

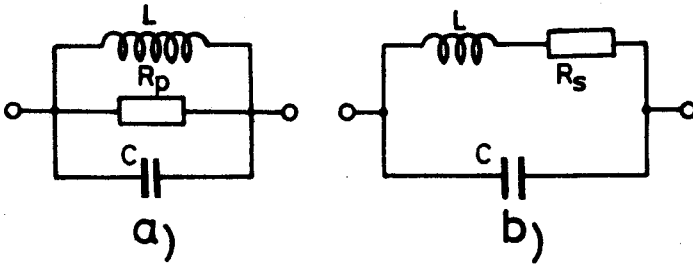
3. fejezet

INDUKCIÓS TEKERCSEK ÉS TRANSZFORMÁTOROK

A félvezető eszközök és az integrált áramkörök nagyarányú elterjedése gyökeres változást eredményezett az elektronikus áramkörök és berendezések tervezésében és kivitelezésében. A tekercset és transzformátorokat nagy terjedelmük és elég költséges előállításuk miatt egyremkább RC körök váltották fel, amelyeknek a súlya is lényegesen kisebb, mint az előbbieké. Kivételt képeznek az erősáramu berendezések, ahol a nagy teljesítmény miatt még igen gyakori elemek a különböző típusú transzformátorok és fojtótekercsek. Mi azonban csak olyan induktivitásokkal és transzformátorokkal foglalkozunk, amelyeket elsősorban a gyengeáramu műszertechnikában, valamint a rádió és erősítő berendezésekben használnak. Tárgyalásunk során azokat a fizikai alapfogalmakat, amelyek egyrészt a Kísérleti Fizika II. előadás, másrészt a számlási gyakorlatok tárgyát képezik, ismertnek tételezzük fel, így ezekkel külön nem foglalkozunk.

3-1. Veszteséges induktivitás

Az induktivitások általában huzalokból készített tekercsek, amelyek viselkedése eltér az ideálistól. Ennek okai a következők: a huzal véges ellenállása (rézvesztés), nagyfrekvencián a felületi (skin) hatás, a könyező fémtárgyakban indukció következtében fellépő veszteségek, a tekercstartó és a szigetelő dielektrikumában fellépő veszteségek és magafrekvenciáknál a sugárzási veszteségek. Vasmagos tekercsek esetében fellépnek még örvényáramu- és hiszterézisvesztés is. Mindezeket - hasonlóan a kondenzátorok veszteségeihez - a veszteségmentesnek tekintett L induktivitással sorbakapcsolódó R_s , vagy a vele párhuzamosan kapcsolódó R_p ellenállás felvételével vehetjük figyelembe. Sokszor a tekercs szórt- és menetkapacitása sem hanyagolható el, amelyet egyetlen párhuzamosan kapcsolt kondenzátorral helyettesíthetjük. A veszteséges induktivitás helyettesítő kapcsolása a 3-1. ábrán látható.



3-1. ábra

Tekerccsel megvalósított induktivitás helyettesítő kapcsolásai:
 a) párhuzamos, b) soros veszteségi ellenállással

A tekercs veszteségének jellemzésére a veszteségi tényezőt használjuk, amely a tekercs által felvett veszteségi teljesítménynek és a meddő teljesítménynek a hányadosa:

$$D = \frac{P_v}{P_m}$$

Ha első közelítésben a szórt- és menetkapacitástól eltekintünk, akkor a veszteségi tényező a párhuzamos kapcsolásból:

$$D = \frac{P_v}{P_m} = \frac{U^2/R_p}{U^2/\omega L} = \frac{\omega L}{R_p} \quad (3-1)$$

Hasonló módon a soros helyettesítő kapcsolásból:

$$D = \frac{I^2 R_s}{I^2 \omega L} = \frac{R_s}{\omega L} \quad (3-2)$$

A kondenzátoroknál tárgyaltakhoz hasonlóan a veszteségi tényező egyben tangense annak a veszteségi szögnek, amellyel az áram és a feszültségvektor közötti fázisszög 90°-nál kisebb. A jósági tényező (Q) a veszteségi tényező reciproka.

Mivel mindkét helyettesítő kapcsolás egy adott frekvenciatartományban a tulajdonképpeni veszteséges önindukciós tekercs helyett alkalmazható, ezért mind a soros, mind a párhuzamos kapcsolásnak egyenértékűnek kell lenni egymással. Q > 10 esetében bármelyik helyettesítő kapcsolással dolgozunk, az önindukciós együttható értéke 1%-on belül a

tényleges önindukciós együtthatónak felel meg, a soros és párhuzamos veszteségi ellenállás pedig egymásba könnyen átszámítható.

Nagyobb frekvenciákon, ahol a tekercs menetei és rétegei közötti kapacitás nem hanyagolható el, a párhuzamos helyettesítő kapcsolás alapján az R_p veszteségi ellenállással párhuzamosan kapcsolódó reaktancia hatása a következőképpen fejezhető ki:

$$X = j \omega L_\ell = j \omega L \frac{1}{1 - \omega^2 LC}$$

Amíg a nevező pozitív, vagyis

$$\omega^2 < \frac{1}{LC}$$

a reaktancia induktív jellegű, a tekercs látszólagos induktivitása (L_ℓ):

$$L_\ell = \frac{L}{1 - \omega^2 LC}$$

Az $\omega_0^2 = 1/LC$ frekvencián (rezonanciafrekvencia) a reaktanciafüggvénynek szakadása van. ω_0 -nál nagyobb frekvencián a tekercs elvesztí induktív jellegét.

Az elektronikában felhasznált tekercsek két csoportra oszthatók: légmagos tekercsekre és vasmagos tekercsekre (amelyek mágneses térében ferromágneses anyag van). Mivel mágneses szempontból a nem ferromágneses anyagok a levegőhöz hasonlóan viselkednek, ezért az ilyen tekercsek is légmagos tekercseknek szokták nevezni. A veszteségek csökkentése érdekében azonban ügyelni kell arra, hogy ne legyen fémes vezető anyag a mágneses térben és a szigetelő tartók is megfelelő tulajdonságúak legyenek.

