



A kimenő-transzformátor méretezése.

Bozó Balázs



[Miért van rá szükség?](#)

[A kimenő-transzformátor méretezésének szempontjai.](#)

[A szükséges vaskeresztmetszet meghatározása.](#)

[Határozzuk meg a primer tekercs induktivitását.](#)

[Határozzuk meg a szekunder tekercs menetszámát is.](#)

[A tekercsek huzalátmérőinek számítása.](#)

[A Push – Pull vagy ellenütemű erősítők kimenői.](#)

[Elkészítés, kivitel..](#)

Jelen cikkben a kimenő-transzformátor méretezését próbálom meg bemutatni. Sokkal inkább közérthető módon, mint sem kitérve a speciális esetekre, és meg sem próbálom kimeríteni a Hi-Fi, illetve High End követelményeknek megfelelő kimenő tervezést. Már csak azért sem, mert ezek java része több évi kísérletezés, és tapasztalat után szokott a gyártó és a fémjelzett márka titkos receptjévé válni és nem kevés esetben a gyártóra jellemző „hangot” eredményezni. Ne felejtjük azonban el, hogy a bárminemű képlet alapján megtervezett kimenő – hacsak nagyon nem számoltunk el valamit – a bejövő jel hatására kimenő jelet fog produkálni, magyarul megszólal. Itt inkább arra hívnám fel a figyelmet, hogy a megszólalás milyensége az amiért sokat kell dolgozni, és ami a szememben értéket adhat egy ilyen sokszor művészi alkotásnak. A művészet és a tapasztalat hatása tehát nem abban rejlik, hogy működő képes kimenőt tervezzünk, hanem sokkal inkább abban, hogy tervezhetjük a kimenőnk hangját és viselkedésének karakterét. És itt megint érdemes lenne megjegyezni, hogy sok esetben a hang karakterére sokkal nagyobb befolyással bírnak, a választott vasanyag tulajdonságai és a réz vagy ezüst huzal tulajdonságai mint a méretezéshez használt képlet. Itt is elmondható általános irányelvnek, hogy a réznek, és a vasaknak jól tesz ha kicsit pihennek felhasználás előtt. A kicsit itt természetesen olyan 30 évet szokott jelenteni, de minél öregebb annál jobb. Ezt azért érdemes

átgondolni, mert a korai vasak és réz kábelek nem mindenben tudtak olyan technikai paramétereket mint a maiak. Tehát – mint általában minden tervezés – ez is kompromisszumos megoldásokat eredményez. Ami azt is jelenti, hogy nincs univerzális, „Joly-Joker” megoldás. Előforduló hiba szokott lenni, hogy az "Öreg szaki" akit megbíztunk kimenőnk elkészítésével éppenséggel nem pont abban a trafóban járatos mint szeretnénk. Általában a Push-Pull és inkább a hangszer erősítők voltak akkoriban elterjedtek, tehát tapasztalata és tudása inkább ennek megfelelő szokott lenni. Ha ezt felmérjük egy sor gondtól megszabadulhatunk még időben! De nézzük végre a képleteket és az alapokat.

Miért van rá szükség?

