

## Transformator

Vsebina: Zapis enačb transformatorja kot dveh sklopljenih tuljav, napetostna prestava, povezava med maksimalnim fluksom in napetostjo, neobremenjen transformator in magnetilni tok, obremenjen transformator in ravnotežni tok, tokovna prestava, enačba magnetnega ravnotežja, ponazoritev tokov in napetosti na neobremenjenem in obremenjenem transformatorju s kazalci (kompleksorji), reducirane vrednosti (sekundarne napetosti, toka in impedance bremena), moč na primarju in bremenu, vhodna impedanca, realni transformator.

Equation Section 22



Einphasen Transformatoren auf EI Kernen  
Transformateurs monophasés sur noyaux EI  
Single-phase transformers on EI cores



Größe Grandeur Size	Leistung Pissance Power	Max. Maße in mm Dimensions max. en mm Max. dimension in mm	Gewicht Poids Weight
	VA	A x B x C	kg
EI 30/10-18	0,5-2	30 x 35 x 35	0,10-0,20
EI 30/13	2	35 x 31 x 50	0,18
EI 40/14-20	3-5	42 x 32 x 55	0,20-0,30
EI 40/16-20	5-10	45 x 43 x 51	0,25-0,35
EI 54/18	8-15	54 x 45 x 74	0,40
EI 60/21-25-31	12-30	60 x 55 x 85	0,50-0,50
EI 65/23-34	25-35	66 x 59 x 71	0,75-1,0
EI 70/27-36	30-60	75 x 64 x 73	1,1-1,5
EI 84/29-32	50-75	84 x 66 x 69	1,5-1,8
EI 84/35-43-52	70-110	84 x 75 x 82	1,9-2,2
EI 95/35-45-59	100-240	96 x 77 x 101	2,3-3,7
EI 105/37-45-60	140-260	105 x 79 x 102	2,7-4,3
EI 105/39-48	150-220	108 x 86 x 102	2,6-3,6
EI 105/36-52-65	130-270	108 x 78 x 105	3,2-4,8
EI 120/41-53	180-300	120 x 86 x 100	4,5-5,5
EI 120/61-73	280-500	120 x 105 x 120	5,5-7,3
EI 135/40-52-57	300-460	135 x 95 x 115	5,5-7,2



**SLIKA: Primer različnih tipov transformatorjev podjetja Elma TT. Osnovni informaciji sta navidezna moč in dimenzije transformatorja. <http://www.elmatt.si/>**

Transformator je primer posebno zanimive električne naprave, ki jo lahko obravnavamo kot posebno obliko vezja s sklopljenima tuljavama (lahko tudi več sklopljenih tuljav). Zanimiv ni le teoretično, temveč predvsem zaradi njegove pogoste uporabe. S transformatorjem lahko zvišamo ali znižamo izmenično napetost, prilagodimo breme, ga uporabimo za merjenja, kot ločilni transformator, itd.. Ne vsebuje gibljivih delov in je s tem njegova življenska doba dolga, poleg tega pa z dokaj dobrim magnetnim sklepom omogoča relativno majhne izgube pri pretvarjanju iz višje v nižjo napetost in obratno.

V osnovi lahko transformator predstavimo kot dvovhodno vezje s sklopljenima tuljavama. Vhodna in izhodna stran sta v principu enakovredni, saj lahko z zamenjavo strani zvišamo ali znižamo izhodno napetost, impedanco, tok.

**SLIKA:** Transformator je naprava, ki ima dve navitji na skupnem jedru iz feromagnetnega materiala. Ločimo primarno in sekundarno navitje. a) transformator v obliki dveh navitij na jedru, b) transformator predstavljen s koncentriranimi elementi in c) transformator kot dvovhodno vezje.

V obliki koncentriranih elementov ga lahko predstavimo s sklopljenima tuljavama. Vzemimo idealno sklopljeni tuljavi s faktorjem sklopa enak 1. Tedaj bo zveza med lastnima induktivnostima navitij in medsebojno induktivnostjo sledeča:  $M = \sqrt{L_1 L_2}$ .