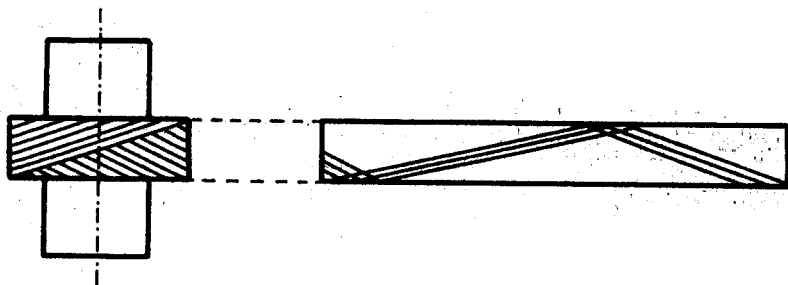
3-2. Légmagos tekercsek

Legegyszerűbb az egysoros tekercs felépítése. Készülhet tekercstest nélkül és tekercstesttel. A tekercstest nélküli tömör huzalból vagy csőből készül. A megfelelő merevség biztosítása az anyagvastagság helyes megválasztásával lehetséges. Többnyire a méter és deciméter hullám-

hosszu tartományban dolgozó adó- és vevőkészülékekben használják. A tekercsnek kicsi a szórt kapacitása és dielektromos vesztesége.

Tekercstest használata esetén annak anyagát különös gondal kell megválasztani. Legyen kicsi a hőtágulási együtthatója, hogy melegedés hatására ne változzon meg a tekercs mérete és ezzel induktivitása. A megfelelő tekercsjóság érdekében kicsinek kell lenni a dielektromos veszteségeknek is, így legkedvezőbbek a kerámiából, polisztirolból, akrilgyantából készült tekercstestek.

Egysoros tekercset $5-10\mu\text{H}$ önindukciós együttható alatt használnak. Nagyobb induktivitást kis méretek mellett többréteges tekercssel érhetünk el. A szórt kapacitások csökkentése és a kis méretek elérése érdekében legtöbbször kereszttekercselést alkalmazunk (3-2. ábra), mert az egymás melletti menetek között kicsi a feszültségkülönbség és keresztvezéskor a nagyobb potenciálkülönbségű huzalok csak egyetlen pontban érintik egymást. A kész tekercsetek legtöbbször impregnálják, amellyel egyrészt rögzítik a meneteket, másrészt védik a nedvességtől és növelik az átütési feszültséget.



3-2. ábra
Kereszttekercselés

Nagyfrekvenciás tekercseknél a skin-hatás okozta veszteség csökkentése érdekében gyakran használnak litze huzalt. A litze huzal $0.05...0.07$ mm átmérőjű szigetelt elemi szálaból főtt huzalköteg, amely a felhasználási területtől függően $10...100$ százból készül.

A légmagos tekercsek induktivitásának kiszámítására sok képlet áll rendelkezésre. Ezek elméleti megfontolások révén keletkeztek és $0,5...1\%$ pontosságúak. Mivel a tekercsek induktivitása a tekercsekhez tartozó mágneses terek alakjától függ, ezért általában komplikált összefüggések és grafikus segédeszközök szükségesek az induktivitás kiszámításához (grafikonok, görbék, nomogramok), amelyek számos irodalomban megtalálhatók: [2], [25], [28].

Példaként megadunk két egyszerűbb képletet, amelyek segítségével gyorsan és a gyakorlati igényeknek megfelelően lehet tekercset tervezni. A megépítés után ugyanis pontos beállítás szükséges.

Egysoros hengeres tekercs:

$$L = \frac{n^2 (D + d)}{b} \cdot 10^{-2} \mu\text{H} \quad (3-3)$$

Kereszttekercselésű tekercs:

$$L = \frac{(D + a)^2 n^2}{0,38 (D + d) + 1,15b + 1,25 a} \cdot 10^{-2} \mu\text{H} \quad (3-4)$$

ahol:

- L - az induktivitás értéke, μH ;
- D - a tekercs átmérője, cm;
- b - a tekercs hossza, cm;
- d - a felhasznált huzal átmérője (szigeteléssel együtt), cm;
- n - a menetszám;
- a - többretegű tekercsnél a tekercselés rész magassága a tartótest fölött, cm.

Az első képlet alapján meghatározott induktivitás értéke 1-1,5% pontosságu, a második képlet esetében, amely teljesen tapasztalati jellegű, 100 menetesnél nagyobb tekercseknél 5%-on belüli pontosságot érhetünk el.

3-3. Vasmagos tekercsek

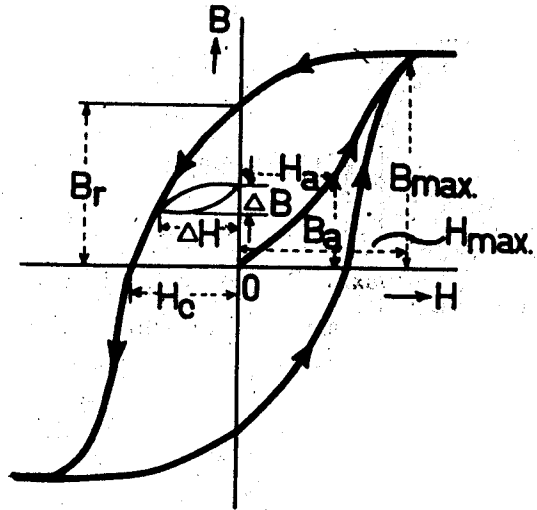
Nagy önindukciós egyúttartó tekercsek és transzformátorok gyártásánál ferromágneses anyagokból készített tekercsmagokat alkalmaznak. A mágneses anyagok részletesebb ismertetése előtt röviden összefoglaljuk azokat a fontosabb potenciometereket, amelyeket a mágneses hiszterézis görbe (3-3. ábra) alapján értelmezhetünk:

- H_c koercitiv erő az a fordított irányú térerősség, amely-nél a B indukció zérussá válik;
- B_r remanencia, a $H = 0$ helyen vett B érték;
- B_{max} telítési indukció, az indukció értéke telítésig mágnesezt anyagban;
- μ_k kezdeti permeabilitás, az anyag permeabilitása olyan kicsi térerősségnél, amely-nél a permeabilitás még függetlennek tekinthető a térerősségtől;
- μ_M maximális permeabilitás.

Az előzőekben felsorolt mágneses paramétereket zárt gyűrű alaku vasmagokon mérik.

A fentiekén kívül még ismernünk kell az anyag fajlagos egyenáramu ellenállását (ρ), valamint a Curie hőmérsékletet (T_C). (A ferromágneses anyagok a Curie pontnál magasabb hőmérsékleten elvesztik erős mágneses tulajdonságukat, paramágnesek lesznek. Vasnál $T_C = 769 \text{ }^\circ\text{C}$, nikkelnél $360 \text{ }^\circ\text{C}$).

