

Transzformátorok tervezése

Többféle céllal használhatunk transzformátorokat, pl. a hálózati feszültség csökkentésére, invertereknél a feszültség növelésére, ellenállás illesztésre, mérőműszerek méréshatárának kiterjesztésére (áram- és feszültségváltók) stb. Ezen az oldalon mi főleg a hagyományos feszültség növelésre - csökkentésre fordítjuk a figyelmünket.

Mielőtt elkezdenénk a számításokat, a következő kiinduló adatokat kell meghatározni:

- U_p - a primer oldali (vagy bemenő) feszültség (V)
- U_s - a szekunder oldali (vagy kimenő) feszültség. Itt a terhelt állapotban szükséges feszültség értendő. (V)
- P_t - a transzformátor teljesítménye (VA)
- f - az üzemi frekvencia, vagy ha egy adott frekvenciasávban kell működnie a trafónak, akkor az alsó határfrekvencia (Hz)

Ahhoz, hogy az itt bemutatott számítások egyértelművé váljanak, konkrét adatokkal is számolni fogunk: Ezek legyenek a következők:

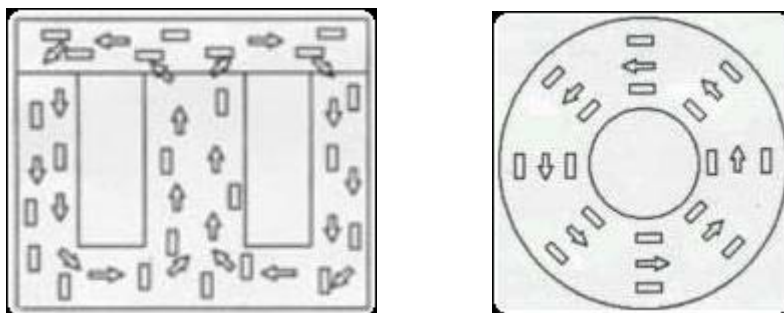
- $U_p = 220$ V
- $U_s = 15$ V
- $P_t = 100$ VA
- $f = 20\,000$ Hz

A vasmag típusának kiválasztása

A legelső lépés a vasmag kiválasztása. Itt a vasmag anyaga, mérete és alakja a fontos számunkra.

Az anyag és a forma kiválasztásánál elsősorban a kívánt hatásfok a mérvadó. Amennyiben nagyobb teljesítményeket kell átvinni, úgy a toroid vasmag az előnyösebb, mivel annak hatásfoka megközelíti a 95 %-ot. A hagyományos lemezes transzformátorok hatásfoka csak 75-85 % között van.

A hatásfok a mágneses fluxus akadályoztatása miatt olyan alacsony az E-I alakú vasmagoknál. Ezt a következő ábrán is láthatod.



1. ábra. A mágneses erővonalak haladása az EI alakú és a toroid alakú vasmagoknál

A vasmag anyagának kiválasztásakor azt kell figyelembe venni, hogy milyen frekvencián fog üzemelni a transzformátorunk. Az alacsony frekvenciákon elegendő a lágyvas lemezekből készült mag, de a magasabb frekvenciákon már ferritből készült magra van szükségünk az átviteli karakterisztika linearitásának megtartása érdekében.

A vasmag mérete az átvihető teljesítmény függvénye. Minél nagyobb a teljesítmény, annál nagyobb méretű vasmagra van szükségünk. Ennek az az oka, hogy a vasmag közvetíti a mágneses fluxust a két tekercs között, de a vasmag túl nagy fluxus esetén telítődik. A telítődés azt jelenti, hogy hiába növekszik tovább az áram a primer oldalon, az nem fog nagyobb mágneses mező változást előidézni a vasmagban, így a szekunder tekercs árama sem növekszik. Megfelelő vasmag esetén viszont ez a telítődés nem jelentkezik. Erről bővebben [itt](#) olvashatsz.