Vhodno napetost na eni strani zapišemo kot

$$\underline{U}_1 = j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2. \quad (22.1)$$

To stran bomo imenovali **primarna**, drugo stran pa **sekundarna**. Primarna stran je običajno priključena na napajalno napetost (vir), sekundarna pa na breme. Ker smo toka in pike označili tako, da se fluksa obeh tuljav podpirata, bo napetost na drugi strani (sekundarni) enaka

$$\underline{U}_2 = j\omega L_2 \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1. \quad (22.2)$$

Če iz te enačbe izrazimo vhodni tok, dobimo

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{j\omega M} - \frac{L_2}{M} \underline{I}_2. \quad (22.3)$$

Če sedaj to enačbo vstavimo v prvo (22.1), dobimo:

$$\underline{U}_1 = j\omega L_1 \left( \frac{\underline{U}_2}{j\omega M} - \frac{L_2}{M} \underline{I}_2 \right) + j\omega M \underline{I}_2 \quad (22.4)$$

S preureditvijo dobimo

$$\underline{U}_1 = \frac{j\omega L_1}{j\omega M} \underline{U}_2 + j\omega \left( M - \frac{L_1 L_2}{M} \right) \underline{I}_2 \quad (22.5)$$

Ker pa je pri idealnem sklepu ( $k = 1$ )  $M = \sqrt{L_1 L_2}$ , je drugi člen enačbe (22.5) enak nič, in je

$$\underline{U}_1 = \frac{L_1}{M} \underline{U}_2 = \frac{L_1}{\sqrt{L_1 L_2}} \underline{U}_2 = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \underline{U}_2. \quad (22.6)$$

Pridemo do zanimivega zaključka, da je izhodna napetost odvisna le od razmerja lastnih induktivnosti tuljav. Za te pa vemo, da so sorazmerne kvadratu ovojev, saj velja  $L = \frac{N^2}{R_m}$ , kjer je  $R_m$

magnetna upornost tuljave in bo torej

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \sqrt{\frac{N_1^2/R_m}{N_2^2/R_m}} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad (22.7)$$

To enačbo lahko zapišemo tudi samo z amplitudami vhodne in izhodne napetosti:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = n.$$

Dobili smo mnogim srednješolcem znan izraz, da je razmerje med vhodno in izhodno napetostjo enako razmerju števila ovojev  $n$ . Temu razmerju rečemo tudi **napetostna prestava**.

**Primer:** Na primarju s 100 ovoji imamo priključen generator izmenične napetosti z amplitudo 320 V. Kolikšno število ovojev potrebujemo za sekundarno navitje, da bo amplituda izhodne napetosti 50 V?

Izračun:  $N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 100 \frac{50 \text{ V}}{320 \text{ V}} \approx 15,6.$

**Napetostna prestava in maksimalni fluks v jedru.** Do izraza za napetostno prestavo lahko pridemo tudi na nekoliko bolj preprost način, če predpostavimo idealni transformator brez priključenega bremena. Potem je inducirana napetost na primarni strani enaka časovni spremembi magnetnega sklepa, torej  $u_{i1} = -N_1 \frac{d\Phi_{gl}}{dt}$ , na sekundarni pa  $u_{i2} = -N_2 \frac{d\Phi_{gl}}{dt}$ . Če trenutne vrednosti napetosti izrazimo z maksimalnimi (ali efektivnimi), dobimo

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = n. \text{ Pogosto se zapis inducirane napetost s spremembo fluksa izkoristi za izpeljavo zveze}$$

med inducirano napetostjo in fluksom. Če izraz zapišemo s kompleksorji v obliki  $\underline{u}_{i1} = -N_1 \frac{d\Phi_{gl}}{dt}$

in predpostavimo, da se glavni fluks spreminja harmonično, bo kompleksor inducirane napetosti na primarni strani

$$\underline{U}_{i1} = -N_1 j\omega \underline{\Phi}_{gl}. \quad (22.8)$$

Fluks običajno zapišemo z maksimalno vrednostjo, napetost pa z efektivno. V tem smislu bo efektivna vrednost inducirane napetosti na primarni strani

$$U_{i1,ef} = |\underline{U}_{i1,ef}| = N_1 2\pi f \frac{\Phi_{gl,max}}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \Phi_{gl,max}. \quad (22.9)$$

Na enak način bi lahko zapisali za sekundarno stran  $U_{i2,ef} = 4,44 f N_2 \Phi_{gl,max}$ . Ti enačbi pogosto zasledimo v učbenikih, pa tudi v priročnikih, saj lahko služijo oceni velikosti gostote magnetnega pretoka v jedru, to pa je pomembno za pravilno dimenzioniranje transformatorja. Enačba je »nerodna« le v toliko, da je inducirana napetost izražena z efektivno, fluks pa z maksimalno vrednostjo.