A mágneses anyagokat a koercitív térerősség nagysága szerint két nagy csoportra osztjuk. Kemény mágneses anyagoknak, röviden mágneseknek nevezzük azokat, amelyeknél [34]



3-3. ábra
Hiszterézis görbe

$$H_c > 10 \frac{\text{kA}}{\text{m}} .$$

Ezeket állandó mágneses terek előállítására használják és a nagy koercitív erő mellett nagy remanenciával kell hogy rendelkezzenek. Lágy mágneses anyagoknak nevezzük azokat, amelyeknél

$$H_c < 300 \frac{\text{A}}{\text{m}} .$$

A két határ közötti tartományban levő anyagok alkalmazásuk szerint sorolhatók egyik vagy másik csoportba.

A lágy mágneses anyagok koercitív ereje kicsi, könnyen átmágnesezhetők, így váltakozó mágneses térben ezeket használják. Mivel az átmágnesezéshez munka kell, melynek nagysága arányos a hiszterézis görbe területével (hiszterézis-vesztés), ezért a kis koercitív erő mellett még kis remanenciára is törekednek.

A váltakozó mágneses tér örvényáramot indukál a ferromágneses anyagokban, amely szintén veszteséget jelent. A hiszterézis és örvényáram-vesztés együttesen vasvesztésnek nevezik.

A vasveszteség kiszámítása meglehetősen bonyolult feladat. A részletek mellőzésével csupán annyit említünk meg, hogy V térfogatu vasmagban a hiszterézis veszteségi teljesítmény lemezelt vasmag esetében

$$P_h \sim \frac{f B_M^3 V}{\mu_k^3}, \quad (3-5)$$

ahol B_M a maximális indukció, f a frekvencia; az örvényáram veszteségi teljesítménye pedig

$$P_\delta \sim \frac{f^2 B_M^2 d^2 V}{\varrho}, \quad (3-6)$$

ahol d a lemezvastagság, ϱ a lemez anyagának fajlagos ellenállása, B a lemez keresztmetszetén áthaladó indukció átlagértéke.

Az összefüggésekből jól látható, hogy a vasveszteség csökkentése érdekében lehetőleg vékony, nagy fajlagos ellenállású és kezdeti permeabilitású lemezeket kell használnunk. Nagy átmágnesezéseknel P_h a B_M^3 helyett csupán B_M^2 -tel arányos, míg P_δ -re a (3-6) összefüggés, a kísérleti tapasztalatok alapján, itt is jól alkalmazható.

A lágy mágneses anyagok lehetnek ötvözetek és vegyületek. Az ötvözetek alapját vas vagy nikkel képezi.

3-3.1. Ötvözött lágy mágneses anyagok

A legegyszerűbb lágy mágneses anyag a tiszta vas, amelynek azonban kicsi a fajlagos ellenállása (3-1. táblázat), ezért nagy az örvényáramu vesztesége. Az örvényáram-veszteséget egyrészt a vas fajlagos ellenállásának növelésével, másrészt lemezelt vasmagok készítésével csökkenthetjük.

Hálózati transzformátornál, hangfrekvenciás kimenő transzformátorknál és fojtótekerccsnél vas-szilícium ötvözetet használnak, maximálisan 4% Si tartalommal. A vas fajlagos ellenállása kb. hatszorosára nő az ötvözéssel, amellet az anyag mágneses tulajdonságai is javulnak. Jelentősen csökkenthető a vasveszteség anizotróp kristályszerkezet létrehozásával is. Ha az utolsó hengerlést hidegen végzik, a szemcsék a hengerlés irányába rendeződnek, ebben az irányban kisebb lesz a mágneses ellenállás, nő a permeabilitás. Fontos, hogy a mágneses tér iránya meg egyezzen a hengerlés irányával, ezért az előbbi eljárással készített vas-

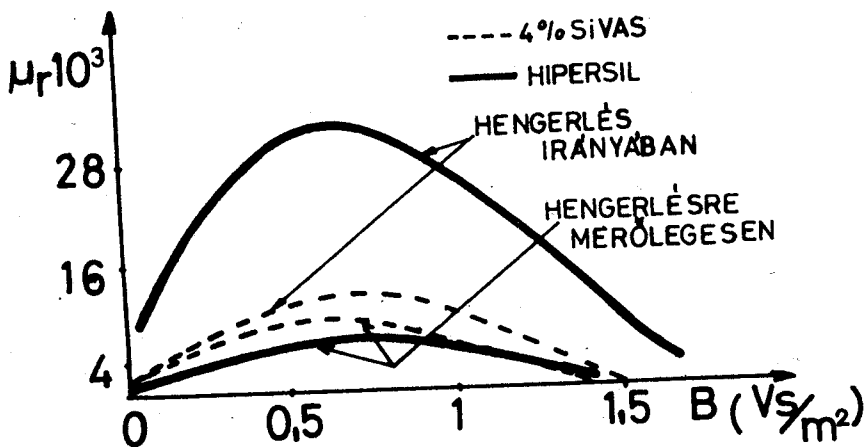
Lágymágneses anyagok főbb jellemzői

3-1. táblázat

Enevezés	Összetétel	μ_k	μ_M	H_c A/m	B_{max} Vs/m ²	B_r Vs/m ²	ρ $\mu\Omega\cdot m$	T_C °C
Svédvas	99,9Fe	200	5000	80	2,15	1,3	0,1	770
Nikkel	99 Ni	110	600	272	0,65	0,36	0,8	360
Si lemez	4 Si 96 Fe	400	7000	40	1,93	1,2	0,6	690
Hipersil lemez	3,6 Si 96,4Fe	1500	30000	12	1,9	-	0,5	
Permalloy A	78,5 Ni 21,5Fe	8500	100000	4	-	0,6	-	580
Permenorm 4801	48 Ni 52 Fe	2200	30000	12	1,5	0,8	0,55	440
Vacodur 16	16 Al 84 Fe	4000	40000	2-4	0,75		1,45	
Permalloy C	4 Mo 75 Ni 21 Fe	25000	80000	2-4	0,9		0,55	430
Supermalloy	5 Mo 79 Ni 16 Fe	100000	800000	0,32	0,8		0,6	
V permendur	2 V 49 Co 49 Fe	800	4500	160	2,3	1,4	0,3	980

magot - amely Hipersil néven került forgalomba - szalagból, tekercseléssel állítják elő.

A 3-4. ábrán látható a hidegen hengerelt Hipersil és a melegen hengerelt 4% Si tartalmu transzformátorlemezeknek a vákuumhoz viszonyított relatív permeabilitásának változása B függvényében, a hengerlési irányba eső és arra merőleges mágnesezésnél.



3-4. ábra

Hipersil- és transzformátorlemez relatív permeabilitása

Hangfrekvenciás, nagyjóságu tekercsek és transzformátorok gyártásához vas-nikkel ötvözeteket használnak. Legfontosabb ilyen ötvözet a Permalloy A, amely 78,5 s% nikkelt tartalmaz. Kezdeti és maximális permeabilitása nagy, koercitív ereje kicsi. Ezt a kiváló tulajdonságot csak igen gondos hőkezeléssel biztosíthatjuk.