Adott inductívitás esetén a lágyvas magok nagyobb menetszámot igényelnek az alacsony permeabilitásuk miatt, mint az azonos méretű ferrit magok, így a lágyvas mag nagyobb teljesítményt tud áteresztetni, hiszen a fluxussűrűség az alkalmazott feszültség esetén alacsonyabb lesz. A ferrit magnál a fluxussűrűség növekedésének megakadályozására a feszültséget csökkenteni kell.

Bármelyik típusú mag használható transzformátorként, de mind a kettőnél kompromisszumokat kell kötnünk. A ferrit magnál kevesebb menetszámra van szükség, nagyobb a menetenkénti impedancia és a primer és szekunder tekercsek közötti csatolási tényező (k) nagyobb lesz. A lágyvas magnál nagyobb menetszámra van szükség, kisebb a menetenkénti impedancia és a primer és szekunder tekercsek közötti csatolási tényező (k) kisebb lesz, de ebben az esetben nagyobb teljesítményt tudunk átvinni.

Az adott mag maximális, gaussban megadott fluxussűrűségének (B_{max}) meghatározásához a következő tényezőket kell figyelembe venni:

- Az alkalmazott effektív feszültséget (U)
- A mágneses mező útjának cm^2 -ben megadott keresztmetszetét (A_e)

- A menetszámot (N)
- A jel MHz-ben megadott frekvenciáját (f)
- Az amperben megadott egyenáram értéket (I_{dc}) [ha a jel tartalmaz egyenáramú összetevőt]
- A mag fajlagos induktivitását (A_l)

A következő képletet mind az egyen, mind pedig a váltakozó áramokra használhatjuk:

$$B_{max} = (U \cdot 100) / (4,44 \cdot f \cdot N \cdot A_e) + (N \cdot I_{dc} \cdot A_l) / (10 \cdot A_e)$$

Ha a jel szinusz alakú, akkor 4,44-et, ha pedig négyzet alakú, akkor 4,0-t használjunk az egyenletben.

Ha a jel nem tartalmaz egyenáramú összetevőt, akkor a "+" jel után található kifejezést $(N \cdot I_{dc} \cdot A_l) / (10 \cdot A_e)$ elhagyhatjuk.

A fenti képlet segít meghatározni a mag maximálisan megengedett fluxus sűrűségét a különböző frekvenciákon. Az egyenletben az alkalmazott frekvenciasáv legalacsonyabb értékével és a legmagasabb effektív feszültséggel kell számolnunk. Néhány mérnök a csúcshőfeszültséget veszi figyelembe az effektív érték helyett, így biztosítva azt, hogy még véletlenül se telítődjön a mag.

A különböző magoknak különböző a maximálisan megengedett fluxussűrűsége. A fluxussűrűség vagy mágneses indukció (B) hivatalos SI mértékegysége a "Gauss", a gyakorlatban azonban elterjedtebb a Tesla használata:

$$1 \text{ Tesla} = 10\,000 \text{ Gauss}$$

Ennek megfelelően az adott vasmagra jellemző maximális mágneses indukció értékét - amikor még nem lép fel a telítődés - Teslában adják meg.

Példaképpen itt láthatod néhány vasmag anyagának max. megengedett fluxussűrűségét:

