

# ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)

## - јануар 2013 -

Београд, 18.01.2013.

Трофазни уљни дистрибутивни енергетски трансформатор са номиналним подацима:  $S_n = 1600 \text{ KVA}$ ,  $U_1/U_{20} = 35/0,42 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , спрега  $Yd5$ ,  $P_{kn} = 19090 \text{ W}$ ,  $u_{kn} = 6 \%$ ,  $P_0 = 3000 \text{ W}$ ,  $j_0 = 1,2 \%$ , има временску константу загревања као хомогено тело  $T = 2,2 \text{ h}$ . Познати су конструкцијски параметри: број навојака примара  $N_1 = 1200$ , густина струје у оба намотаја  $j = 2,9 \text{ A/mm}^2$ , средњи пречник примара  $D_1 = 400 \text{ mm}$ , висина оба намотаја  $h = 650 \text{ mm}$ , ширине намотаја  $a = 30 \text{ mm}$  и  $b = 50 \text{ mm}$ , уз међусобни размак намотаја  $\delta = 30 \text{ mm}$ . Штајнмицов коефицијент је 2, а корен карактеристичне једначине за израчунавање расподеле пренапона је  $\alpha = 10$ .

### I део

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове и означити све крајеве намотаја (почетке и крајеве). Колики је број навојака секундара овог трансформатора?
2. Израчунати Филдов сачинилац сматрајући га једнаким за све намотаје и додатне губитке на референтној температури ако су отпорности између прикључних крајева примара и секундара мерене на  $20^\circ\text{C}$  једносмерном струјом  $R_1 = 7,26 \Omega$  и  $R_2 = 1,1 \text{ m}\Omega$ .
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме трансформатора на ВН страни и нацртати је са свим бројним вредностима параметара и електричним величинама.
4. Ако се на задати трансформатор прикључе три мотора са номиналним подацима:  $P_n = 400 \text{ kW}$ ,  $U_n = 420 \text{ V}$ ,  $\eta_n = 0,92$ ,  $\cos\phi_n = 0,84$ , израчунати напон секундара и степен искоришћења снаге трансформатора ако мотори раде номинално оптерећени. Колики би требао да буде број навојака примара да би секундарни напон имао номиналну вредност при датом оптерећењу и колики је тада степен искоришћења снаге трансформатора?
5. а) Нацртати еквивалентно коло трансформатора за проучавање топлотних процеса са два чвора и написати једначине које описују то коло.  
б) Известити изразе и одредити номиналне напоне, струје, снагу и губитке трансформатора који има исти номинални пораст температуре као задати али са два пута већим линеарним димензијама.

### II део

6. На примар трансформатора наилази пренапонски талас амплитуде  $1 \text{ MV}$ . Написати израз са бројним вредностима којим се израчунава највиша вредност потенцијала неке тачке по висини и одредити највећи потенцијал који се јавља у току прелазног процеса. Нацртати еквивалентно коло за проучавање пренапонских појава на почетку прелазног процеса и нацртати општи облик ове расподеле. Која су критична места и зашто?
7. Известити израз за струју кратког споја задатог трансформатора ако је у тренутку кратког споја струја трансформатора била  $\sqrt{2} \cdot I_{n1}$ . Израчунати приближно критичну амплитуду струје кратког споја, време трајања овог прелазног процеса и број периода до устаљеног стања.
8. Израчунати критичну радијалну силу на примару и одговарајућу укупну аксијалну силу за случај из задатка (7). Да ли примар трансформатора може да издржи напрезање услед радијалних сила?
9. Израчунати струје примара и секундара трансформатора при једнофазном (двополном) кратком споју фаза (a-b) трансформатора, ако је трансформатор био претходно у празном ходу са уравнотеженим симетричним системом напона. Нацртати векторски дијаграм напона и струја у режиму кратког споја.
10. Задатом трансформатору се паралелно прикључује трансформатор снаге  $S_n = 1600 \text{ KVA}$ ,  $U_1/U_{20} = 35/0,42 \text{ kV}$ , спрега  $Yd1$ ,  $u_{kn} = 6 \%$ ,  $\cos\phi_k$  исти као задати трансформатор, али је мерењем утврђено да је његов преносни однос већи за  $0,4 \%$  од номиналног. Одредити начин паралелног рада ових трансформатора. Колика је стварна и процентуална струја уравнотежења на секундарној страни при укупном оптерећењу од  $3 \text{ MVA}$  и при  $2,4 \text{ MVA}$  ?