Az erősítő kimeneti körében található végerősítő cső, mint a hangszóró szempontjából az áramforrás. Ahhoz, hogy ezt az áramforrást maximálisan ki tudjuk használni, vagyis hogy a lehető legnagyobb nyereséget érhessük el, illeszteni kell a fogyasztóhoz (hangszóró). Az analógiát felhasználva azt gondolnánk, hogy az ideális illesztés akkor következne be, amikor a cső belső ellenállása megegyezik a hangszóró impedanciájával (váltakozó áramú ellenállás). A végerősítő cső azonban egy speciális áramforrás. Ezért nem a belső ellenállásával megegyező esetben ideális a hatásfoka, hanem ennél kisebb értéknél, amit optimális illesztő ellenállásnak nevezünk. Ennek megállapításakor azt veszik figyelembe, hogy a cső maximális teljesítményt adjon le, de minimális torzítás mellett. Általában a cső katalógusok ezt megadják. (Természetesen általános esetre, amitől ha eltérünk ezt ismét meg kell határoznunk.) A katalógusokban a cső belső ellenállását R_i vagy R_p -vel jelölik, míg az optimális illesztő ellenállást R_a / R_{opt} jelölik. A hangszórók impedanciája többnyire szintén megadott, ismert. (Azért ez megérdemelne egy külön cikket is :) A példa kedvéért vegyünk alapul a 300B triódát, mint végerősítő cső, és a 8 Ohmos impedanciájú hangszórónkat illeszténénk hozzá. A példa szerinti trióda optimális illesztő ellenállása 3000 Ohm, míg a hangszórónk csak 8. Ezt az impedancia illesztést hidálhatjuk át egy úgynevezett impedancia illesztő transzformátorral, ami ebben a speciális illesztési feladatban kimenő-transzformátor néven ismert. Segítségével tehát a végerősítő cső a hangszórót mint számára ideális ellenállást fogja „látni”.

A kimenő-transzformátor méretezésének szempontjai.

A feladatból is jól látható, hogy a méretezése jelentős mértékben eltér a hálózati transzformátorok méretezésétől. Ennek oka a vele szembeni követelményekben keresendő. A kimenő-transzformátor vasmagját nem szabad a telítésig mágnesezni, mint a hálózati trafóké! szokásos. Ennek oka a vas telítésekor keletkező torzítások. Bár meg kell jegyezni, hogy néhány hangszer erősítő jellegzetes hangját pont ez a torzítás okozza. Ha ilyet, után építünk ne felejtsük el azt, hogy hasonló torzítást csak azonos vasanyagú magtól várhatunk el!

A kimenő-transzformátor primer tekercsén egyenáram folyik keresztül, ez a vasmagot előmágnesezi és torzítást okoz. Ennek elkerülésére a transzformátort légréssel látjuk el. A légrés nagysága döntően befolyásolja a transzformátor viselkedését. Meghatározása ezért lényeges tervezési momentum. Természetesen a légrés az ellenütemű meghajtással dolgozó transzformátoroknál elhagyható hiszen azonos áramok kioltják egymás előmágnesező hatásait.

A hálózati transzformátorokat csak a hálózat frekvenciájára kell méretezni, míg a kimenők a vélhető szempontjaink szerint természetesen minél szélesebb sávban és a teljes sávban jó átvitelt kell biztosítani.

A primer tekercs induktív ellenállása párhuzamosan kapcsolódik a végerősítőcsővel, ami így söntölő hatást fejt ki. Ez az induktív ellenállás

a frekvenciával egyenes arányban változó érték, ezért a primertekercs induktivitása a mélyhangokra jelent veszélyt, amit a méretezésnél figyelembe kell venni. Általánosságban ezt az optimális illesztő ellenállás 70%-ban szokták meghatározni a legalacsonyabb, átvinni kívánt frekvencián.

A szükséges vaskeresztmetszet meghatározása.

A méretezést kezdjük praktikus okokból a vas keresztmetszetének meghatározásával. Itt kettő képletet is megemlíthetünk amiket attól függően érdemes használni, hogy a kimenő-transzformátort milyen erősítőbe kívánjuk alkalmazni. Tehát az első esetben (és inkább ellenütemű erősítőkben való felhasználásra) $q_v = 10 \cdot \sqrt{(2P/f_a)}$ [cm²]; Ahol a q_v a vasmag keresztmetszet, a P a végerősítő csőből kivehető maximális váltóáramú teljesítmény. f_a a legalacsonyabb átvinni kívánt frekvencia. Vagy a másik képlet szerint (ezt javasolnám együtemű erősítőkhöz) $q_v = 20 \cdot \sqrt{(P/f_a)}$; [cm²] a betűk jelentése a már fentebb ismertetett képlet szerinti. Esetleg ha érdekes lehet akkor részletezhetjük is, hogy miképpen alakul ez a képlet egy általános megoldásban:

$$q_v = \sqrt{(P \cdot G \cdot 10^6) / (f_a \cdot B \cdot I_s)};$$

A betű elnevezések a már ismertetett jelentéssel bírnak illetve a G a vas és a réz súly együtthatója szokásos értéke 1-1,5.