**Primer:** Enofazni 50 Hz transformator ima na primarni strani 25, na sekundarni pa 300 ovojev. Jedro ima presek  $300 \text{ cm}^2$ . Določimo največjo gostoto pretoka v jedru, če je transformator na primarni strani priključen na napetost 250 V (efektivno).

Izračun:  $250 \text{ V} = 4,44 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 25 \cdot B \cdot 300 \text{ cm}^2$ ,  $B = 1,5 \text{ T}$ .

Komentar: v smislu načrtovanja transformatorja bi morali sedaj preveriti, ali smo pri ocenjeni vrednosti polja posegli v področje magnetilne krivulje, ki se približuje ali celo presega nasičenje. V tem primeru lahko zaradi izrazite nelinearnosti induktivnosti v tem območju pričakujemo tudi nelinearno (popačeno glede na vhodni signal) izhodno napetost. Rešitev moramo v tem primeru iskati v primerni izbiri materiala za jedro, večjem preseku jedra, ...

**Magnetilni tok.** Vrnimo se še malo na naš zapis enačb transformatorja z lastnimi in medsebojnimi induktivnostmi. Če so na sekundarni strani sponke odprte, teče na primarni strani tok

$$I_1 = \frac{U_1}{j\omega L_1} = I_{1m}. \quad (22.10)$$

Temu toku rečemo **magnetilni tok**, ki je očitno tok, ki pozroča fluks v jedru transformatorja. Ta tok je v fazi s fluksom.

**Obremenjen transformator.** Če na sekundarno navitje transformatorja priključimo breme, rečemo, da je transformator **obremenjen**. Tedaj tok  $I_2$  ni več enak nič, pač pa je  $-\underline{I}_2 = \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_b}$ .

Sedaj bomo imeli dva toka, ki magnetita jedro. Celotna magnetna napetost bo torej (glede na označbe) vsota posameznih magnetnih napetosti:

$$\underline{\Theta} = N_1 \underline{I}_1 + N_2 \underline{I}_2. \quad (22.11)$$

Ta magnetna napetost bo neodvisna od bremenskega toka, saj se priključena napetost in s tem inducirana napetost na primarni strani (ki je v idealnih razmerah enaka priključeni napetosti) ni spremenila. Nespremenjena magnetna napetost bo torej enaka

$$\underline{\Theta} = N_1 \underline{I}_{1m}, \quad (22.12)$$

kjer  $\underline{I}_{1m}$  imenujemo **magnetilni tok**. Veljati mora torej  $N_1 \underline{I}_{1m} = N_1 \underline{I}_1 + N_2 \underline{I}_2$  oziroma s preureditvijo  $N_1 (\underline{I}_1 - \underline{I}_{1m}) = -N_2 \underline{I}_2$ . Razliko celotnega toka v primarju in magnetilnega toka imenujemo **ravnotežni tok**:  $\underline{I}_{1r} = \underline{I}_1 - \underline{I}_{1m}$ . To je tok, ki mora teči v primarnem navitju poleg magnetilnega. Velja torej

$$N_1 \underline{I}_{1r} = -N_2 \underline{I}_2. \quad (22.13)$$

Ta tok bo očitno »držal ravnotežje« vplivu toka  $\underline{I}_2$  na primarni strani, tako, da bo inducirana napetost nespremenjena.

Povzemimo: Če je transformator neobremenjen, je vhodni tok enak magnetilnemu toku, ki je potreben za magnetenje (in razmagnetenje jedra). Če pa je transformator obremenjen, je tok primarja vsota magnetilnega in ravnotežnega toka, pri čemer je magnetilni tok običajno dosti manjši od ravnotežnega:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1m} + \underline{I}_{1r} \approx \underline{I}_{1r} = -\frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2.$$

\*Ta pomemben rezultat, da bo razmerje tokov (približno) obratno sorazmerno številu ovojev zapišimo še enkrat:

$$\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = -\frac{1}{n} \quad (22.14)$$

Ta izraz imenujemo tudi **tokovna prestava**.

Če upoštevamo le absolutne vrednosti tokov, je enačba enaka le brez minusa:  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{n}$ .

\* Negativen predznak pri tokovni prestavi se pogosto v literaturi ne pojavlja. Tu je posledica tega, da tokove pišemo s kompleksorji in da smo označili tok  $\underline{I}_2$  v nasprotni smeri kot tok bremena.