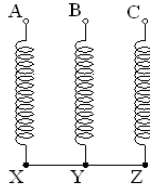
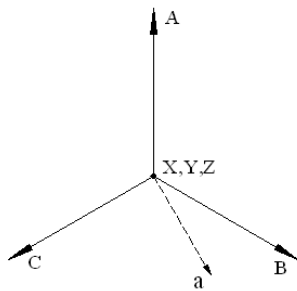
Сваки задатак вреди 12 поена за интегрални испит у трајању од 3 h, а 24 поена за други део испита у трајању од 1,75 h. Дозвољено је поседовање само једне вежбанке. Прецртати оно што није за преглед.

Проф. др Радован Љ. Радосављевић

**ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)**  
- јануар 2013 -

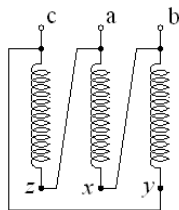
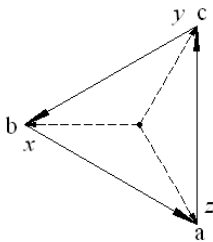
**Београд, 18.01.2013.**

**1.**



$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_{2f}}{U_{1f}} =$$

$$= 1200 \cdot \frac{0,42 \cdot \sqrt{3}}{35} = 24,9 \approx 25 \text{ nav}$$



$$2. \quad R_{1f,DC}^{20} = \frac{R_{1,DC}^{20}}{2} = \frac{7,26}{2} = 3,63 \Omega \quad R_{2f,DC}^{20} = 3 \frac{R_{2,DC}^{20}}{2} = \frac{3 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,65 m\Omega$$

$$R_{1f,DC}^{75} = \frac{235 + 75}{235 + 20} \cdot 3,63 = 4,41 \Omega, \quad R_{2f,DC}^{75} = \frac{235 + 75}{235 + 20} \cdot 1,65 \cdot 10^{-3} = 2 m\Omega$$

$$n = \frac{U_{1nf}}{U_{02f}} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 0,42} = 48,1, \quad I_{1nf} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35000} = 26,4 A$$

$$P_{Cu}^{75} = 3 \cdot (R_{1f,DC}^{75} + R_{2f,DC}^{75} \cdot n^2) \cdot I_{1nf}^2 = 3 \cdot (4,41 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 48,1^2) \cdot 26,4^2 = 18896 W$$

$$k_F = \frac{P_{kn}}{P_{Cu}^{75}} = \frac{19090}{18896} = 1,01, \quad P_d^{75} = P_{kn} - P_{Cu}^{75} = 194 W$$

**3. КС:**

**І начин**

$$R_1^{75} = k_F \cdot R_{1f,DC}^{75} = 1,01 \cdot 4,41 = 4,45 \Omega$$

$$R_2^{75} = k_F \cdot R_{2f,DC}^{75} \cdot n^2 = 1,01 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 48,1^2 = 4,67 \Omega$$

$$R_k' = R_1^{75} + R_2^{75} = 4,45 + 4,67 = 9,12 \Omega$$

**ІІ начин**

$$R_k = \frac{P_{kn}}{3I_{1nf}^2} = \frac{19090}{3 \cdot 26,4^2} = 9,13 \Omega \Rightarrow R_1 \approx R_2' = \frac{R_k}{2} = 4,56 \Omega$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{1nf}}{I_{1nf}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{35000}{\sqrt{3} \cdot 26,4} = 45,9 \Omega$$

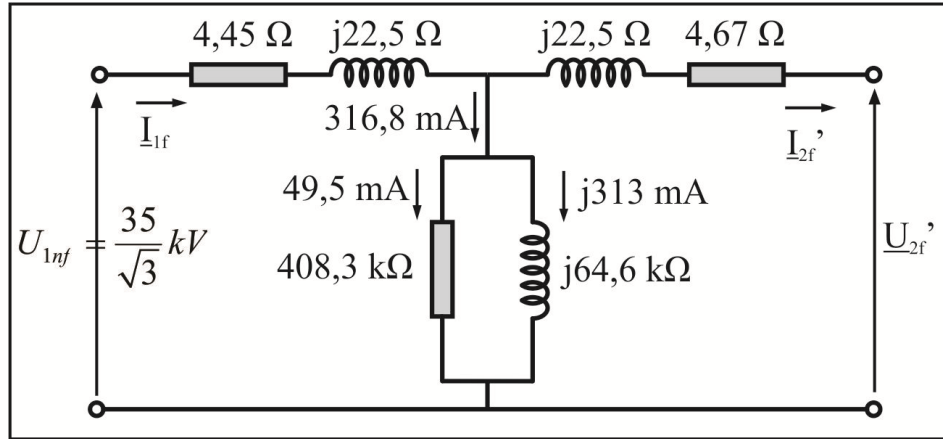
$$\Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 44,98 \Omega \Rightarrow X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2}' = \frac{X_k}{2} = 22,5 \Omega$$

