

Transformator

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

Größe Grandeur Size	Leistung Puissance Power	Max. Maße in mm Dimensions max. en mm Max. dimension in mm	Gewicht Poids Weight
	VA	A x B x C	kg
EI 30/10-10	0,5-2	30 26-30 35	0,10-0,20
EI 30/13	2	35 31 50	0,18
EI 42/14-20	3-5	42 32-36 55	0,20-0,30
EI 48/16-20	5-10	48 43-51 59	0,25-0,35
EI 54/18	6-15	54 45 74	0,40
EI 60/21-25-31	12-30	60 55-59-65 82	0,50-0,60
EI 66/23-34	25-35	66 59-71 87	0,75-1,0
EI 70/27-36	30-50	70 64-73 101	1,1-1,5
EI 84/29-32	50-75	84 66-69 107	1,5-1,8
EI 84/35-43-52	70-110	84 75-80-85 107	1,9-2,2
EI 96/35-45-59	100-240	96 77-87-101 121	2,3-3,7
EI 105/37-45-60	140-280	105 79-87-102 134	2,7-4,3
EI 105/35-48	150-220	105 89-102 137	2,6-3,6
EI 105/36-52-65	130-270	105 76-82-105 136	3,2-4,5
EI 120/41-53	160-300	120 86-100 149	4,5-5,5
EI 120/61-73	260-500	120 106-120 149	5,5-7,3
EI 135/42-52-57	320-460	135 95-105-115 163	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 zanimivega vezja, ki ga lahko obravnavamo z znanjem, ki smo si ga pridobili do sedaj. Zanimiv ni le teoretično temveč zaradi 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 ga lahko predstavimo kot dvovhodno vezje. 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: $M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$.

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 še to enačbo vstavimo v prvo, 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

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

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 1: 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 kosinusno, 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 amplituda inducirane napetosti na primarni strani

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

Na enak način bi lahko zapisali za sekundarno stran $U_{i2} = 4,44 f N_2 \Phi_{gl,max}$. 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 2: Enofazni 50 Hz transformator ima na primarni strani 25, na sekundarni pa 300 ovojev. Jedro ima presek 300 cm². 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 nasičenju. 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, ...

Kazalčni diagram. Če predpostavimo, da je glavni fluks v jedru kosinusna funkcija, lahko njegov kompleksor predstavimo s kazalcem v smeri realne osi. V skladu z enačbo (22.8) je inducirana napetost premaknjena za četrtno periode signala. Kazalec priključene zunanje napetosti je ravno nasprotnega predznaka inducirani napetosti (velja Kirchoffov zakon).

SLIKA: Kazalčni diagram glavnega fluksa, priključene napetosti, induciranih napetosti in napetosti na bremenu.

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

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{j\omega L_1} = I_{1m}. \quad (22.10)$$

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

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 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**. Da bosta enačbi (22.11) in (22.12) usklajeni, mora na primarni strani poleg magnetilnega teči še nek dodatni tok, ki ga imenujemo **ravnotežni tok** \underline{I}_{1r} in sicer tako, da bo veljalo

$$N_1 (\underline{I}_1 - \underline{I}_{1m}) = N_1 \underline{I}_{1r} = -N_2 \underline{I}_2. \quad (22.13)$$

Ta tok bo očitno »držal ravnotežje« vplivu toka \underline{I}_2 na primarni strani, tako, da bo inducirana napetost nespremenjena. Če je transformator neobremenjen, bo vhodni tok enak magnetilnemu toku, ki je potreben za magnetenje (in razmagnetenje jedra). Če pa je transformator obremenjen, je magnetilni tok običajno dosti manjši od ravnotežnega in bo običajno veljalo

$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1m} + \underline{I}_{1r} \approx \underline{I}_{1r} = -\frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2$. *Ta pomemben rezultat, da bo razmerje tokov, ki ga imenujemo tudi

tokovna prestava, obratno sorazmerno številu ovojev zapišimo še enkrat:

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

* 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.

SLIKA: Kazalčnemu diagramu s kompleksorji napetosti dodamo še kompleksorje tokov.

Primer 3: Idealni transformator je priključen na izmenično napetost z efektivno vrednostjo 240 V in ima na sekundarju z napetostjo 12 V (efektivno) priključeno 15 W žarnico. Določite napetostno prestavo in tok na primarju.

Izračun: $n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{240\text{ V}}{12\text{ V}} = 20$. $I_b = \frac{P_b}{U_2} = \frac{150\text{ W}}{12\text{ V}} = 12,5\text{ A}$. $\frac{I_2}{I_1} = n \Rightarrow I_1 = \frac{I_b}{n} = \frac{12,5\text{ A}}{20} = 0,625\text{ A}$.

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. Enačbo (22.15) lahko 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

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. Komplexor moči na vходу 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 vходу 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 vходу.

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 mnogo manjša od induktivnih upornosti, bo

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

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 sedaj upoštevamo 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).