**Primer:** Idealni transformator je priključen na izmenično napetost z efektivno vrednostjo 240 V in ima na sekundarju z napetostjo 12 V (efektivno) priključeno 150 W žarnico. Določimo napetostno prestavo in tok bremena in tok primarja.

$$\text{Izračun: } n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{240 \text{ V}}{12 \text{ V}} = 20. \quad I_b = \frac{P_b}{U_2} = \frac{150 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 12,5 \text{ A}, \quad I_1 = \frac{I_b}{n} = \frac{12,5 \text{ A}}{20} = 0,625 \text{ A}.$$

Združeni enačbi (22.11) in (22.12) imenujemo tudi **enačba magnetnega ravnotežja**

$$N_1 \underline{I}_1 + N_2 \underline{I}_2 = N_1 \underline{I}_{1m}, \quad (22.15)$$

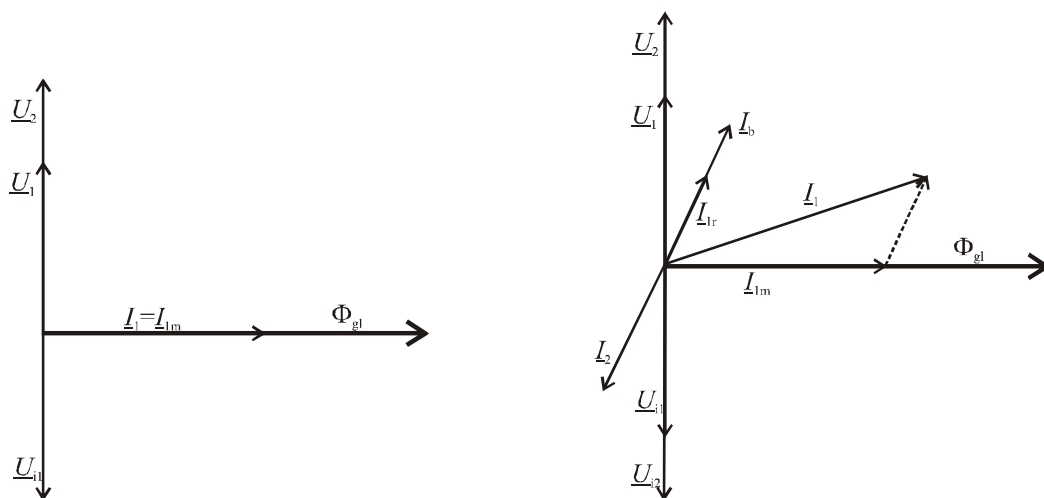
saj pove, da je v idealiziranem transformatorju rezultatna (celotna) magnetna napetost konstantna – neodvisna od obremenitve. To pa tudi pomeni, da je v idealnem transformatorju glavni fluks v jedru neodvisen od obremenitve, enak je v primeru, ko je transformator neobremenjen kot tedaj, ko je obremenjen. Pri realnem transformatorju se zaradi izgub glavni fluks pri obremenitvi celo nekoliko zmanjša.

### **Ponazoritev tokov in napetosti na neobremenjenem in obremenjenem transformatorju s kazalci (kompleksorji).**

Neobremenjen transformator: Običajno rišemo kazalce (kompleksorje) tako, da postavimo kazalec glavnega fluksa v jedru v smeri realne osi (predpostavimo, da je kosinusna funkcija). Kazalec inducirane napetosti na primarju v skladu z enačbo  $\underline{U}_{i1} = -N_1 j \omega \underline{\Phi}_{gl}$  zaostaja za  $\frac{\pi}{2}$ . Hkrati ugotovimo, da je kazalec priključene napetosti pri neobremenjenem transformatorju ravno nasprotnega predznaka od inducirane napetosti:  $\underline{U}_1 = -\underline{U}_{i1}$  in torej prehiteva kazalec fluksa za  $\frac{\pi}{2}$ .

Magnetilni tok je v fazi z glavnim fluksom, saj je to tok, ki ta fluks povzroča. V skladu z napetostno prestavo je kazalec inducirane napetosti sekundarja enako usmerjen kot kazalec inducirane napetosti primarja, kar je hkrati tudi napetost na zunanjih sponkah sekundarja.

