az áramot permanens mágnes pólusai közt lévő vasmagos tekercs forgatásakor fejlesztő kis generátortípus még ma is használatos, mint „telefoninduktor”, a kerékpárdinamóban és a „csipogó” zseblámpában viszont a tekercs helyett a permanens mágnes forog.

A nagy teljesítményű generátorokban a mágneses teret keltő elektromágnes vagy mezőmágnes a forgórész (rotor), az ezt körülvevő lemezelt vastestű csévelt tekercsekből álló armatúra az állórész (sztátor). A mezőmágnes tekercsei a gerjesztő egyenáramot külső áramforrásból, illetve a rotor tengelyéhez kapcsolt dinamóból kapják a csúszógyűrűkkel érintkező keféken át. A sorba kapcsolt armatúratekercsek közül két szomszédosnak a csévlési iránya ellentétes lévén, egy adott pillanatban mindegyik tekercsben azonos fázisú feszültség indukálódik, és így a fogyasztóval összekötendő végek közötti feszültség az egyes feszültségek összege. A váltakozó feszültségnek vagy áramnak egy teljes periódusa  $p$  póluspár esetén  $1/p$  fordulat során jön létre. Előírt  $\nu$  frekvenciájú váltóáram előállítására a rotort szigorúan rögzített „szinkron fordulatszámmal” ( $n=\nu/p$ ) kell járatni.



19-4. ábra

(i) A 19-4.a. ábra egy háromfázisú generátor modelljét szemlélteti. A mágneses teret keltő  $M$  elektromágnes forgatásakor az állórészen - az ábrán látható módon - elhelyezkedő, három egymástól független tekercspár végei között ( $u-x$ ,  $v-y$ ,  $w-z$ ), három egymástól páronként  $120^\circ$ -kal különböző fázisú váltakozó feszültség indukálódik (19-4.b. ábra):

$$V_{ux} = V_m \sin \alpha, \quad (19-1)$$

$$V_{vy} = V_m \sin(\alpha - 120^\circ), \quad (19-2)$$

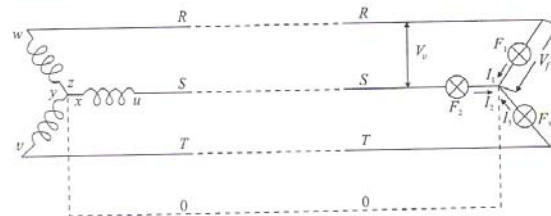
$$V_{wz} = V_m \sin(\alpha - 240^\circ). \quad (19-3)$$

A generátor három fázistekercsének alkalmas összekapcsolása esetén **háromfázisú áramrendszerrel**, vagy rövidebben **háromfázisú áramról** beszélünk. A fázistekercsek összekap-

csolásának egyik módja - a generátorban - a *csillagkapcsolás*, amely a tekercsek  $x, y, z$  végeit a közös „csillagpontban” egyesíti (19-5. ábra bal oldala). Így az energiát a fogyasztóhoz négy vezeték továbbítja; a szabad végekhez csatlakozó három *fázisvezeték* ( $R, S, T$ ) és a rendszerint földelt, vékonyabb *nullvezeték* ( $0$ ). A generátor zárt áramkörében - ha nincs külső terhelés - nem folyik áram, mert a fenti feszültségek összege minden pillanatban nulla. A generátor csillagkapcsolásának megfelelő, általánosan elterjedt négyvezetékű háromfázisú rendszer esetében a fogyasztó számára kétféle feszültség áll rendelkezésre: a valamelyik fázisvezeték és a nullvezeték közötti *fázisfeszültség* ( $V_f \equiv V_{R0}, V_{S0}, V_{T0}$ ), és a bármely két fázisvezeték közötti *vonalfeszültség* ( $V_v \equiv V_{RS}, V_{ST}, V_{RT}$ ). A vonal- és fázisfeszültségek közötti kapcsolatot keresve, a 19-5. ábra és a (19-1)-(19-2) összefüggések figyelembevételével azt írhatjuk, hogy

$$\begin{aligned} V_{RS} &= V_{R0} - V_{S0} = V_m \sin \omega t - V_m \sin(\omega t - 120^\circ) = \\ &= 2V_m \sin 60^\circ \cos(\omega t - 60^\circ) = \sqrt{3}V_m \cos(\omega t - 60^\circ) . \end{aligned} \quad (19-4)$$

A nyert eredmény azt jelenti, hogy a vonalfeszültség effektív értéke  $\sqrt{3}$ -szor nagyobb a fázisfeszültség effektív értékénél. Ha pl.  $V_{f,eff} = 220$  V - a szokásos világítási feszültség -, akkor  $V_{v,eff} = 380$  V. Megjegyezzük, hogy rendszerint erre a feszültségre méretezik pl. a háromfázisú motorokat.