A 3-1. táblázatban összefoglaltuk néhány, gyakrabban használt vas-mag-anyag összetételét és főbb mágneses paramétereit.

Ismételten hangsulyoznunk kell, hogy valamennyi közepes és nagy permeabilitásu anyag végleges mágneses tulajdonságait csak hosszadalmas és több részből álló hőkezelés után éri el [2], [18]. Külső mechanikai behatásra (nyomás, hajlítás, nyírás stb.) a mágneses jellemzők leromlanak, ezért a hőkezelés utolsó részét a végső lemezalak elérése után meg kell ismételni és a vasmag összeállításakor a lemezeket a lehető legkisebb mechanikai igénybevételnek szabad csak kitenni.

A szilícium ötvözetekből készített lemezek vastagsága 0.35...0,5 mm között van, míg a nikkelt tartalmu ötvözeteknél 0.02...0.35 mm vastag lemezekkel dolgoznak, hogy az örvényáram-veszteséget a lehető legkisebb értéken tartsák.

Tájékoztatásul közöljük, hogy a 4% Si tartalmu transzformátorlemez-nél a vasvesztés 0.35 mm lemezvastagság esetén 1.3 watt/kg, míg 0.5 mm lemezvastagság mellett 1.7 watt/kg 1 Vs/m² maximális induk-

ció mellett. 4% Si tartalmu anizotróp Fe-Si szalagnál már csak 0.5 watt/kg a veszteség. A Fe-Ni ötvözeteknél még kedvezőbb a helyzet, pl. Permalloy C esetében 0.5 Vs/m² indukció mellett a veszteség csupán 0.04 watt/kg.

Az örvényáram-veszteségek további csökkenése érhető el por alaku anyagokból készült vasmagok alkalmazásával, amelyek porvasmag néven ismeretesek. Erre a célra leggyakrabban por alaku permalloyt és vaskar-bonilból nyert vasszemcséket használnak. A szemcsék mérete 1...10 μ között van. A kapott port szigetelő- és kötőanyaggal keverik úgy, hogy a szigetelőanyag lehetőség szerint vékony réteget képezzen a szemcsék felületén. Ezáltal a szemcsék elektromosan nem érintkeznek egymással és az örvényáram-veszteség kis értéken marad. Az így nyert keverékből nagy nyomás alatt különböző alakumagokat préselnek és hőkezelik. Relatív permeabilitásuk 10...125 között van, és aránylag széles tartományban független a mágnesezéstől. Rádiófrekvenciás tekercsek gyártásánál alkalmazzák.

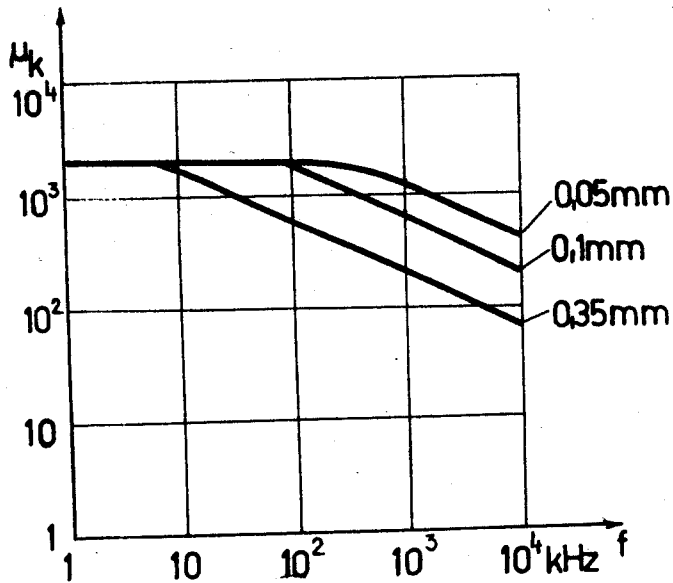
Az örvényáram kialakulása azonban nemcsak azzal a következménnyel jár, hogy a vasmagban veszteség keletkezik, hanem egy bizonyos határfrekvencia felett a vasmag hatásos permeabilitása és ezzel a tekercs induktivitása is csökken. Az örvényáram által keltett mágneses tér ugyanis ellene dolgozik az eredeti mágneses térnek, és ennek következtében megakadályozza, hogy az mélyen behatoljon az anyagba. Tehát a hatásos vaskeresztmetszet lecsökken. A 3-5. ábrán bemutatjuk egy adott kezdő permeabilitású anyag permeabilitásának frekvenciafüggését $d = 0.05, 0.1$ és 0.35 mm lemezzvastagságnál.

Végül meg kell még említenünk azt is, hogy ha vasmagos tekercsen keresztül szinusz alaku váltóáram folyik, akkor a hiszterézisgörbe következtében - a nem lineáris B-H összefüggés miatt - a tekercs sarkain fellépő feszültség nem lesz szinusz alaku. Torzitott feszültség keletkezik, amelynek alapfrekvenciája megegyezik a gerjesztő áram frekvenciájával. A felharmonikusok nagysága Fourier analízissel határozható meg.

A gyakorlatban sokszor előfordul, hogy egy transzformátor primer oldalán vagy egy indukciós tekercsen állandó előmágnesező egyenáram folyik keresztül és erre az egyenáramra szuperponálódik a váltóáram. Ekkor az előmágnesezési pontból kiindulva kis hiszterézishurok keletkezik (3-3. ábra). Ha ez a mellékhurok elég kicsi, akkor a két ága gyakorlatilag összességük és ennek hajlásszöge adja meg a reverzibilis permeabilitás értékét, amely mindig kisebb a kezdeti permeabilitásánál:

$$\mu_{\text{rev}} = \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_{H \rightarrow 0}.$$

Ilyen esetben a kezdeti permeabilitás helyett ez az érték szabja meg az alkalmazott tekercs induktivitását.