A B a vas mágneses indukciója Gaussban (10KGs=1T). Szokásos értéke 4%-os szilíciumos vasnál 2000-16000Gs. Kisebb teljesítményű trafóknál ez lehet 4000Gs, míg 25W felettiekénél 5000Gs értékűre szokták választani. A legjobb persze ha magunk határozhatjuk meg a vas hiszterézis görbéjének egyenes szakaszát figyelembe véve. Minél magasabbra vesszük ezt az értéket annál nagyobb vasveszteséggel számolhatunk illetve melegedéssel, de például gitár erősítőknél a szokásos érték 10000 – 12000Gs bár ez sávhatároltságot és torzításokat eredményez ugyan, de a jellegzetes hangját is adja egy-egy ilyen erősítőnek. Ha jobb vasanyagot használunk megengedhetjük a magasabb indukciós értéket is. A mai hyperszil, vágott, amorf magoknál vagy más ritka földfémekkel szennyezett vasanyagoknál nem ritka a 20000Gs érték sem, anélkül, hogy számottevő torzítás lépne fel.

I_s a huzalban megengedett áram sűrűség. Szokásos értéke 1,5 – 2,5 [A/mm²], de esetenként előfordulhat a 3A/mm² is.

Ha egy általános megoldást választunk 5000Gs és 4% szilíciumos vasat, egyszerűsödik képletünk, a fentebbi $q_v = 20 \cdot \sqrt{(P/f_a)}$ -ra. Természetesen a tényleges keresztmetszetet a vashoz kell igazítanunk és itt befolyásoló tényező lehet a felhasznált vasmag típusa is.

Határozzuk meg a primer tekercs induktivitását.

$$L_p = (1/\omega_a) \cdot (R_a \otimes R_b);$$

ahol a ω_a a szokásos $2\pi \cdot f_a$. Ellenőrizzük le, hogy az így meghatározott induktivitás nem lehet kisebb az R_a 70%-ánál (vagy amit mi meghatároztunk).

Miután ezt tisztáztuk (a későbbiekben nem részletezem ennyire) ki kell számítanunk a primer menetszámot. (A primer tekercs a végcső felőli tekercs). Az alábbi egyenletből határozható ez meg:

$$U_a = q_v \cdot 4,44 \cdot B \cdot n_p \cdot f_a \cdot 10^{-8};$$

A gyakorlatban azonban az alábbi képletek használatosak. A primer tekercs menetszámát tehát, meghatározza a közepes erővonal hossz a vasban, a légrésben és a fentebb kiszámolt keresztmetszet.

$$n_p = 1500 \dots 2000 \cdot \sqrt{(10 \cdot L_p \cdot l_l / q_v)}$$

légréses transzformátornál, míg légrés nélküli esetben

$$n_p = 9000 \cdot \sqrt{(L_p \cdot l_l / \mu_0 \cdot q_v)}.$$

A betűk jelentése: n_p a primer tekercs menetszáma, L_p a primertekercs induktivitása [H]. l_l erővonal hossz a légrésben [mm]. l_v erővonalhossz a vasban [mm], μ_0 a vas kezdeti permeabilitása (450 4%-os szilíciumos vasnál). q_v a számított vas keresztmetszet.