- Sima, szilícium: 1,2 T
- Hiperszil: 1,6 T
- SMPS-ferrit: 0,3 T

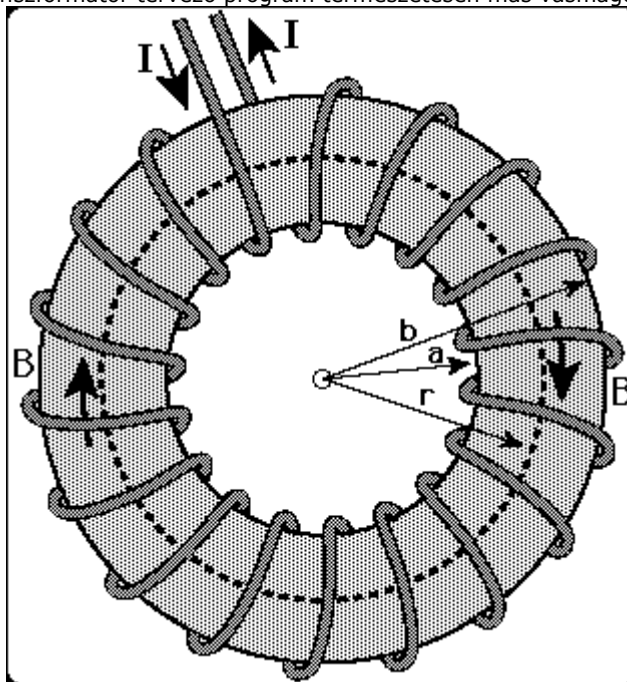
Mivel könnyebb nekünk is Teslában számolnunk, ezért osszuk el az eredményt még 10 000-rel. Az is könnyítést jelent, ha a frekvenciát nem MHz-ben, hanem csak Hz-ben adjuk meg, ezért az eredményt szorozzuk meg még egymillióval.

Ekkor a képlet így módosul:

$$B_{max} = (U \cdot 10000) / (4,44 \cdot f \cdot N \cdot A_e)$$

A vasmag szükséges keresztmetszetének meghatározása

A továbbiakban csak a toroid vasmagokkal fogunk foglalkozni azok előnyösebb tulajdonságai miatt, de ennek az oldalnak az alján található transzformátor tervező program természetesen más vasmagokra is használható.



2. ábra. Toroid vasmag a tekerccsel

A vasmag keresztmetszetét a gyakorlatban a következő megközelítő képlettel határozhatjuk meg:

$$A_e = \sqrt{P / (4 \cdot f)}$$

ahol:

- A_e - a vasmag keresztmetszete (cm^2)
- P - a transzformátor csúcsteljesítménye (mVA)
- f - az üzemi frekvencia, vagy ha egy adott frekvenciasávban kell működnie a trafónak, akkor az alsó határfrekvencia (Hz)

Tehát ha tudjuk, hogy mekkora az átvinni kívánt teljesítmény és az üzemi frekvencia, akkor meg tudjuk határozni a vasmag keresztmetszetét. Vegyük a példában megadott adatokat:

$$A_e = \sqrt{P/(4 * f)}$$

$$A_e = \sqrt{100000 \text{ mVA} / (4 * 20000 \text{ Hz})}$$

$$A_e = 1,12 \text{ cm}^2$$

Ebből már meg tudjuk határozni a vasmag méreteit.

A toroid mag megközelítőleg négyszög keresztmetszetű. Mivel az adatlapon a magasságot (h) valamint a belső (2a) és külső (2b) átmérőket adják meg, így a keresztmetszetet a következő képlettel számolhatjuk ki:

$$A_e = (b - a) * h$$

A vasmag külső (b) és belső (a) sugarainak a meghatározásakor azt is figyelembe kell vennünk, hogy elférjenek a magon a vezetékek.

Válasszuk ki egy vasmagot, például az FT-114A-77-et, aminek a terhelhetősége 140 W 20 kHz-en. Ennek a méretei a következők: a = 19 mm, b = 29 mm, h = 13,8 mm.

Ebből a vasmag keresztmetszete:

$$A_e = (2,9 - 1,9) * 1,38 = 1,38 \text{ cm}^2$$

Ez nagyon közel van az általunk kiszámolt keresztmetszethez, azaz az 1,57 cm²-hez.

Ellenőrzésként határozzuk meg a fentebb ismertetett képletek szerint a maximális terhelhetőségét ennek a kiválasztott vasmagnak.