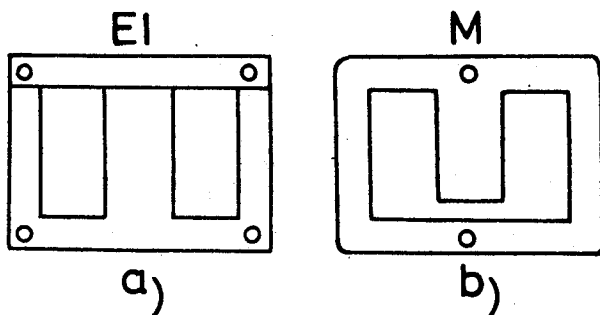
3-5. ábra

$\mu_k = 20000$ kezdő permeabilitásu anyag
relativ permeabilitásának frekvenciafüggése
d = 0,05; 0,1 és 0,35 mm lemeztvastagság esetén

Az előzőekben felsoroltuk azokat a tényezőket, amelyek kisebb-nagyobb mértékben befolyásolják a tekercsek és transzformátorok üzemi tulajdonságait. A stabilitás javítására, a vasveszteség és a torzítás csökkentésére, továbbá az egyenáramú előmágnesezés permeabilitáscsökkentő hatásának mérséklésére a vasmagban légrést alkalmaznak. A légrés következtében nemcsak a vasmag kezdeti permeabilitása, hanem annak külső tényezőktől való függése is lecsökken. Megnövekszik a vasmag határfrekvenciája is. Mindezek alapján légrés alkalmazása elsősorban hangfrekvenciás kimenő transzformátoroknál, fojtótekercseknel és nagyfrekvenciás tekercseknel válhat szükségessé.

3-3.2. Lemezelt vasmagok és tekercstestek

A lágy mágneses anyagokból készült magok kiviteli formája a felhasznált anyagoktól függ. Hengerelt, izotróp anyagoknál leggyakrabban a köpenymag formákat használják (3-6. ábra). A maglap középső oszlopának szélessége a szélső oszlopok szélességének összege, így biztosítva van, hogy a külső oszlopokban és a belső oszlopban azonos legyen



3-6. ábra

Lemezmaglapok köpenymaghoz: a) EI, b) M magok

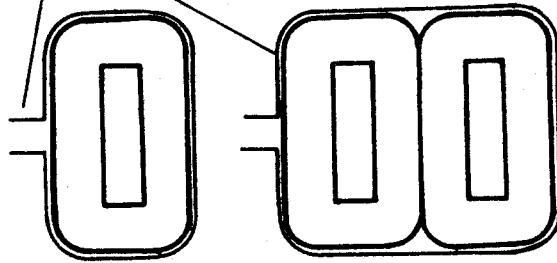
az indukció. A vasmag készítésénél az előirt vaskeresztmetszetnek megfelelő számú lapot helyezünk egymásra. Amennyiben légrésre van szükség, az EI lapok esetén azt az E és az I lapok közé helyezett keménypapírral lehet biztosítani. Ha légrésre nincsen szükség, akkor a lemezek rossz illeszkedése miatt keletkező légrés hatásának kiküszöbölésére az E és I lapokat váltakozva helyezjük egymásra, így minden légrés mellé - azt átlapolva - jó mágneses vezető kerül, a légrés hatása gyakorlatilag megszűnik.

M lemezlapoknál a légrést a csévetest elhelyezése miatt amugy is felvágott középső oszlop hosszának megválasztásával lehet biztosítani. Ha légrés nélküli vasmagra van szükség, akkor itt is váltakozva helyezük egymásra a lapokat, így a középső oszlop felvágása miatt keletkező légrés hatása szintén megszűnik. Az M magok legnagyobb hátránya, hogy a középső oszlopot ki kell hajlítani a csévetest behelyezésekor, ami kényesebb anyagoknál a mágneses adatok romlását eredményezi. A jelenleg is gyártott hirádstechnikai kistranszformátorok vasmagjainak adatai kézikönyvekben megtalálhatók [13], [25].

Anizotróp anyagok csak egyik irányban rendelkeznek jó mágneses tulajdonságokkal, ezért ezekből a mágneses magokat tekercseléssel állítják elő. A leggyakrabban alkalmazott típusokat a 3-7. ábrán láthatjuk. Az ovális köpenymagot tekercselés után szétvágják, a vágási felületeket köszörülük és polirozzák, hogy az összeállításnál a lehető legkisebb legyen a légrés.

A lemezeket az örvényáram csökkentése céljából egymástól el kell szigetelni. A szigetelésre Si ötvözeteknél elegendő a lemezek felületén keletkező oxidréteg. Más anyagoknál, valamint a tekercselt magoknál vékony lakk vagy egyéb szigetelőréteget helyeznek el a lemez egyik felületén. A szigetelőréteg következtében a vasmag A_m mágneses keresztmetszete kisebb lesz az A_g geometriai keresztmetszetenél, a kettő hányadosa a vaskitöltési tényező,

SZORÍTÓ BILINCS

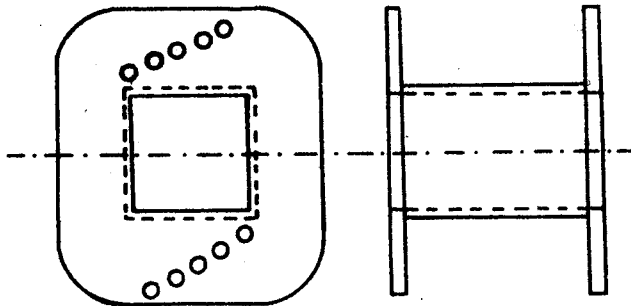


3-7. ábra
Tekercselt gyűrű, ovál és köpenymag

$$F_v = \frac{A_m}{A_g} \quad (3-7)$$

F_v értékét különböző lemezvastagságokra szabványok rögzítik.

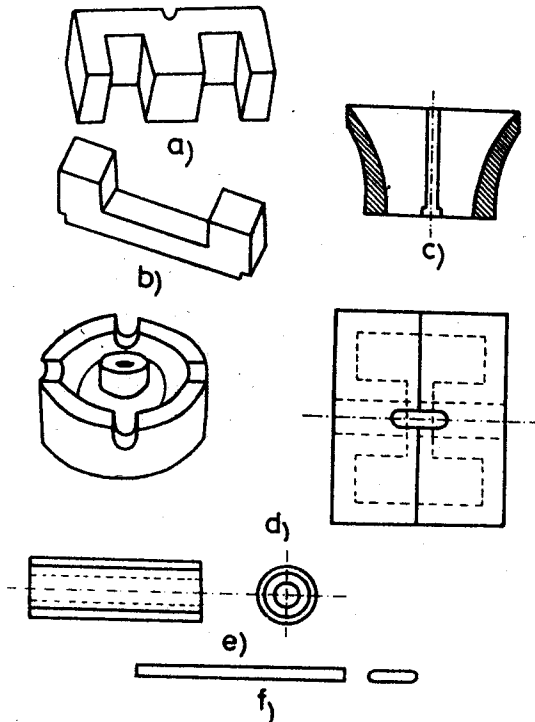
A tekercset csévetesten (tekercstesten) helyezik el. A csévetest a tekercs számára megfelelő mechanikai szilárdságot biztosít és elektromosan elszigeteli a mágneses magtól. A 3-8. ábrán köpenymaghoz használt csévetestet láthatunk. Homloklapjain a huzalkivezetések elkészítésére 1.5-2 mm átmérőjű lyukakat furnak. Anyaga bakelit, prespán vagy műanyag.