A fentebbi egyenletet átrendezve számítsuk ki a számított menetszámmal a vasban fellépő mágneses indukció mértékét ami nem haladhatja meg az általunk (a fentebbi szempontokat figyelembe véve) meghatározottakat.

$$B = (U_a / (4,44 \cdot n_p \cdot f_a \cdot q_v)) \cdot 10^8.$$

Ha ez nem megfelelő, növeljük vagy a primer menetszámot vagy a vas keresztmetszetet. A szükséges légrés kiszámítására számos egyenlet létezik, de a gyakorlatban jól használható a $l_l = (q_v \cdot n_p^2) / (8 \cdot 10^6 \cdot l_p)$ [mm]. A képlet betűinek jelentése, l_l a légrés hossza mm-ben, a q_v a vasmag keresztmetszete cm^2 -ben, és az L_p a primer önindukció. A légrés méretezésénél természetesen jó, ha figyelembe vesszük, hogy nem mindegy mekkora légrést írunk elő a túl kicsi légrés megvalósíthatatlan a gyakorlatban. Vegyük figyelembe továbbá, hogy a különböző anyagok nagyon eltérően érzékenyek az egyenáramú előmágnesezésre. Ennek az a következménye, hogy minden anyagra más az egy meghatározott egyenáramú mágnesezésnél optimális légrés arány. Ezt leginkább kísérletekkel szokás megállapítani, ha a használt vas adatlapja nem tartalmazza.

Határozzuk meg a szekunder tekercs menetszámát is.

Először is, az áttétel meghatározásával kell kezdenünk. $\dot{a} = n_p / n_s = \sqrt{(\eta \cdot R_a / Z_h)}$. Ahol az $\dot{a}$ az áttétel a primer és a szekunder között, az n_p a primer menetszám, az n_s a szekunder menetszám. A η a kimenő-transzformátor hatásfoka. Ha a csatolás a primer és a szekundertekercs között 100%-os lenne a szekunder oldalon lévő hangszóró impedanciája a primer oldalra a menetszámok négyzetével transzformálna

át. Sajnos ez a veszteségek miatt nem így van ezért kell figyelembe vennünk a transzformátorunk hatásfokát. Ez jellemzően nagyobb transzformátoroknál és precíz készítésnél 80 – 95% míg közepes méretűeknél 65% - 85% vagy a kisebb trafóknál az 50% - 70%-ot éri csak el. Az R_a a cső optimális illesztő ellenállása, míg az Z_h a hangszóró impedanciája $[\Omega]$. Az áttétel ismeretében kiszámíthatjuk a szekunder tekercs menetszámát.

$$n_s = n_p / \dot{a}.$$

A tekercsek huzalátmérőinek számítása.

A tekercsek huzalátmérőinek számításakor illik a csúcsáramok miatt az effektív érték helyett a csúcsértékkel számolni, ami az előbbi $\sqrt{2}$ szerese. A tekercsek huzal átmérőit az alábbi egyenletből számíthatjuk ki.

$$d = t \cdot \sqrt{I} \text{ [mm]}.$$

Ahol a d a huzal átmérője mm-ben. A t értékét a megengedett áramsűrűség határozza meg. Szokásos értékei $0,7 \text{ } 2,5 \text{ A/mm}^2$ esetén, $0,8 \text{ } 2 \text{ A/mm}^2$, valamint $0,9 \text{ } 1,5 \text{ A/mm}^2$ esetén. Minél vékonyabb huzalt használunk annál nagyobb veszteséggel számolhatunk, de természetesen a vastagságnak ésszerű határt kell szabnunk, hiszen a tekercselési tér adott. A szekunder tekercs esetében azonban feltétlenül vegyük figyelembe, hogy a tekercs ohmos ellenállásán ne vesszen el a teljesítmény több mint 8-10%-a.

Amint kiszámoltuk a szükséges adatokat még hátra van az, hogy mindez befér-e a kívánt ablakméretbe. Vegyük számításba, hogy az ablakméretnek csak 60%-át tudjuk tekercsel kitölteni, a többi helyet kényszerűségből a csévetest, és a tekercsek közötti szigetelés fogja elfoglalni. A szekunder tekercsek közé nem szoktak szigetelést helyezni, de a primer tekercsek közé kétsoronként tehetünk.