19-5. ábra

(ii) A három fázisvezeték mindegyike és a nullvezeték közé egy-egy fogyasztót kapcsolva ( $F_1, F_2, F_3$ , l. 19-5. ábra jobb oldalán), a nullvezetékben folyó áram, a csomóponttörvény szerint, minden pillanatban a fogyasztókon átmenő  $I_1, I_2, I_3$  áramok összege. Ha a három fogyasztó váltakozó áramú ellenállása egyenlő, akkor e szimmetrikus terhelés mellett  $I_1, I_2, I_3$  csúcsértékei egyenlők, így a nullvezetékben folyó áram erőssége, az

$$I_m \sin \omega t + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) + I_m \sin(\omega t - 240^\circ) = 0 \quad (19-5)$$

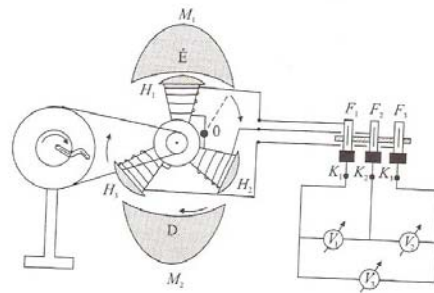
miatt, minden pillanatban nulla. Szimmetrikus terhelésnél tehát a nullvezeték fölösleges (a három fogyasztó megfelelő sarkai természetesen egyesítendők, illetve földelendők). Fogyasztók csillagkapcsolása (19-5. ábra jobb oldala) esetén tehát az egy-egy fogyasztóra eső

$V_{f,eff}$  fázisfeszültség  $\sqrt{3}$ -ad része a  $V_{v,eff}$  vonalfeszültségnek, a fogyasztón átmenő  $I_{f,eff}$  fázisáram pedig egyenlő az  $I_{v,eff}$  vonalárammal:

$$V_{f,eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{v,eff}, \quad (19-6)$$

és

$$I_{f,eff} = I_{v,eff}. \quad (19-7)$$



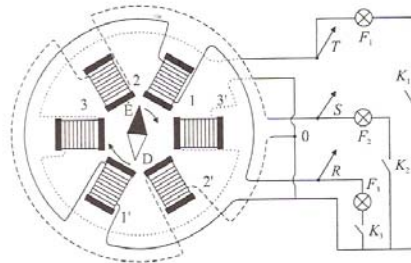
19-6. ábra

(iii) A 19-6. ábrán látható egyszerű - demonstrációs célra készült - kísérleti elrendezés lehetővé teszi, hogy háromfázisú áramot állítsunk elő, illetve hogy a keletkező három, egymástól  $120^\circ$ -kal különböző fázisú indukált feszültséget kimutassunk. Az  $M_1$  és  $M_2$  mágnespólusok között forgatott  $H_1$ ,  $H_2$  és  $H_3$  vasmagon lévő tekercsek egy-egy végét közösítjük (0), a fennmaradó három véget ( $R, S, T$ ) pedig az  $F_1, F_2$  és  $F_3$  fémgyűrűk és a  $K_1, K_2$  és  $K_3$  szénkefék közvetítésével a  $V_1, V_2$  és  $V_3$  feszültségmérőkhöz kötjük. A voltmérők mutatói - az egyes időpillanatokban - egymástól különböző „fázisban eltérő” feszültségértékeket jeleznek.

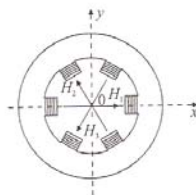
(c) Váltakozó áramú motorok; a forgó mágneses tér.