Obremenjen transformator: Vzemimo, da obremenimo transformator z bremenom induktivnega značaja. V tem primeru tok  $\underline{I}_b$  zaostaja za napetostjo sekundarja za določen kot  $\varphi_2$ . Kot kompenzacija teče v primarju t.i. magnetilni tok, ki je nasprotnega predznaka glede na tok  $\underline{I}_2$  in enakega kot  $\underline{I}_b$ . Tok primarja je sedaj vsota ravnotežnega in magnetilnega toka.



**SLIKA: Komplexorji glavnega fluksa, priključene napetosti, induciranih napetosti in napetosti na bremenu: a) neobremenjen transformator, b) obremenjen transformator.**

### Reducirane vrednosti napetosti in tokov.

Za analizo delovanja se pogosto uporabljajo t.i. reducirane veličine, ki jih dobimo na sledeči način: enačbo (22.15) delimo z  $N_1$  in dobimo enačbo oblike

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_{1m}, \quad (22.16)$$

kjer smo zapisali tok  $\underline{I}'_2$  zapisali kot  $\underline{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_2}{n}$ . Ta tok **imenujemo reducirana vrednost sekundarnega toka**, namen tega zapisa pa je predvsem v tem, da lahko tvorimo preprosto nadomestno vezje z nereducirano primarno stranjo in reducirano sekundarno stranjo. Pri tem je

potrebno »reducirati« tudi sekundarno napetost kot  $\underline{U}'_2 = n\underline{U}_2$ , pa tudi bremensko upornost, saj

$$\text{velja } \underline{Z}'_b = \frac{\underline{U}'_2}{\underline{I}'_2} = n^2 \underline{Z}_b.$$

**SLIKA: Nadomestna shema idealnega transformatorja prikazana z reduciranimi vrednostmi.**

**Moč.** Kompleksor moči na primarju je

$$\underline{S}_1 = \frac{1}{2} \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = \frac{1}{2} \underline{U}_1 (\underline{I}_{1m}^* + \underline{I}_{1r}^*) = \frac{1}{2} \underline{U}_1 \underline{I}_{1m}^* - \frac{1}{2} \underline{U}_2 \underline{I}_2^* = \underline{S}_{1m} + \underline{S}_2 \quad (22.17)$$

Moč na bremenu je manjša od moči na vhodu za jalovo moč magnetenja  $\underline{S}_{1m}$ . Le-ta pa je običajno dosti manjša od moči na bremenu, torej bo veljalo

$$\underline{S}_1 \cong \underline{S}_2 \quad (22.18)$$

Kar pomeni, da je v idealnih razmerah moč bremena enaka moči na vhodu.

**Vhodna impedanca transformatorja.** Vhodno impedanco dobimo iz kvocienta

$$\underline{Z}_{vh} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}. \quad (22.19)$$

S preureditvijo osnovnih enačb transformatorja in ob predpostavki, da bo bremenska upornost

mного manjša od induktivnih upornosti, bo  $\underline{Z}_{vh} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \cdot \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_2} \cdot \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_2} = -n^2 \frac{\underline{U}_2}{-\underline{I}_2} = n^2 \underline{Z}_b$

$$\underline{Z}_{vh} \approx n^2 \underline{Z}_b \quad (22.20)$$

Rezultat, ki bi ga pričakovali tudi iz nadomestnega vezja idealnega transformatorja z reduciranimi komponentami.

**Realni transformator z železnim jedrom.** Realni transformator se od idealnega razlikuje predvsem po tem, da pri upoštevanju še ohmske upornosti primarnega in sekundarnega navitja ter sipana magnetna pretoka primarne in sekundarne tuljave (tisti pretok, ki gre le skozi ovoje ene, ne pa tudi druge tuljave). To lahko v nadomestnem vezju predstavimo z ohmskima upornostima ter induktivnostima v primarnem (sekundarnem) tokokrogu.



**SLIKA: Nadomestna shema realnega transformatorja z upoštevanjem ohmske upornosti primarnega in sekundarnega navitja in sipanih magnetnih pretokov primarne in sekundarne tuljave (navitja).**

**Vprašanja za obnovo:**

- 1) Ponazoritev transformatorja kot dvopolno vezje s sklopljenima tuljavama.
- 2) Zapis enačb za analizo idealnega transformatorja.
- 3) Napetostna prestava.
- 4) Neobremenjen transformator. Magnetilni tok. Kaj je njegova »funkcija«.
- 5) Zveza med fluksom v jedru in napetostjo na primarju.
- 6) Obremenjen transformator. Ravnotežni tok.
- 7) Tokovna prestava.
- 8) Ponazoritev tokov in napetosti neobremenjenega in obremenjenega transformatorja s kompleksorji v kompleksni ravnini.
- 9) Enačba magnetnega ravnotežja.
- 10) Vhodna in izhodna moč transformatorja.
- 11) Vhodna impedanca transformatorja.
- 12) Izgube v transformatorju.
- 13) Nadomestno vezje idealnega in realnega transformatorja.