Kimenő-transzformátorunk a méretezési szempontjaink szerint alakult. Ha ismerjük a szórt indukció mértékét kiszámíthatjuk a transzformátorunk felső határfrekvenciáját. Ezt az alábbi egyenletből határozhatjuk meg:

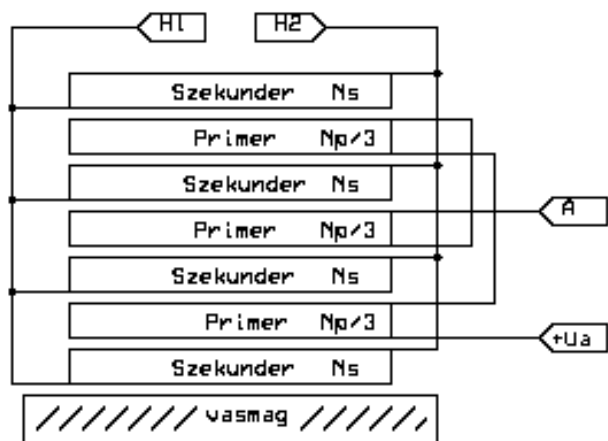
$$2\pi \cdot f_f = (R_b + R_a) / (L_p \cdot \sigma).$$

Ahol az f_f a felső határ frekvencia a σ pedig a szórt induktivitás. A szórt induktivitásra jelentős hatással van a tekercsek elrendezése. Általánosságban a primer tekercset is és a szekunder tekercset is több felé szokás osztani. A primer tekercset természetesen a menet számainak figyelembe vételével sorba kapcsolva szokták osztani, míg a szekunder tekercset párhuzamos kapcsolással osztják, ami azt jelenti, hogy a menetszámaik azonosak (figyelem teljesen azonosak!) de a keresztmetszetük az osztásnak megfelelően csökkentve. (Figyelem a keresztmetszet!) Természetesen minél több részre osztottuk annál jobb átvitelre számíthatunk. A tekercsek elosztása persze jelentősen befolyásolja a kialakuló kapacitásokat. Az ábrákon igyekszem bemutatni a kialakítható tekercselési elrendezéseket.

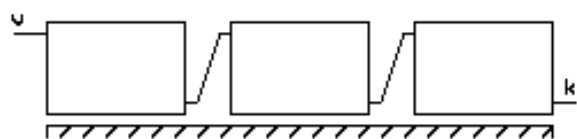
A Push – Pull vagy ellenütemű erősítők kimenői.

A Push – Pull vagy ellenütemű erősítők kimenőinél a méretezés hasonló. Abból indulhatunk ki, hogy az egy csőre jellemző R_a értéket

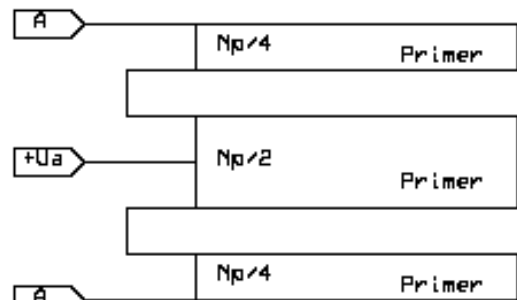
megduplázzuk. Gyakran ezt az értéket is megadják a katalógusok, ha számítani lehet a cső ellenütemű felhasználására. Pl. EL34 esetén. Ezt R_{a-a} jelöléssel szokták illetni. Ekkor a primertekercs közép leágazásos kivitelben készül, ahová a tápegység + pontja kerül. A pentódák és sugártetródák esetében meg szokták még adni a katalógusok, vagy adatlapok az Ultra Linear megcsapolás ideális mértékét. Ez többnyire 25-35% környékére esik. Mivel a csövek beállításában az azokon átfolyó áram ellentétes, így a vasat előmágnesező egyenáram (a két cső szimmetriája esetén) kioltja egymást, így a légrés használata mellőzhető és felesleges. Érdekes még megemlíteni, hogy a Push – Pull kapcsolásokat gyakran alkalmazzák párhuzamosan kapcsolt végcsövek esetén is. Ekkor az R_a értéke a felére csökken. Tehát a Paralell Push – Pull kapcsolásokban az R_{a-a} értéke az alkalmazott végcső R_a értékének a fele majd annak a kétszerese lesz, azaz az eredeti R_a érték. Ne feledkezzünk meg azonban a dupla áramról!