A maximálisan megengedett teljesítmény:

$$P_{\text{max.cs}} = A_e^2 * 4 * f = 1,38^2 * 4 * 20000 = 152\,352 \text{ mW} = 152 \text{ W}$$

Az FT-114A-77 vasmag adatlapján azt olvashatjuk, hogy 140 W a maximálisan megengedett teljesítmény 20 kHz-en.

Ez is azt bizonyítja, hogy a képlet biztonságosan meghatározza a szükséges keresztmetszetet.

A menetszám meghatározása

A fentebb ismertetett képletet átalakítva kifejezhetjük a menetszámot:

$$N_p = (U_p * 10000)/(4,44 * B_{\text{max}} * A_e * f)$$

Mi azonban inkább egy másik módszerrel határozzuk meg a menetszámokat. Induljunk ki abból, hogy mekkora induktív reaktanciával kell rendelkeznie a tekercseknek, hogy az adott áramerősség folyjon rajtuk keresztül az üzemi (vagy alsó) frekvencián.

Kezdjük a primer tekercssel.

$$X_p = U_p^2 / P_t$$

Azt is tudjuk, hogy az induktív reaktancia a tekercs induktivitásának függvényében a következő képlettel határozható meg:

$$X_p = 2 * \square * f * L_p$$

A tekercs induktivitása viszont a vasmag fajlagos induktivitásának és a menetszámnak a függvénye:

$$L_p = A_l * N_p^2$$

Ebből fejezzük ki a menetszámot:

$$N_p = \sqrt{L_p / A_l}$$

$$N_p = \sqrt{X_p / (2 * \square * f * A_l)}$$

$$N_p = \sqrt{U_p^2 / (P_t * 2 * \square * f * A_l)}$$

Az általunk kiválasztott vasmag fajlagos induktivitása: $A_l = 2340 \text{ nH}$, így az értékeket behelyettesítve megkapjuk a primer tekercs menetszámát:

$$N_p = \sqrt{220^2 / (100 * 2 * 3,14 * 20000 * 2340 * 10^{-9})}$$

$$N_p = 40,58 \text{ menet}$$

Ezt kerekítjük 41 menetre.

A szekunder tekercs menetszámát hasonló módon kapjuk meg:

$$N_s = \sqrt{U_s^2 / (P_t * 2 * \square * f * A_l)}$$

$$N_s = \sqrt{15^2 / (100 * 2 * 3,14 * 20000 * 2340 * 10^{-9})}$$

$$N_s = 2,76 \text{ menet}$$

Ezt kerekítjük 3 menetre.

Ellenőrizzük le, hogy nem fog-e telítődni a vasmagunk az adott menetszám és effektív feszültség mellett:

$$B = (U_p * 10000)/(4,44 * f * N * A_e)$$

$$B = (220 * 10000)/(4,44 * 20000 * 41 * 1,38)$$

$$B = 0,437 \text{ Tesla}$$

Mivel a ferrit magok megengedett maximális fluxussűrűsége 0,2 - 0,4 T között van, ezért itt már fennáll a telítődés veszélye. Ha nem akarjuk lecserélni a vasmagot egy másikra, akkor pl. a frekvenciát növelhetjük, ez viszont maga után vonja a menetszám megváltozását is. Ha pl. a frekvenciát megnöveljük 50 kHz-re, akkor a primer tekercs menetszáma lecsökken 26 menetre, a szekunder tekercs menetszáma pedig 2-re. Ekkor a maximálisan fellépő fluxussűrűség 0,276 Tesla. Ez már a megengedett tartományban van.

A huzalátmérők meghatározása

A huzalátmérő meghatározásánál az a cél, hogy a lehető legkisebb veszteség lépjen fel a tekercsekben, amihez a lehető legkisebb ellenállással kell rendelkeznie a vezetékeknek. Viszont az is cél, hogy a méretek minimálisak maradjanak.