3-8. ábra
Csévetest EI és M lapokból összeállított, tekercselt köpeny- és ferrit E maghoz

3-3.3. A ferritek

A ferritek fémoxidból álló, a kerámiához hasonló anyagok, amelyeket nagy hőmérsékleten történő zsugorítással (szintereléssel) állítanak elő. Az előállításához két- és háromvegyértékű fémek oxidjait használják fel. Ezek közül a legfontosabbak a Fe, Ni, Mn és Mg oxidjai. A fémoxidokat - az előállítandó anyagtipustól függő - pontosan meghatározott arányban összekeverik és $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli hőmérsékleten előszinterelik. Ezek után préssel állítják elő a jól ismert ferritmagokat, amelyek mágneses tulajdonságai és méretei egy $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli végső szinterelés hatására alakulnak ki. A leggyakrabban használt ferritmag típusokat a 3-9. ábra mutatja.



3-9. ábra

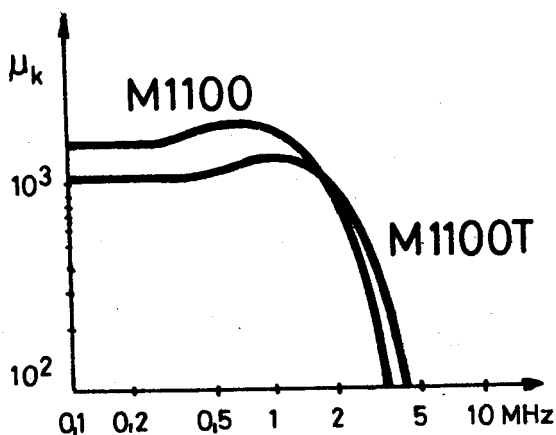
Különböző típusu ferritmagok:

- a) E mag, b) U mag, c) TV eltérítő tekerces ferrit-mag,
d) fazék-mag, e) hangoló csavar, f) ferrit rud

A ferritek alkalmazásánál elsősorban a nagy kezdő permeabilitás, a kis összveszteség, és az igen nagy fajlagos ellenállás - amely $10^7 \dots 10^9$ -szer nagyobb, mint a fémes anyagoké - jelent nagy előnyt. A nagy fajlagos ellenállás miatt igen kicsi az örvényáram-veszteség és

így a ferritek lényegesen magasabb frekvenciáig használhatók, mint a legvékonyabb lemezmagok, vagy akár a porvasmagok. A kis összvesztesség miatt nagyobb jósági tényező érhető el, mint akármelyik vas-nikkel ötvözettel vagy porvasmaggal.

A katalógusok minden esetben megadják azt a felső határfrekvenciát is (f_{max}), amelyen az adott anyagból készült ferritmag még használható a mágneses paraméterek megváltozása nélkül. A 3-10. ábrán bemutatjuk két - HAGY (Hiradástechnikai Anyagok Gyára) gyártmányu - ferritanyag frekvencia-kezdeti permeabilitás karakterisztikáját, míg a 3-2. táblázatban megadjuk különböző típusu HAGY és Siemens gyártmányu ferritek fontosabb anyagjellemzőit.



3-10. ábra

Ferrit anyagok kezdeti permeabilitásának frekvenciafüggése

A ferriteknél három olyan hátrányos tulajdonságot kell megemlítenünk, amelyek korlátozzák a felhasználás lehetőségeit. Ezek közül a legfontosabb a kis telítési indukció, amely még a legjobb típusoknál is kisebb, mint $0.5 \frac{Vs}{m}$. A kis telítési indukció miatt olyan esetekben,

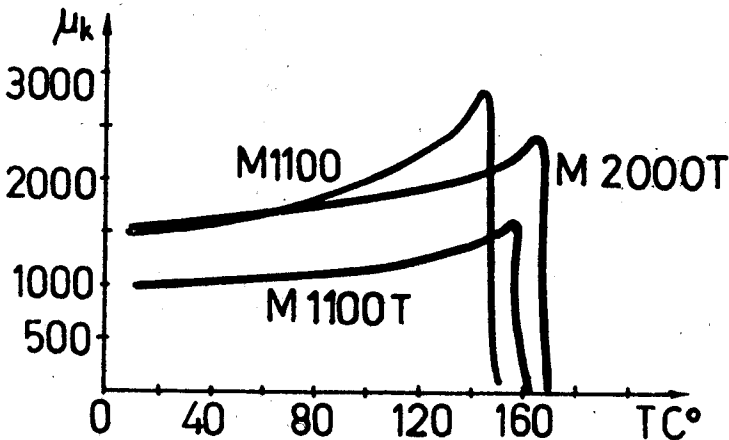
amikor alacsony frekvencián nagy indukció a követelmény, előnyösebb a vas-szilícium vagy a vas-nikkel ötvözetekből készült lemezmagok alkalmazása. Hátrányt jelent továbbá a viszonylag alacsony Curie hőmérséklet, amely miatt nem hagyható figyelmen kívül a mágneses paraméterek hőfokfüggése, valamint a permeabilitás időbeli lassu csökkenése, az undezakkomodáció. Az utóbbi két hatás légréses magok alkalmazásával a követelményeknek megfelelő mértékben csökkenthető. A megkívánt hőmérsékleti és időbeli stabilitás eléréséhez szükséges légrés azonban nagymértékben hátráltathatja a magok méreteinek csökkenését.

Különböző gyártmányu ferritek anyagjellemzői

3-2. táblázat

Gyártmány	Hiradástechnikai Anyagok Gyára				Siemens		
Tipus	M1100	M1100T	M2000T	M550	7 U 15	80 K1	1100N22
μ_k	1300	1100	1800	550	7,5	80	1250
f_{max}	0,3	0,2	-	1,6	120	10	0,2 MHz
T_c	>140	>150	>160	>120	>500	>350	>140 °C
B_m	H=10A/cm	0,38	0,3	0,4	0,35	0,1 0,36 0,38 $\frac{VS}{m^2}$	
	H=300A/cm						
ϱ	>150	>300	>100	>400	$\sim 10^7$	$\sim 10^6$	$\sim 100 \Omega cm$

A 3-11. ábrán néhány HAGY gyártmányu ferrit kezdeti permeabilitásának hőfokfüggését mutatjuk be. Mint az ábrából jól látható, a ferrit anyagok kezdeti permeabilitása a hőmérséklet emelkedésével nő és a



3-11. ábra

Ferrit anyagok kezdeti permeabilitásának hőfokfüggése

Curie pontnál hirtelen letörök. Megállapítható továbbá, hogy a növekedés mértéke a Curie hőmérséklet közelében nagyobb, mint annál jóval alacsonyabb hőmérsékleten, így a tekercsek stabilitása is alacsonyabb hőmérsékleten lesz jobb.