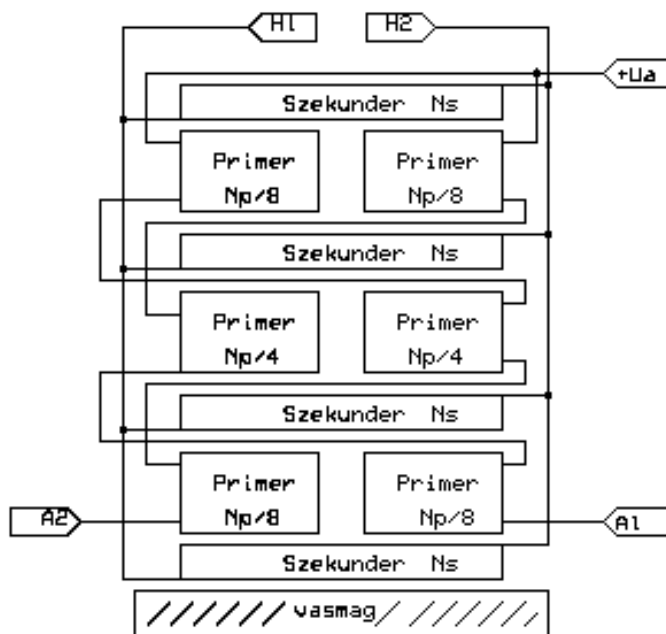
a)



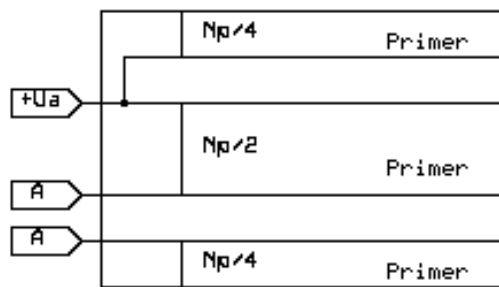
f)



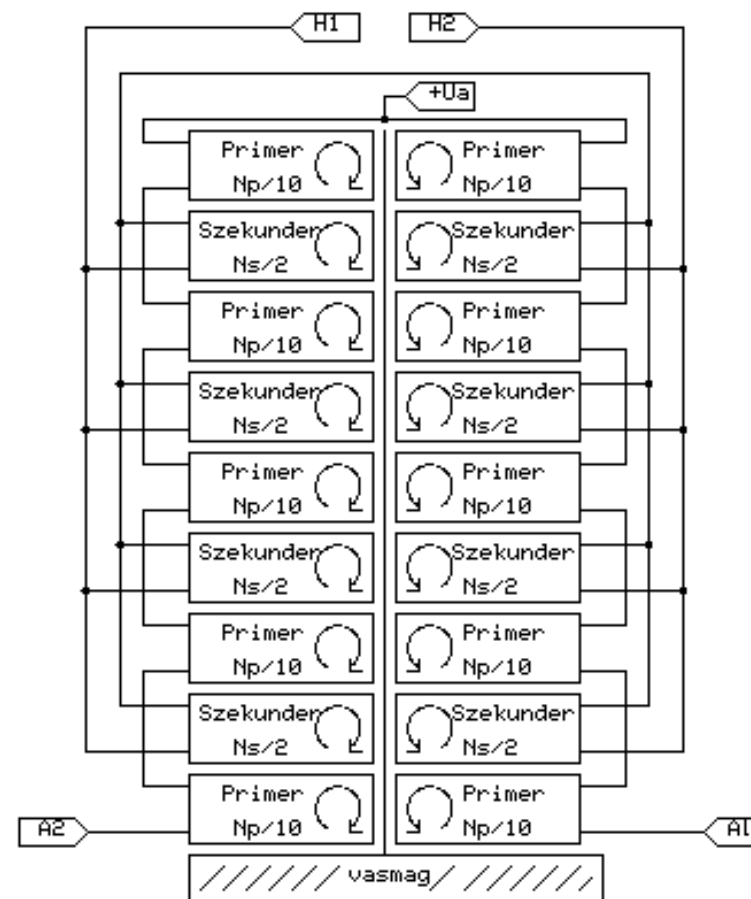
e)