**\* Osnove dimenzioniranja transformatorjev v praksi.**

Za optimalno načrtovanje transformatorjev je potrebno upoštevati mnogo dejavnikov, od katerih je najpomembnejša moč primarja, ki je določena s produktom toka in napetosti primarja<sup>†</sup>  $\frac{1}{2}U_1I_1$ , podana v VA. Pravilna izbira jedra bo odvisna od tega, da pri tej moči jedro še ne bo prišlo v nasičenje. V ta namen moramo poznati vrednost gostote magnetnega pretoka v nasičenju oz. točko, do katere je magnetilna krivulja še razmeroma linearna. Do primerne enačbe za potreben presek jedra pridemo z množenjem enačbe (22.9) z efektivnim tokom primarja. Dobimo

$$S_1 = U_{1,ef} I_{1,ef} = 4,44 f N_1 \Phi I_{1,ef} = 4,44 f B^2 A_{Fe}^2 \frac{1}{\Phi} N_1 I_{1,ef}. \quad S \text{ preureditvijo enačbe dobimo}$$

aproximativni izraz, ki je znan v praksi, to je, da je v prvi aproksimaciji primerna površina preseka jedra enaka

$$A_{Fe} = C \sqrt{S_1 / f}, \quad (22.21)$$

kjer je konstanta C odvisna od oblike transformatorja. Po praksi in izkušnjah je njena vrednost enaka  $7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \sqrt{\text{Ws}}$ , kar pri gostoti 1 T in frekvenci 50 Hz da znan aproksimativni izraz

<sup>†</sup> Pogosto se pri dimenzioniranju transformatorjev uporabljajo efektivne vrednosti tokov in napetosti. To smo ugotovili že pri enačbi (22.9), kjer je bila inducirana napetost izražena kot efektivna vrednost, fluks v jedru pa kot maksimalni.

$A_{fe} \approx \sqrt{S_1}$  v  $\text{cm}^2$ . Iz enačbe (22.21) je razvidno, da je potreben presek jedra manjši pri višjih frekvencah. To je t.i. čisti presek jedra, ki ne upošteva površine laminacije, za določitim končnega (geometričnega preseka) je potrebno upoštevati še t.i. polnilni faktor jedra.

Tudi število ovojjev primarja določimo iz enačbe (22.9), ki jo zapišemo v obliki  $U_{i,ef} = 4,44 f N_1 B A_{Fe}$ . Površino  $A_{Fe}$  smo določili iz (22.21), gostota magnetnega pretoka je okoli 1 do 1,2 T za vroče valjano silicijevoželezno pločevino. Za število ovojjev sekundarja lahko upoštevamo napetostno prestavo, v praksi pa lahko zaradi izgub upoštevamo potrebno povečanje števila ovojjev z množenjem s faktorjem 1,1, do 1,2.

Potrebno površino prereza (premera) žice določimo iz toka v primarnem in sekundarnem navitju glede na še dopustno segretje navitja, ki je določeno z gostoto toka. Tok primarja je  $I_{1,ef} = \frac{S_1}{U_{1,ef}}$ ,

gostota toka pa  $J = \frac{I_{1,ef}}{A_{Cu}}$ , od koder je  $A_{Cu} = \frac{I_{1,ef}}{J}$ . Če vzamemo v praksi pogosto uporabljeno

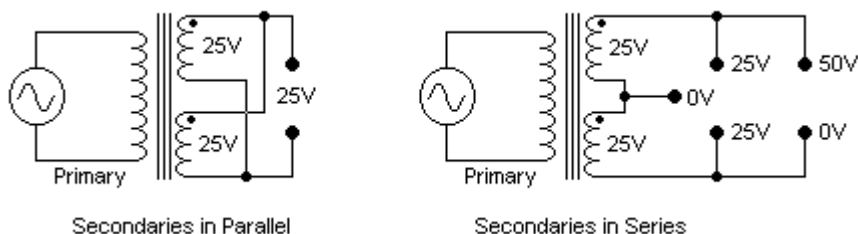
vrednost gostote toka 2,55 A/mm<sup>2</sup>, dobimo za premer žice izraz  $\sqrt{0,5I}$  mm.