**ІІІ:**

$$R_a = \frac{U_{1nf}^2}{P_0/3} = \frac{U_1^2}{P_0} = \frac{35000^2}{3000} = 408,3 k\Omega \Rightarrow I_{af} = \frac{U_{1nf}}{R_a} = \frac{35000}{\sqrt{3} \cdot 408,3 \cdot 10^3} = 49,5 mA$$

$$I_{0f} = I_{1nf} \cdot \frac{j_0}{100} = \frac{1,2}{100} \cdot 26,4 = 316,8 mA \Rightarrow I_{\mu f} = \sqrt{I_{0f}^2 - I_{af}^2} = \sqrt{316,8^2 - 49,5^2} = 313 mA$$

$$X_\mu = \frac{U_{1nf}}{I_{\mu f}} = \frac{35000}{\sqrt{3} \cdot 313 \cdot 10^{-3}} = 64,6 k\Omega$$



$$4. \quad I_{2nl} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{02}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 420} = 2,2 kA, \quad I_{mnl} = \frac{P_n/\eta_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cos \phi_n} = \frac{3 \cdot 400 \cdot 10^3/0,92}{\sqrt{3} \cdot 420 \cdot 0,84} = 2134 A$$

$$\beta = \frac{I_{mnl}}{I_{2nl}} = \frac{2134}{2200} = 0,97, \quad u_r = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{19090}{1600 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1,19\%,$$

$$u_{x1} = \sqrt{u_{kn}^2 - u_r^2} = \sqrt{6^2 - 1,19^2} = 5,88\%$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \beta(u_r \cos \phi + u_x \sin \phi) = 0,97 \cdot (1,19 \cdot 0,84 + 5,88 \cdot 0,542) = 4,06\% \\ b &= \beta(u_x \cos \phi - u_r \sin \phi) = 0,97 \cdot (5,88 \cdot 0,84 - 1,19 \cdot 0,542) = 4,16\% \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta u = a + \frac{b^2}{200} = 4,15\%$$

$$U_2 = \left(1 - \frac{4,15}{100}\right) \cdot 420 = 402,6 V, \quad N_1^* = N_1 \cdot \frac{U_2}{U_{02}} = 1200 \cdot \frac{402,6}{420} = 1150,2 \approx 1150 nav$$

$$\Delta N_1 = N_1 - N_1^* = 50 nav$$

Пошто се напон напајања није променио, због смањења броја навојака мора порастати максимална индукција у језгру, а тиме и губици у гвожђу. Пошто је Штајнмицов коефицијент 2 може се написати следећи израз:

$$P_{Fe} \sim B_m^2 \sim \frac{1}{N_1^2} \Rightarrow P_{Fe}' = P_{Fe} \left(\frac{N_1}{N_1^*}\right)^2 = 3000 \cdot \left(\frac{1200}{1050}\right)^2 = 3918 W$$

$$\eta = \frac{3 \cdot P_n/\eta_n}{3 \cdot P_n/\eta_n + \beta^2 P_{Cu} + P_{Fe}'} = \frac{3 \cdot 400/0,92}{3 \cdot 400/0,92 + 0,97^2 \cdot 19,09 + 3,918} = 0,9835 \rightarrow 98,35\%$$

5. а) теорија

$$б) \quad k = l_2/l_1 = 2$$

$$P_\gamma \sim k^2 \Rightarrow P_{\gamma 2} = 4 \cdot (19,09 + 3) = 88,36 kW$$

$$R = \rho \frac{l}{S} \sim \frac{1}{k} \Rightarrow I = \sqrt{\frac{P_{Cu}}{R}} \sim \sqrt{\frac{k^2}{1/k}} = k^{3/2} \Rightarrow I_{1nf,2} = 2^{3/2} \cdot I_{1nf,1} = 74,7 A$$

$$I_{2nf,2} = 2^{3/2} \cdot \frac{2,2 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 3,6 kA$$

$$B_m \sim \sqrt{\frac{P_{Fe}}{V}} \sim \sqrt{\frac{k^2}{k^3}} = k^{-1/2} \Rightarrow U \sim B_m \cdot S_{Fe} = k^{-1/2} \cdot k^2 = k^{3/2} \Rightarrow U_{1n,2} = 2^{3/2} \cdot 35 \cdot 10^3 = 99 \text{ kV}$$