b)



d)



c)

Elkészítés, kivitel.

A fentebbi ábrán bemutatom a kimenőtranszformátor szokásos elkészítésének módozatait. Mind az együtemű, mind a Push-Pull, illetve Paralell Push-Pull erősítők kivitelezhetőek a rajzon szereplő mind három módszer szerint. Mivel a Push-Pull kimenők bekötése tűnik bonyolultabbnak ezért a rajzokon inkább azt tüntettem fel. Láthatóan a kimenők szinte kizárólag osztott kivitelben készülnek, amikor is a primer tekercsei közé készítik a szekunder tekercset. Ezt a technikát nem csak a jobb csatolás megvalósításáért érdemes alkalmazni, hanem a kisebb szórt kapacitások és indukciók elérésének érdekében is. Mint láttuk a fentebbi képletben a szórások jelentősen befolyásolják a frekvencia menetet is. Ugyanakkor, a gyakorlatban nem mindig a legbonyolultabb a legjobb megoldás és ipari kivitelben gyakran kivitelezhetetlen is. Az ábra a) részén a rétegesen osztott kimenőt láthatjuk. A b) és a c) ábrákon a szimmetrikusan osztott kimenőket ábrázoltam. A c) esetében megjegyzendő, hogy a primer 10-nél nagyobb osztása már csak ront az eredményeken. Az a) és b) esetekben természetesen több osztás is lehetséges, az ábrák csak tájékoztató jellegűek. Segítség képpen bele írtam a tekercsekbe a szükséges kalkulációt, így magunk is alakíthatjuk elrendezésünket. A d) és az e) ábra részleteken a tekercsek bekötése látható. A d) esetében az AB vagy a tisztán B osztályban működő erősítők kimenőinek javalt bekötése, míg az e) inkább A osztályú erősítőknél ajánlható. Az f) részleten a vertikálisan osztott tekercselés látható, ami a fojtó tekercsek világában ismert eljárás. Ezt úgy kell elképzelni, hogy a kimenő tekercseit nem csak rétegekben oszthatjuk hanem a rétegen belül is. Ennek alkalmazása rendszerint a két fokozat közötti, úgynevezett illesztő vagy inter-valve transzformátoroknál általános.