**Vir:** F. Mlakar, I Kloor: Mali transformatorji in dušilke, Elektrotehniški vestnik, Ljubljana, 1970. Dostopen v knjižnici FE.

Še nedokončano ....

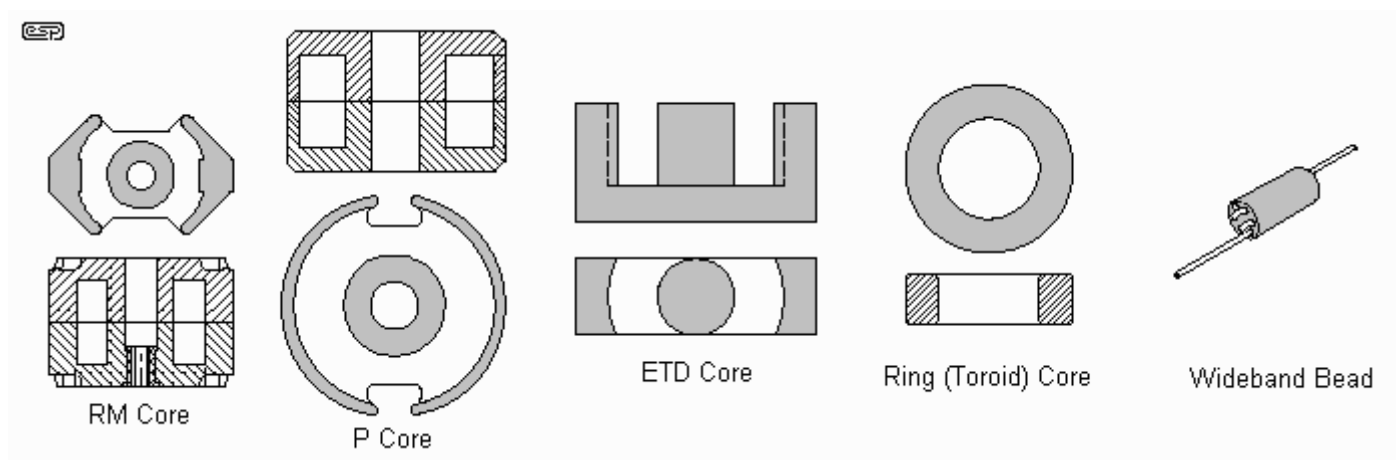
#### \* Izvedbe.

Mnogo transformatorjev je izdelanih tako, da imajo na sekundarju dva odcepa. Npr 2x25 V toroidni transformator pri 5 A (250 VA) ima na sekundarju dve navitji. Ti lahko vežemo vzporedno, kar omogoča toke do 10 A vendar le napetost do 25 V ali pa zaporedno, pri čemer dobimo na sekundarju napetost 50 V pri toku 5 A ali pa v primeru vezave sredinskega odcepa na ozemljitev nnapetost +25 V in -25 V.



SLIKA: Primeri vezave transformatorja z odcepom na sekundarju. Vir: R. Elliott, Transformers – Part II, <http://sound.westhost.com/xfmr.htm>

**Izgube.** Izgube v jedru zaradi histereznih in vrtničnih tokov lahko predstavimo z upornostjo  $R_p$ , ki je vzporedna induktivnosti primarnega navitja  $L_p$ .  $L$  predstavlja stresano induktivnost zaradi sipanja magnetnega polja (nepopoln magnetni sklep).  $R_w$  so izgube zaradi upornosti navitja,  $C_1$  in  $C_2$  pa predstavljata kapacitivnosti med posameznimi ovoji navitja.  $C_{p-s}$  predstavlja kapacitivnost med primarnim in sekundarnim navitjem, ki običajno predstavlja probleme šuma transformatorja. Toroidni transformatorji imajo v tem oziru večje težave kot transformatorji iz E-I jedra. V primeru da je ta kapacitivnost velika, prenaša šume iz primarja (npr omrežja) na sekundarno stran.



**SLIKA: Nekaj primerov feritnih jedr.**

Posebni transformatorji: avtotransformator, trifazni transformatorji, ...

Viri na spletu:

<http://www.ee.lsu.edu/mendrela/transformers.pdf>