A tekercsek méretezéséhez az egyik legfontosabb adat a ferritmag A_L értéke. Ez az adat az adott magtípussal készült tekercs menetszám-négyzetére eső induktivitását adja meg nanohenryben. Mértékegysége ezért 10^{-9} H/n^2 . Az A_L adatot csak zárt ill. kis légréssel rendelkező magokra adják meg, értéke a mag anyagától és geometriai méreteitől (keresztmetszet, mágneses erővonalhossz, légréss) függ. Segítségével a tekercs menetszáma (n) a kívánt L induktivitás ismeretében egyszerűen kiszámítható

$$n = \sqrt{\frac{L \text{ (nH)}}{A_L}} \quad (3-8)$$

Hernyómag és hangoló rudacska esetén az adott induktiváshoz szükséges menetszám:

$$n = K \sqrt{L} \quad (3-9)$$

ahol L a kívánt induktivitás μH -ben, K a magtényező, amelyet a gyárak szintén megadnak. A kiszámított menetszám csak közelítőleg adja a kívánt induktivitást, mert annak értéke a mag helyzetétől is függ. A mag mozgatásával azonban a kívánt induktivitás beállítható, amely különösen hangolt köröknél előnyös.

3-4. A transzformátor

A transzformátor működésének fizikai alapjai korábbi tanulmányainkból már ismeretesek, leírása számos helyen megtalálható [1], [2]. A méretezéshez szükséges alapegyenletek kiszámításához röviden tekintsük át a transzformátor működési elvét.

Helyezzünk el tetszés szerinti zárt vasmagra n_1 menetszámú tekercset (3-12. ábra). Tekintsünk el egyelőre a vezeték ellenállásától, akkor erre a körre felírhatjuk az általánosított Kirchhoff-összefüggést, amely szerint adott körüljárási irányt választva, a hálózati feszültség (u_1) és a tekercs önindukciója következtében fellépő feszültség (u_1) ösz-

szege zérus, vagyis: $u_1 + u_i = 0$;

$u_1 = -u_i = n_1 \frac{d\Phi}{dt}$. Ebből a fluxus időbeli változását könnyen ki tudjuk számítani, csak be kell helyettesíteni a feszültség időbeli lefolyását leíró egyenletet:

$$u_1 = U_m \sin \omega t,$$

Ennek segítségével

$$U_m \sin \omega t = n_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

amiből a fluxust megkapjuk, ha a feszültséget az idő szerint integráljuk:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{U_m}{n_1} \sin \omega t; \quad \Phi = \int \frac{U_m \sin \omega t}{n_1} dt = \frac{U_m}{n_1 \omega} \cos \omega t.$$

Látjuk, hogy a fluxus is tisztán szinuszosan változik, csak fázisa a feszültséghez képest 90° -kal el van tolva. Természetesen ha a Φ fluxus adott, mint az idő függvénye: $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, akkor a feszültség időbeli változása:

$$u_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} = n_1 \Phi_m \omega \sin \omega t.$$

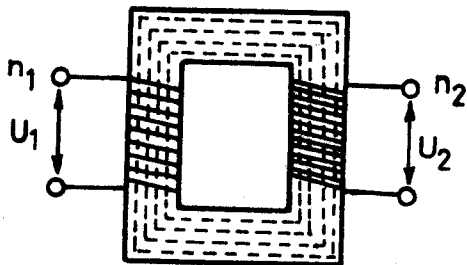
A gyakorlatban természetesen csak a feszültség effektív értékére vagyunk kíváncsiak, amit az előbbi egyenletek felhasználásával kaphatunk meg:

$$U_1 = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{n_1 \Phi_m \omega}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} n_1 \Phi_m = 4,44 f n_1 \Phi_m$$

(3-10/a)

Ez a transzformátor alapegyenlete, amely a tekercsben indukált feszültséget a vastestben levő fluxussal kapcsolja össze.

Ha a vasmagra egy másik, az előzőtől különböző n_2 menetszámú tekercset helyezünk el és feltételezzük, hogy ugyanazon Φ fluxus halad át, mint az első tekercsen (szórásmentes csatolás), akkor az előbbieknél megfelelően ebben a tekercsben indukált feszültség értéke:



3-12. ábra

A transzformátor elvi felépítése

$$U_2 = 4,44 f n_2 \Phi_m \quad (3-10/b)$$

és így

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3-11)$$

Ha a transzformátor szekunder tekercsére Z_t terhelő impedanciát kapcsolunk és feltételezzük, hogy a szekunder tekercs ellennállása is zérus, valamint eltekintünk a vasvesztésegektől, akkor a primer- és szekunderoldali teljesítményeknek egyenlőeknek kell lenni egymással:

$U_1 I_1 = U_2 I_2$; amiből az előzőek felhasználásával

$$I_1 / I_2 = n_2 / n_1 \quad (3-12)$$

A transzformátor bemeneti impedanciája:

$$Z_{be} = \frac{U_1}{I_1} = Z_t \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (3-13)$$

a (3-11) és (3-12) egyenletek, valamint $U_2 = Z_t I_2$ felhasználásával.

Ez azt jelenti, hogy a szekunderoldali terhelés a primer oldalon a méretszámok arányának négyzetével jelentkezik, tehát a transzformátor mint "impedancia-transzformátor" viselkedik. Ezen tulajdonságát használják fel például a hengerősítők kimenő-transzformátorainál, ahol a hangszóró impedanciáját illesztik a végfokozat kimeneti áramköréhez az optimális üzemi paraméterek elérése céljából.

Mégegyszer hangsúlyozzuk, hogy az előbbieken vázolt gondolatmenet csak ideális transzformátor esetén igaz. Veszteséges transzformátoroknál az egyenletek bonyolultabbak.

Transzformátor méretezésénél a veszteségeket is figyelembe kell venni. Ezek nagy része hővé alakul. A vasmag melegedését a maximális teljesítményhez tartozó indukció (B_m) szabja meg, a tekercs melegedését pedig a rézvesztéséből származó Joule-féle hő, amely az áram-sűrűséggel (J) arányos. A nagymértékű melegedés elkerülésére megfelelő keresztmetszetű (F_v) és ablakméretű (F_a) vasmagot kell alkalmazni.