$$U_{2n,2} = 2^{3/2} \cdot 420 = 1188 \text{ V}$$

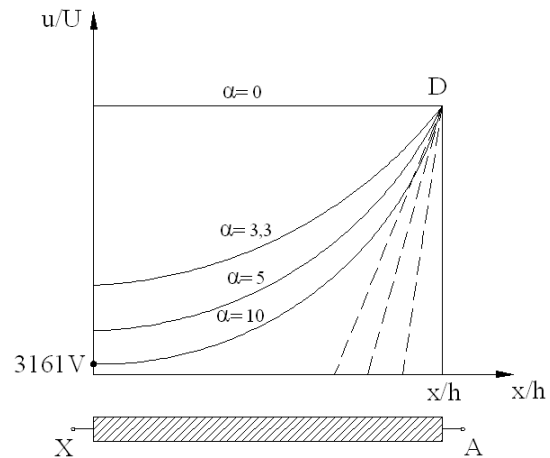
$$S \sim UI \sim k^{3/2} \cdot k^{3/2} = k^3 \Rightarrow S_2 = 8 \cdot 1600 = 12,8 \text{ MVA}$$

6.  $U_m = 1 \text{ MVA}$

$$u = U_m \frac{\text{ch} \alpha x}{\text{ch} \alpha h} = 10^6 \frac{\text{ch} 10x}{\text{ch} 6,5}$$

$$U(x=0) = 10^6 \frac{1}{36,35} \approx 27,51 \text{ kV}$$

$$U_{\max} = 2 \cdot 10^6 - 27510 = 1,972 \text{ kV}$$



7. - почетни услов:  $I_0 = \sqrt{2} I_{1n}$

$$i_k(t) = (\sqrt{2} I_{1n} - I_{km} \sin(\varphi_0 - \varphi_k)) e^{\frac{t}{T_k}} + I_{km} \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi_k)$$

$$I_{kum} = \sqrt{2} \cdot I_{ku} = \sqrt{2} \cdot I_{1n} \cdot \frac{100}{u_{kn}} = \sqrt{2} \cdot 26,4 \cdot \frac{100}{6} = 622,3 \text{ A}$$

- максимум наступа за  $\varphi_0 - \varphi_k = -\frac{\pi}{2}$  у тренутку  $t = \frac{\pi}{\omega}$

$$i_k(t = \frac{\pi}{\omega}) = I_{kr} = (\sqrt{2} I_{1n} + I_{kum}) e^{\frac{-\pi \cdot u_r}{u_x}} + I_{kum} = (\sqrt{2} \cdot 26,4 + 622,3) e^{\frac{\pi \cdot 1,19}{5,88}} + 622,3 = 971,6 \text{ A}$$

$$T_k = \frac{L_k}{R_k} = \frac{X_k}{\omega \cdot R_k} = \frac{44,98}{314 \cdot 9,13} = 15,7 \text{ ms} \quad , \quad t_k \approx 4T_k = 4 \cdot 15,7 = 62,8 \text{ ms}$$

8.  $I_{kr} = 971,6 \text{ A}$ ,  $k_R = 1 - \frac{a+b+\delta}{\pi h} = 1 - \frac{30+50+30}{\pi \cdot 650} = 0,946$

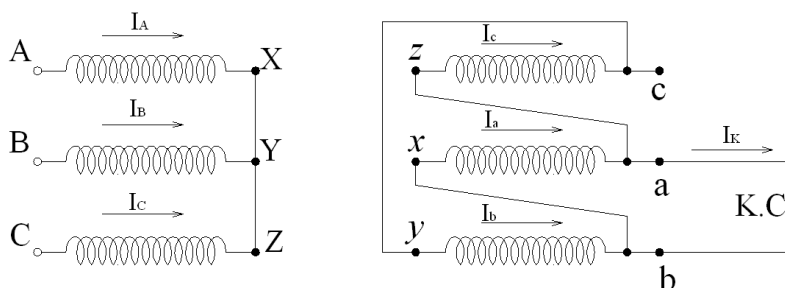
$$F_r = \frac{\mu_0 \pi}{2} \cdot (N_1 I_{kr})^2 \cdot D_1 \cdot \frac{k_R}{h} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-7}}{2} \cdot (1200 \cdot 971,6)^2 \cdot \frac{400}{650} \cdot 0,946 = 1,56 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$F_y = \frac{F_r}{\pi \cdot D_1 \cdot N_1} \cdot R_1 = \frac{1,56 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 1200} = 207 \text{ N} \quad , \quad S_{Cu} = \frac{I_{1n}}{j} = \frac{26,4}{2,9 \cdot 10^6} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\sigma_r = \frac{F_y}{S_{Cu}} = \frac{207}{9,1 \cdot 10^{-6}} = 2,3 \cdot 10^7 \text{ Pa} < \sigma_d = 10^8 \text{ Pa} \quad , \quad \delta' = \delta + \frac{1}{3}(a+b) = 30 + \frac{1}{3}(30+50) = 56,7 \text{ mm}$$

$$F_a = F_r \cdot \frac{\delta'}{h} = 1,56 \cdot 10^6 \cdot \frac{56,7}{650} = 1,36 \cdot 10^5 \text{ N}$$