Először a tekercsekben folyó maximális áramokat kell meghatározni.

$$I = P / U$$

A primer oldalon a feszültség 220 V, a transzformátor teljesítménye pedig 100 VA. Ebből meghatározhatjuk a primer tekercs maximális áramát:

$$I_p = P / U_p = 100 / 220 = 0,45 \text{ A}$$

A szekunder tekercs maximális árama pedig:

$$I_s = P / U_s = 100 / 15 = 6,7 \text{ A}$$

A valóságban a szekunder tekercs maximális árama ennél kisebb lesz a transzformátorok veszteségei miatt, de a vezeték méretezésénél ezzel az értékkel számolhatunk. Itt ismét egy gyakorlati képletet fogunk használni.

A primer tekercs vezetékének minimális átmérője:

$$D_p = 1,13 * \sqrt{I_p / 2,5} = 1,13 * \sqrt{0,45/2,5} = 0,466 \text{ mm}$$

Ezt kerekítjük 0,5 mm-re.

A szekunder tekercs vezetékének minimális átmérője pedig:

$$D_s = 1,13 * \sqrt{I_s / 2,5} = 1,13 * \sqrt{6,7/2,5} = 1,79 \text{ mm}$$

Ezt kerekítjük 1,8 mm-re.

A tekercsek méretének ellenőrzése

A számításokkal meg is vagyunk, de van még egy - a gyakorlatban fontos - tényező, ez pedig a tekercsek valódi méretei. Ha nem jól számoltunk, akkor a tekercsek nem fognak elférni a vasmagon. Kellemetlen volna, ha ez az utolsó menetnél derülne ki. Ezért ki kell számolnunk a tekercsek által fizikailag elfoglalt tér méretét, majd azt össze kell vetni a vasmag méreteivel.

A gyakorlatban nem képletekkel számolnak a szakemberek, hanem táblázatokat használnak. Ezért nem akadtam olyan képletekre, amikkel itt dolgozhatnánk, tehát magunknak kell a képleteket megszerkeszteni.

Próbáljuk meg egy "egyszerű" képlet segítségével meghatározni a minimálisan szükséges sorok számát. Mint látjuk, itt egy számtani sorozattal van dolgunk. Megkíméllek a levezetéstől, csak a végeredményt írom fel.

$$n_p = \{ k - (2 * N_1) + \sqrt{[(k - (2 * N_1))^2 - (8 * k * (-M))]} \} / 2 * k$$

ahol:

- n_p - a primer tekercs sorainak száma
- k - az egyes sorok közötti menetkülönbség ($N_2 - N_1$). Ez negatív szám, s mindig $-2 * \square = -6,28$
- N_1 - az első sor meneteinek száma ($2 * \square * (a - (D_p/2)) / D_p$)
- M - a tekercs teljes menetszáma (a mi példánkban 26 menet)

Behelyettesítve a számokat a primer tekercs sorainak száma:

$$n_p = 0,12$$

Ezt felfelé kerekítve 1 sort kapunk.

A szekunder tekercs sorainak számát ugyanezzel a képlettel számoljuk ki, annyi a különbség, hogy:

$$n_s = \{ k - (2 * N_2) + \sqrt{[(k - (2 * N_1))^2 - (8 * k * (-M_2))]} \} / 2 * k$$

- az első sor kerületénél nem a vasmag belső átmérőjével számolunk, hanem a primer tekercs legszélső sorának a külső szélével. $a_1 = (a - (n_p * D_p)) - (D_s/2) = 19 - (1 * 0,6) - (1,9/2) = 17,45 \text{ mm}$.
- A szekunder tekercs vezetékének átmérője $D_s = 1,8 + 0,1 = 1,9 \text{ mm}$
- N_2 - az első sor meneteinek száma ($2 * \square * (a_1 - (D_s/2)) / D_s$)
- M_2 - a teljes menetszám (a mi példánkban 2 menet)

Ezek alapján a szekunder tekercs sorainak száma:

$$n_s = 0,03$$

ezt kerekítjük 1-re.