Adott teljesítményhez tartozó indukció ui. a vasmag keresztmetszetének növelésével csökkenthető, a tekercs túlmelegedését viszont megfelelő keresztmetszetű huzal felhasználásával akadályozhatjuk meg, ami kellő ablakméretet igényel. A vasmag és a tekercs melegedése - hővezetés miatt - természetesen egymásra is hatással van. A transzformátor üzemi hőfokát elsősorban a tekercsek szigetelőanyagai (és esetenként biz-

tonsági előírások) szabják meg. Gazdasági szempontok miatt méretcsök-
 kentésre törekszünk, az aránytalanul kis méretek viszont erős tulmele-
 gedéshez és ezáltal rövid élettartamhoz vezetnek. A helyes vaskereszt-
 metszet és ablakméret - adott teljesítményhez - optimumszámítással
 határozható meg. F_v értékének olyannak kell lennie, hogy a maximá-

lis teljesítményhez tartozó maximális indukció ne legyen nagyobb, mint
 a kisméretű melegedéshez tartozó megengedett, indukció. Ennek értéke
 Si-ötvezésű lemezelte vasmagokra $1 \dots 1.4 \text{ Vs/m}^2$, tekercselt magokra
 $1.5-1.8 \text{ Vs/m}^2$. F_a értékét pedig olyanra kell választani, hogy a

transzformátor tekercseinek áramsűrűsége ne legyen nagyobb a megenged-
 ett értéknél. Kisteljesítményű transzformátoroknál ez $2 \dots 3 \text{ A/mm}^2$
 szokásos értékű.

A vasmag keresztmetszetének meghatározásához a transzformátor
 teljesítményéből kell kiindulni. Ideális transzformátornál a (3-11) össze-
 függés és $\Phi_m = F_v B$ egyenlőség felhasználásával

$$P_2 = I_2 U_2 = 4.44 I_2 f F_v B n_2 \quad (3-15)$$

Az $I_2 n_2$ tényező a tekercseléshez szükséges ablak (F_a) felületével is
 kifejezhető. Azonos primer és szekunder áramsűrűséget feltételezve

$$F_a = \frac{1}{\alpha_t} \left(\frac{n_1 I_1}{J} + \frac{n_2 I_2}{J} \right) = \frac{1}{\alpha_t} (n_1 q_1 + n_2 q_2), \quad (3-16)$$

ahol α_t a huzal szigeteléséből, hengeres keresztmetszetéből és a
 menetsorok közötti szigetelőrétegekből származó járulékos helyigényt fi-
 gyelembe vevő tekercskitöltési tényező, q_1 és q_2 a primer- és sze-
 kundertekercs huzalkeresztmetszete. A (3-13) összefüggés szerint

$I_1 n_1 = I_2 n_2$, ezért F_a értéke

$$F_a = \frac{2n_2 I_2}{J \alpha_t}$$

alakba írható. Ebből $I_2 n_2$ -t kifejezve és a (3-15) összefüggésbe helyet-
 tesítve

$$P_2 = \frac{4.44}{2} f F_v B J F_a \alpha_t$$

egyenlőséget kapjuk. Így a szükséges vasmag keresztmetszete

$$F_v = P_2 \frac{K}{B_m F_a},$$

ahol $K = 2/4,44 f_1 \alpha_t$ tényezőt állandónak tekinthetjük.* Alakítsuk át az összefüggést $F_v^2 = K F_v P_2 / B_m F_a$ alakúra, és ezzel F_v értékére a jól ismert

$$F_v = A_o \sqrt{P_2} \quad (3-17)$$

kifejezést kapjuk, ahol $A_o = \sqrt{\frac{K \cdot F_v}{B_m \cdot F_a}}$. A forgalomban levő szabványos vasmagoknál, 50 Hz frekvenciára, A_o értéke tekercselt magnál 0.9-1.1, lemezelt vasmagoknál 1.3-1.5. Nem szabványméretű vasmagoknál A_o értékét az adott képlettel ki kell számítani.

*

Ha egyéb veszteségeket is figyelembe veszünk, K helyett

$$A_F = \frac{\xi_m + \alpha_A \xi_t}{4.44 f_2 \alpha_t} \text{ keresztmetszeti állandóval kell számolnunk.}$$

Itt $\xi_m = N_2/N_1$, a veszteségekből származó feszültségesezt jellemző, voltonkénti szekunder menetszám (N_2) voltonkénti primer menetszámhoz (N_1) viszonyított növekedése, a menetszámhelyesbítés. ξ_t a veszteségekből származó primeráram-növekményt veszi figyelembe. Eszerint a primeráram az ideálisnak ξ_t -szeresére növekszik. $\alpha_A = \frac{J_1}{J_2}$

a primer és szekunder áramsűrűség hányadosa. Értéke általában 0.9, a csévetest belső részén elhelyezkedő primer tekercsen ui. a rosszabb hűtési viszonyok miatt kisebb áramsűrűség engedhető meg, mint a szekunder tekercsben.

A fenti vaskeresztmetszet-számítás nem alkalmazható minden esetben. Híradástechnikában a telítés okozta torzítás általában nem kívánatos, emiatt a maximális indukciót csökkenteni kell. Pl. hangfrekvenciás transzformátornál lemezelt vasmag esetén B_m értéke $0.3 \dots 0.5 \text{ Vs/m}^2$, tekercselt vasnál $0.4 \dots 0.6 \text{ Vs/m}^2$.

A megfelelő vasmag kiválasztása után a primer- és szekundertekercs menetszámának meghatározása, $\Phi_m = F_v B_m$ egyenlőség felhasználásával, a (3-11) és (3-12) összefüggés segítségével lehetséges. Ezután a primer- és szekunderáram ismeretében a megengedett áramsűrűség figyelembevételével a tekercsek huzalátmérői kiszámíthatók. Veszteségek miatt a szekundertekercs menetszámát az ideálistól néhány % -kal nagyobbra kell méretezni, hasonlóképpen a primertekercs keresztmetszetét is. Ezeket legtöbbször táblázatok és diagramok segítségével végzik el.

A transzformátortervezés utolsó lépése a tekercsek helyszükségletének kiszámítása. Itt figyelembe kell venni a csévetest helyigényét (F_{cs}) és az α_t tekercskitöltési tényezőt is. (α_t értékét általában 0.5-nek vehetjük). Az összes helyszükséglet (F_o)

$$F_o = F_{cs} + \frac{1}{\alpha_t} (n_1 q_1 + n_2 q_2) .$$

A méretezés akkor helyes, ha F_o kisebb, mint a vasmag ablakmérete, ellenkező esetben új, nagyobb méretű vasmagot kell választani, és a számításokat megismételni.