(i) *Forgó mágneses tér.* Helyezzünk el a 19-7. ábra szerint három egyforma elektromágnes-póluspárt úgy, hogy tengelyeik  $120^\circ$ -os szöggel következzenek egymás után, és bo-csássunk a tekercsekbe háromfázisú áramot, pl. csillagkapcsolásban oly módon, hogy a tekercsek 1', 2', 3' végeit egyesítjük az  $O$  pontban, az 1, 2, 3 végeket pedig a háromfázisú hálózat  $R, S, T$  vezetékjeihez kapcsoljuk. Ha a mágnespólusok közé mágnesűt helyezünk, a tű gyors forgásba jön. Ennek az az oka, hogy az  $\omega$  körfrekvenciájú háromfázisú árammal táplált tekercsek együttesen olyan mágneses mezőt létesítenek, amelynek állandó nagyságú  $\mathbf{H}$  tércrösszvektora vagy  $\mathbf{B}$  indukcióvektora  $\omega$  szögsebességgel forog az ábra síkjára me-

rölezes tengely körül. Ezt könnyen beláthatjuk pl. oly módon, hogy kiszámítjuk a három egyforma tekercspár által létesített



19-7. ábra



19-8. ábra

$$H_1 = H_m \sin \omega t, \quad (19-8)$$

$$H_2 = H_m \sin (\omega t - 120^\circ), \quad (19-9)$$

$$H_3 = H_m \sin (\omega t - 240^\circ) \quad (19-10)$$

télerősségek  $x$  és  $y$  tengely menti  $H_x$  és  $H_y$  komponenseit (19-8. ábra). A  $H_1$ ,  $H_2$  és  $H_3$  télerősségek  $x$ . illetve  $y$  tengelyre vonatkozó komponenseinek összege:

$$H_x = H_m \sin \omega t + H_m \sin (\omega t - 120^\circ) \cos 120^\circ + H_m \sin (\omega t - 240^\circ) \cos 240^\circ, \quad (19-11)$$

illetve

$$H_y = H_m \sin (\omega t - 120^\circ) \sin 120^\circ + H_m \sin (\omega t - 240^\circ) \sin 240^\circ. \quad (19-12)$$

Megfelelő átalakítások után azt kapjuk, hogy

$$H_x = \frac{3}{2} H_m \sin \omega t. \quad (19-13)$$

illetve

$$H_y = \frac{3}{2} H_m \cos \omega t. \quad (19-14)$$

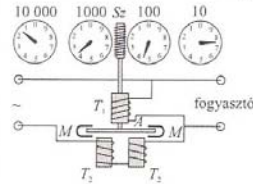
Ezek eredője - a mechanikából jól ismert rezgésösszetevés szerint - egy  $(3/2)H_m$  nagyságú,  $\omega$  szögsebességgel forgó vektor. A fenti bizonyítás arra is utal, hogy forgó mágneses tér keletkezik akkor is, ha csak két egyforma, egymásra merőleges  $x$  és  $y$  tengelyű póluspárt alkalmazunk, és ezek tekercseibe egyenlő effektív erősségű, de  $90^\circ$ -kal különböző fázisú váltóáramot - kétfázisú áramot - bocsátunk. A 19-7. ábrán vázolt kísérleti elrendezéssel a mágnesű akkor is forgásba hozható, ha a háromfázisú áramnak csak két „fázisát” kapcsoljuk be (a  $K_1$  és  $K_2$  kapcsoló van zárva, az  $F_1$  és  $F_2$  izzólámpa világít); csak „egy fázis” bekapcsolása (csak  $K_1$  kapcsoló van zárva, és  $F_1$  lámpa világít) esetén azonban a mágnesű nem forog.

(ii) *Váltakozó áramú motorok.* A forgó mágneses tér indukciós hatásán alapulnak az *aszinkron* vagy *indukciós motorok*. Ha tengelyre szerelt fémhengert forgó mágneses térbe helyezünk (a 19-7. ábrán vázolt kísérleti elrendezésben a mágnesű helyébe egy alumíniumhengert teszünk), akkor a henger forgásba jön, mert benne indukálódott örvényáramok Lenz törvénye szerint a henger és a forgó mágneses tér kölcsönös helyzetének változását akadályozni igyekeznek, vagyis az örvényáramokra a mágneses térben ható erők a hengert a mágneses tér forgásának irányában elforgatják.