Ebből már látjuk, hogy a tekercsek vastagsága:

$$h = (D_p * n_p) + (D_s * n_s) + (3 * h_{\text{sziget}})$$

A h_{sziget} a tekercsek közötti szigetelő anyag vastagsága mm-ben. Azért kell beszoroznunk 3-mal, mert először a vasmagot szigeteljük le, majd a primer tekercset, végül pedig a szekunder tekercset.

$$h = (0,6 * 1) + (1,9 * 1) + (3 * 1) = 5,5 \text{ mm}$$

Mivel a vasmag belső sugara 19 mm, ezért az 5,5 mm-es tekercs és szigetelő vastagság bőven elfér. A cél az, hogy legalább 10 mm átmérőjű lyuk maradjon. Ehhez képest a mi esetünkben $2 * (19 - 5,5) = 27 \text{ mm}$ átmérőjű lyuk marad, tehát fizikailag kivitelezhető a transzformátorunk.

A vezeték hosszának kiszámítása

Végezetül számoljuk ki, hogy milyen hosszú vezetékre van szükségünk a tekercsekhez.

Kezdjük ismét a primer tekercssel. Az első sorban egy menet hosszát a következő képlettel tudjuk kiszámolni:

$$h_{\text{menet1}} = 2 * (h + (2 * D_p) + (b - a) + (2 * h_{\text{sziget}}))$$

ahol:

- h - a vasmag magassága (a mi példánkban 13.8 mm)
- b - a vasmag külső átmérője (a mi példánkban 29 mm)
- a - a vasmag belső átmérője (a mi példánkban 19 mm)
- D_p - a primer tekercs átmérője (a mi példánkban 0,6 mm)
- h_{szig} - a vasmagon lévő szigetelő anyag vastagsága (1 mm)

tehát:

$$h_{menet1} = 2 \cdot (13,8 + (2 \cdot 0,6) + (29 - 19) + (2 \cdot 1))$$

$$h_{menet1} = 54 \text{ mm}$$

Ha a tekercs több mint egy sorból áll, akkor a következő sorban az egy menetre jutó vezeték hossz megnövekszik az első sorhoz képest $4 \cdot D_p$ -vel.

$$h_{menet2} = h_{menet1} + (4 \cdot D_p)$$

tehát:

$$h_{menet2} = 54 + (4 \cdot 0,6)$$

$$h_{menet2} = 56,4 \text{ mm}$$

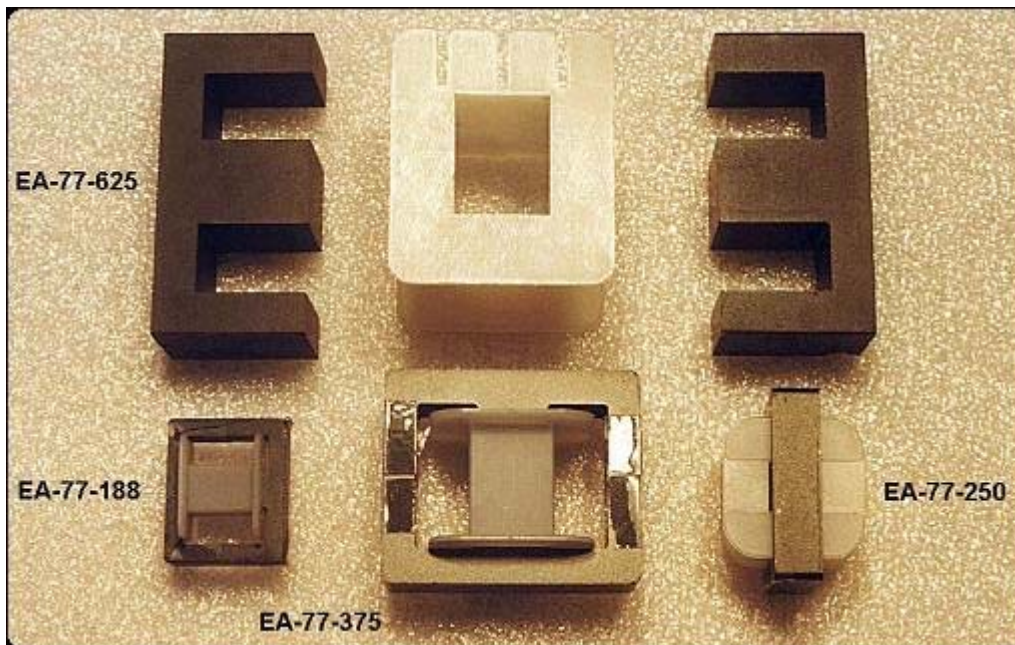
Viszont a következő sorban már 7-tel (azaz 6,28-dal) kevesebb menet fér el, ezért a következő sorba feltekerhető vezeték hosszát már a $h_{menet2} \cdot N_2$ képlettel számolhatjuk ki. Végül össze kell adni az egyes sorokban feltekert vezeték hosszát, majd az eredményhez a biztonság kedvéért még egy-két métert hozzáteszünk.