9.



$$U_{ab} = U_a \quad , \quad U_{bc} = U_b \quad , \quad U_{ca} = U_c$$

$$U_a = 0 \quad , \quad I_b = I_c$$

$$\underline{U}_A = \frac{35}{\sqrt{3}} \text{ kV} \quad , \quad \underline{U}_B = \frac{35}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \text{ kV}$$

$$\underline{U}_C = \frac{35}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{4\pi}{3}} kV$$

$$I_A + I_B + I_C = 0, U_a + U_b + U_c = 0$$

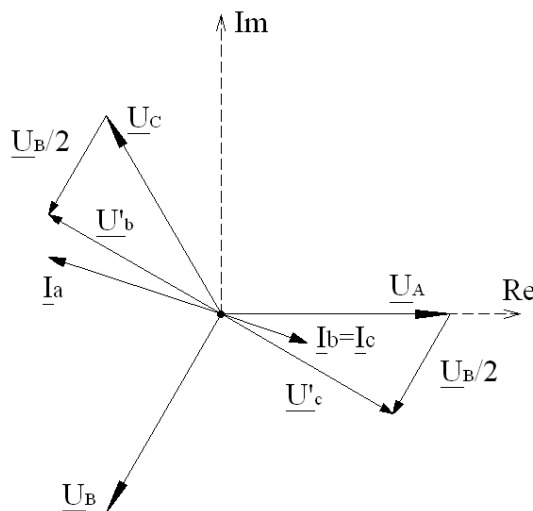
$U_A + U_B + U_C - Z_k \cdot (I_A + I_B + I_C) = U_a + U_b + U_c \Rightarrow U_A + U_B + U_C = 0$  - нема нултих напона на примару

$$Z_k = (9,13 + j44,98) \Omega = 45,9 \angle 78,5^\circ \Omega,$$

$$\underline{U}_B - Z_k \underline{I}_B = \underline{U}_a = 0 \Rightarrow \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{Z_k} = \frac{35 \cdot 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3} \cdot 45,9 \angle 78,5^\circ} = 440,2 \angle -198,5^\circ A \Rightarrow \underline{I}_a = \underline{I}_B \cdot n = 21,2 \angle -198,5^\circ kA$$

$$U_A + U_C - Z_k(I_A + I_C) = U_c + U_b = -U_a = 0,$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_b \Rightarrow \underline{I}_A = \underline{I}_C = \frac{-\underline{U}_B}{2Z_k} = \frac{-35 \cdot 10^3 \angle -120^\circ}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 45,9 \angle 78,5^\circ} = -220,1 \angle -198,5^\circ A \Rightarrow \underline{I}_c = \underline{I}_b = -\underline{I}_A \cdot n = -10,6 \angle -198,5^\circ kA$$



**10.** – начин повезивања крајева за паралелан рад:

VN	A-A	B-B	C-C
NN	a-b	b-c	c-a

$$U_{02fI} = 420V, \quad U_{02fII} = (1 - 0,004) \cdot 420 = 418,32V$$

$$I_{2fn} = \frac{S_n}{3 \cdot U_2} = \frac{1600 \cdot 10^3}{3 \cdot 420} = 1269,8 A,$$

$$Z_{K2i} = \frac{u_{ki}}{100} \cdot \frac{U_{n2fi}}{I_{2fn}} \Rightarrow Z_{K2I} = Z_{K2II} = \frac{6}{100} \cdot \frac{420}{1269,8} = 19,8 m\Omega$$

- независно од опотребења:

$$I_{iz} = \frac{U_{02fI} - U_{02fII}}{Z_{K2I} + Z_{K2II}} = \frac{1,68}{2 \cdot 19,8 \cdot 10^{-3}} = 42,4 A \Rightarrow i_{iz\%} = \frac{I_{iz}}{I_{2fn}} \cdot 100 = \frac{42,4}{1269,8} \cdot 100 = 3,3\%$$