A háromfázisú aszinkron motorok állórészének tekercselése megegyezik a háromfázisú generátoréval. Az ebbe a tekercsrendszerbe megfelelően bevezetett háromfázisú áram hozza létre a forgó mágneses teret. Ebben a térben a motor forgórésze, a *rotor* forgásba jön, fokozatosan felgyorsul, de fordulatszáma a forgó mágneses mezőt nem érheti el. Ha ugyanis a rotor ezt a „szinkron fordulatszámot” elérné, azaz a forgó mágneses térhez képest nyugalomban lenne, benne áram nem indukálódna, és így a motor még a legcsekélyebb súrlódás legyőzéséhez szükséges forgatónyomatékokat sem tudná kifejteni. A súrlódás és a külső terhelés folytán tehát a motor fordulatszáma kisebb a szinkron fordulatszámnál, innen van az *aszinkron* elnevezés. Növekvő terheléssel a fordulatszám csökken, az indukált áramok nőnek, mindaddig, amíg az emiatt megnövekedett forgatónyomaték a munkavégzésre elegendő nem lesz. Az ilyen, ún. *rövidre zárt* vagy *kalitkás forgórésztű aszinkron motor* igen egyszerű szerkezete, nagy indítónyomatéka és a terheléstől alig függő fordulatszáma miatt a legelterjedtebb elektromos gépek egyike.

A szinkronmotorok fő jellemzője, hogy fordulatszámukat ( $n$ ) a hálózati frekvencia ( $\nu$ ) és a gép póluspárjainak száma ( $p$ ) határozza meg:  $n = \nu/p$ . Felépítésük megfelel a szinkron-generátorokénak - minden, akár egyfázisú, akár háromfázisú generátor motorként is használható -, tehát a nagyobb motorok a mezőmágnes gerjesztésére külön egyenáramforrást igényelnek. A szinkronmotor az áram bekapcsolásakor nem indul meg, hanem „felpörgetéssel” megfelelő szögsebességű forgásba kell hozni, a méretezettől nagyobb terhelés esetében pedig kiesik a szinkronfordulattól és megáll.

Az indukciós fogyasztásmérő (energiaszámláló vagy „vilanyóra”; 19-9. ábra) sokmenetű  $T_1$  feszültségi tekercse és a fogyasztókkal sorosan kapcsolt  $T_2$  áramtekercse olyan mágneses teret létesít, amely a két vasmag közötti  $A$  alumíniumtárcsát a benne keletkező örvényáramok révén forgásba hozza. A tárcsa felgyorsulását a permanens



19-9. ábra

(19-8)

(19-9)

(19-10)

(19-11)

(19-12)

(19-13)

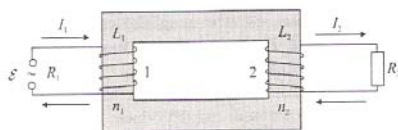
(19-14)



M „fémhátság” akadályozza meg örvényáramú csillapítás útján. Kimutatható, hogy a tárcsa fordulatainak száma arányos a fogyasztott elektromos energiával, s így ez az energia a forgó tárcsához kapcsolt  $S_z$  számlálószervezeten közvetlenül leolvasható.

## 19.2. A transzformátor

A váltakozó áram nagy előnye az egyenárammal szemben az, hogy feszültsége, illetve erőssége egyszerűen és csaknem tetszőleges arányban átalakítható egy olyan - *transzformátornak* nevezett - berendezés segítségével, amely általában közös vasmagra szerelt két tekercsből (az 1. primer és a 2. szekunder tekercsből) áll (19-10. ábra). A két tekercs közti induktív kapcsolat minél szorosabbá tétele érdekében a vasmag zárt mágneses kört alkot. Így a tekercsek áramai által keltett mágneses indukcióvonalak gyakorlatilag teljesen a vasmagban haladnak, a „mágneses szórás” igen csekély. Legyen a primer tekercs meneteinek száma  $n_1$ , a szekunder tekercs  $n_2$ , az 1. áramkörbe pedig legyen egy időben periodikusan változó  $\mathcal{E}$  elektromotoros erő ( $\mathcal{E} \sim e^{i\omega t}$ ) beiktatva.



19-10. ábra

(i) Mindenekelőtt határozzuk meg a transzformátor primer és szekunder tekercsében folyó  $I_1$  és  $I_2$  áramokat. A Kirchhoff-féle huroktörvény szerint a primer és a szekunder körre a következő összefüggéseket írhatjuk fel:

$$R_1 I_1 = \mathcal{E} - \frac{d\phi_1}{dt} \quad (19-15)$$

és

$$R_2 I_2 = - \frac{d\phi_2}{dt}, \quad (19-16)$$

ahol  $\phi_1$ , illetve  $\phi_2$  a primer, illetve a szekunder tekercs menetfelületein átmenő fluxusokat jelentik. Mivel feltételezzük, hogy nem lép fel „mágneses szórás”, ezért írhatjuk, hogy:

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (19-17)$$