A szekunder tekercs hosszát a primer tekercshez hasonlóan tudjuk meghatározni.

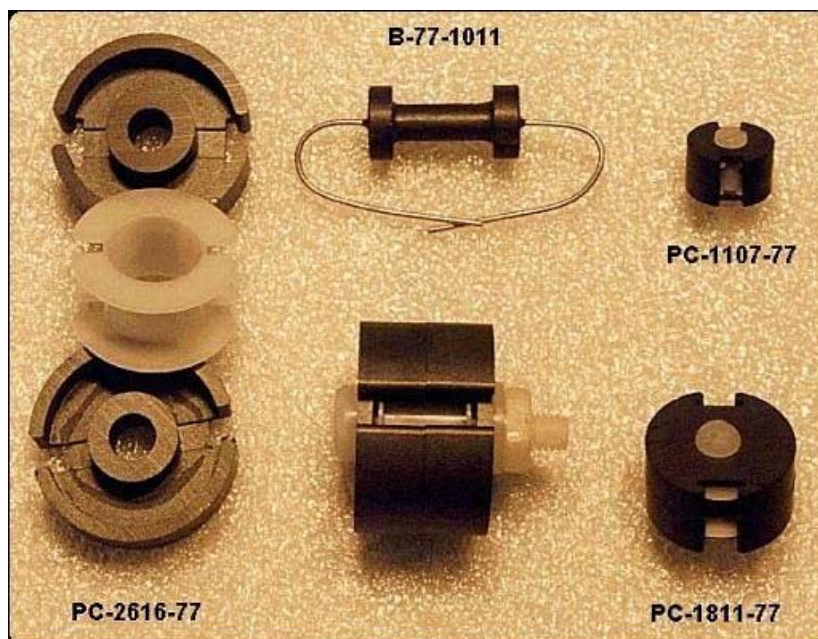
Egyéb vasmagok

Eddig csak a toroid vasmaggal foglalkoztunk, de ezen kívül még vannak más típusú vasmagok is, mint pl. E mag, EI mag, I mag, Fazékmag stb.