Megépítésnél illetve tervezésnél ne hagyjuk figyelmen kívül azt a tényt, miszerint minél több részre osztjuk kimenőnk tekercseit, annál nagyobb helyet foglalnak el a szigetelések, és egyéb nem hasznos rézet tartalmazó térrészek vasmagunk ablakában. A transzformátorok kivitelezésében további nehézséget szokott eredményezni a légrés kivitelezése. A legjobban az M magok esetében biztosítható a légrés. A sokkal könnyebben lemezelhető EI magoknál rendszerint a lemezek egyoldaltól történő behelyezésével adódó légrésre szokták méretezni a transzformátorokat, ha azonban ez nem elegendő a kívánt légrést úgy alakítják ki, hogy a légrés vastagsága felének megfelelő prespán vagy más szigetelő (nem mágnesezhető) anyagot tesznek a szintén egyoldaltól lemezelt E és I tagok közé. A Hi-Fi-sták azután kedvükre próbálgathatják a légrésbe különböző anyagok viselkedését. A hangra jelentős befolyással van a légrés mérete. A napjainkban elterjedő hyperszil magok összehúzásakor keletkező légrés is bele számítandó a hasznos (vagy haszontalan) légrésbe. Sajnos speciális eszközök nélkül minden összerakásnál könnyen más és más értékek adódhatnak, ezzel más és más hangot is produkálva.

A transzformátorhoz használt vasanyagok jelentősen befolyásolják a transzformátor tulajdonságait, viselkedését. Kimenő-transzformátornak a hálózati transzformátorokhoz használt lemezek nem használatosak. Kimenő-transzformátorhoz a 4%-os vagy több szilíciumot tartalmazó lemezek használatosak. Minél több a szilícium annál jobb, de annál könnyebben törik, nehezítve ezzel a vasalást. Itt érdemes megemlítenem, hogy nem csak a vas anyagát ötvöző vagy szennyező anyagok tulajdonságai döntőek, hanem a lemezeket sajtolásuk után milyen eljárásoknak vetik alá. Ezeknek az eljárásoknak a célja a sajtoláskor keletkező a lemezek szélén a sajtoló szerszám által okozott rácsszerkezet roncsolódás helyreállítása. A hálózati, illetve annak megfelelő igénybevételű transzformátorok esetén persze erre többnyire nem fordítanak gondot, egy speciális vasmag anyagnál annál inkább. Nem akarom részletezni a szemcseorinetált, vagy a vágott, vagy az amorf anyagok tulajdonságait, már csak azért sem mert én sem nagyon tudom. Annyi bizonyos, hogy szinte új dimenziókat nyitnak mind a transzformátor méretezésében, mind az eredményezett hang minőségében. A lemezek vagy a mag anyagát

alkotó lemezek vastagsága szintén döntő befolyással bír. Itt persze a minél vékonyabb lemezek eredményezik a részletgazdagabb hangot. Egy alkalommal sikerült belecsöppennem egy trafó tesztbe amikor is 0,05 és 0,01-es lemezű, de amúgy azonos felépítésű trafók versengtek. Megdöbbentő volt hallani a vékonyabb lemezű mag részletgazdagságát, pedig a "gyengébb" is már nagyon jónak számított. Végezetül néhány trafó lemez adata:

Anyag	ρ	μ_0	$\mu_{\max}$	Gauss
Mumetal	62	30000	130000	8500
Permalloy A	20	12000	90000	11000
Permalloy B	45	2000	15000	16000
Permalloy C	60	16000	75000	8000
Cr Permalloy	65	12000	60000	8000
Mo Permalloy	55	20000	75000	8500
45 Permalloy	45	2700	23000	16000
Megaperm	97	3300	68000	9300
Hipernick	46	3000	70000	15500
4%-os szilícium	55	450	8000	19500

ρ : ellenállása mikrohmm cm-ben, μ_0 : kezdeti permeabilitás, $\mu_{\max}$: maximális permeabilitás.

Felhasznált irodalom:

Gomsch G. H.:

Híradástechnikai Transzformátorok (Műszaki könyvkiadó Budapest 1960)

R.F. Gibson:

[Output Transformer Design](#) (Wireless World, April 1955)

Berta István:

Rádiókészülékek és Erősítők (Tankönyvkiadó Budapest 1956)

Szerkesztő válaszol

Kimenő-transzformátor (Rádiótechnika 1968/12)

R.G.Keen:

Output Transformer Design and Winding

Plamen.G. Doynov:

Calculation of Output Transformers