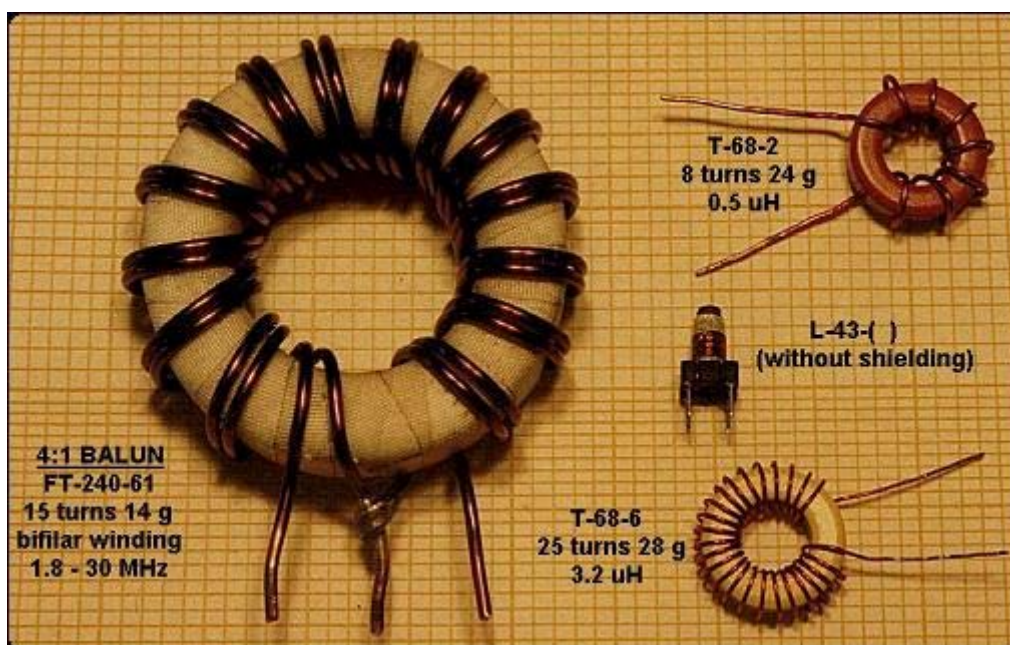
Ezekről láthatunk párat mutatóban a következő képeken:



4. ábra. E-magok



5. ábra. Fazék- és orsó-magok



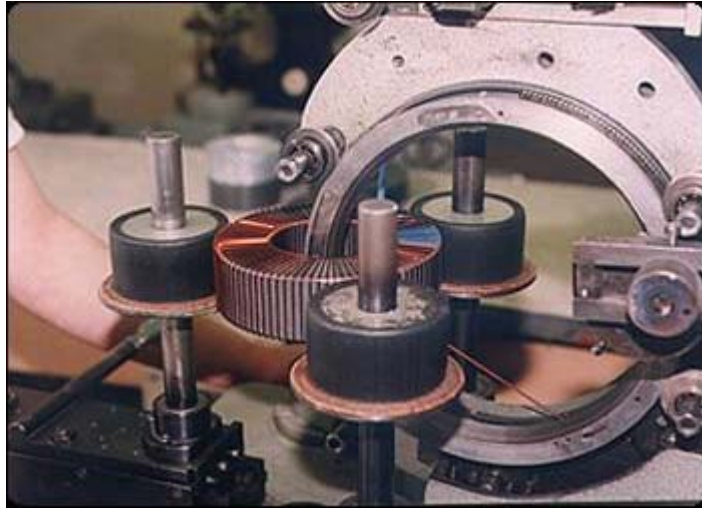
6. ábra. Toroid magok

A tekercselés

A tekercselést a primer tekercssel kezdjük, majd megfelelő szigetelés után arra jön rá a szekunder tekercs. A kivezetéseket Mipolán szigetelőcsőben hozd ki. Mérd meg a szigetelési ellenállást a primer és a szekunder tekercsek között. Ennek legalább 2 M Ω -nak kell lennie. Utána mérd le a szekunder feszültségeket. Ha minden jónak tűnik, akkor Araldittal vagy más kétkomponensű műgyantával kend be jól az egészet, hogy ne zümmögjön a trafód.

Fontos, hogy a tekercsek ne csak a vasmag egy részén legyenek elhelyezve, hanem körben, az egész vasmag mentén. Ez csökkenti a transzformátorban fellépő veszteségeket.

A kézi tekercselés nagyon fárasztó munka, ezért a transzformátort gyártó üzemekben ezt tekercselő gépekkel végzik.



7. ábra. A toroid transzformátor gépi tekercselése