

# ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)

- јануар 2016 -

Београд, 22.01.2016.

Трофазни уљни дистрибутивни енергетски трансформатор има следеће номиналне податке:  $S_n = 1600 \text{ KVA}$ ,  $U_1/U_{20} = 35/0,42 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , спрега  $Yd5$ ,  $P_{kn} = 19800 \text{ W}$ , бакарни проводници,  $u_{kn} = 6,1 \%$ ,  $P_0 = 2600 \text{ W}$ ,  $j_0 = 1,1 \%$ . Познати су конструкцијски параметри: број навојака примара  $N_1 = 1263$ , густина струје у оба намотаја  $j = 3 \text{ A/mm}^2$ , средњи пречник примара  $D_1 = 406 \text{ mm}$ , висина оба намотаја  $h = 645 \text{ mm}$ , ширине намотаја  $a = 30 \text{ mm}$  и  $b = 54 \text{ mm}$ , уз међусобни размак намотаја  $\delta = 30 \text{ mm}$ . Корен карактеристичне једначине за израчунавање расподеле пренапона је  $\alpha = 10$ .

## I део

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове. Означити све крајеве намотаја (почетке и крајеве).
2. На примар задатог трансформатора прикључени су наизменични напони  $u_1 = U_{1mn}(\cos \omega t - 0,42 \cos 3\omega t)$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , а остала два напона су истог облика и вредности уз одговарајуће симетричне фазне помераје. Штајмницов коефицијент је 1,8. Колико износе губици у гвожђу у том случају ако је при простопериодичном номиналном напајању  $P_n : P_v = 3:1$ ?
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме на ВН страни и нацртати шему са унетим бројним вредностима свих параметара и означеним електричним величинама.
4. Дати трансформатор напаја трофазно симетрично оптерећење у спреси звезда чија је струја у једној фази  $I_{a,op} = (1800 + j1400) \text{ A}$  у односу на напон те фазе  $U_{a,op}$ . Одредити напон на оптерећењу и степен искоришћења снаге трансформатора у овом случају.
5. Написати израз за степен искоришћења при: а) номиналном оптерећењу, када пораст средње температуре намотаја у односу на амбијент износи  $55^\circ \text{K}$  и б) половини номиналног оптерећења, када пораст средње температуре намотаја у односу на амбијент износи  $30^\circ \text{K}$ . Однос додатних губитака и укупних губитака у намотајима при температури намотаја од  $75^\circ \text{C}$  износи 0.8. Температура амбијента у оба случаја износи  $20^\circ \text{C}$ . Занемарити промену  $P_0$  са оптерећењем.

## 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. Израчунати приближно критичну амплитуду струје трополног кратког споја, време трајања овог прелазног процеса и број периода ( $50 \text{ Hz}$ ) који протекне 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 на кидање услед радијалних сила ако је дозвољено напрезање за бакар  $10^8 \text{ Pa}$ ?
9. Израчунати струје примара и секундара трансформатора при једнофазном (двуполном) кратком споју фаза (a-b) трансформатора, ако је трансформатор био претходно у празном ходу са уравнотеженим симетричним системом напона.
10. Нацртати вертикалну расподелу температуру уља, при чему је познато да је температура на изласку из хладњака (хладно уље) једнака температури на уласку у намотај, али да се порасте температуре по висини сваког од намотаја (висина  $H_{n1}$  и  $H_{n2}$ ) разликују ( $\Delta\theta_{uvn1} < \Delta\theta_{uvn2}$ ). Вертикална координата дна оба намотаја је иста, а дно хладњака се налази на растојању  $H_{dn-dh}$  испод дна намотаја; висина хладњака износи  $H_h$  ( $H_h > H_{n1}$  и  $H_h > H_{n2}$ ), а разлика температуре на уласку и на изласку из хладњака  $\Delta\theta_{uh}$ . На цртежу приказати случај загревања у кратком споју, када су губици у гвожђу занемарљиви. Познато је и да нема протицања хладног уља на горе поред активног дела. При цртању обратити пажњу на однос  $\Delta\theta_{uh}$ ,  $\Delta\theta_{uvn1}$  и  $\Delta\theta_{uvn2}$ .

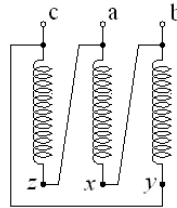
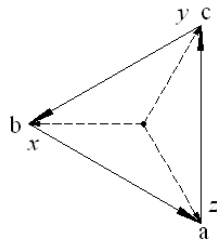
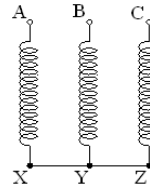
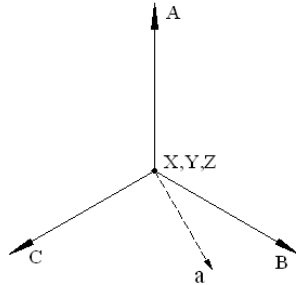
Сваки задатак вреди 12 поена за интегрални испит у трајању од 3 h, а 24 поена за други део испита у трајању од 2 h. Обавезно прецртати оно што није за преглед у самој вежбанци или у кућици испод броја задатка на насловној страни вежбанке.

проф. др Зоран Лазаревић  
проф. др. Зоран Радаковић

**ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)**  
- јануар 2016 -

Београд, 22.01.2016.

1.



2.  $u_1 = U_{1mn} (\cos \omega t - 0,42 \cos 3\omega t)$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$

$$\varphi_1 = \frac{1}{N_1} \int u_1 dt = \frac{1}{N_1} \frac{U_{1mn}}{\omega} (\sin \omega t - 0,14 \sin 3\omega t) \Rightarrow \phi_m = \phi_{m1} + \phi_{m3} = 1,14 \phi_{m1}$$

$$P_{H1} = 0,75 P_0 = 0,75 \cdot 2600 = 1950 \text{ W}$$

$$P_{V1} = 0,25 P_0 = 0,25 \cdot 2600 = 650 \text{ W}$$

$$P_H = k_H f B_m^{1,8} \Rightarrow \frac{P'_H}{P_H} = \left( \frac{\phi_m}{\phi_{m1}} \right)^{1,8} = 1,14^{1,8}$$

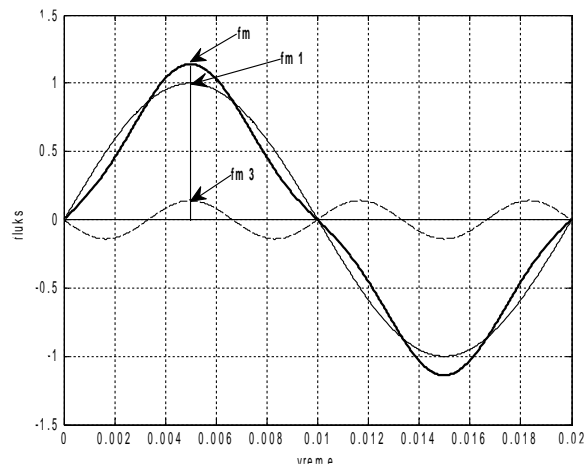
$$P'_H = 1950 \cdot 1,14^{1,8} = 2469 \text{ W}$$

$$P_V = k_V f^2 B_m^2 \Rightarrow \frac{P_{V3}}{P_{V1}} = \left( \frac{f_3}{f_1} \right)^2 \cdot \left( \frac{\phi_{m3}}{\phi_{m1}} \right)^2$$

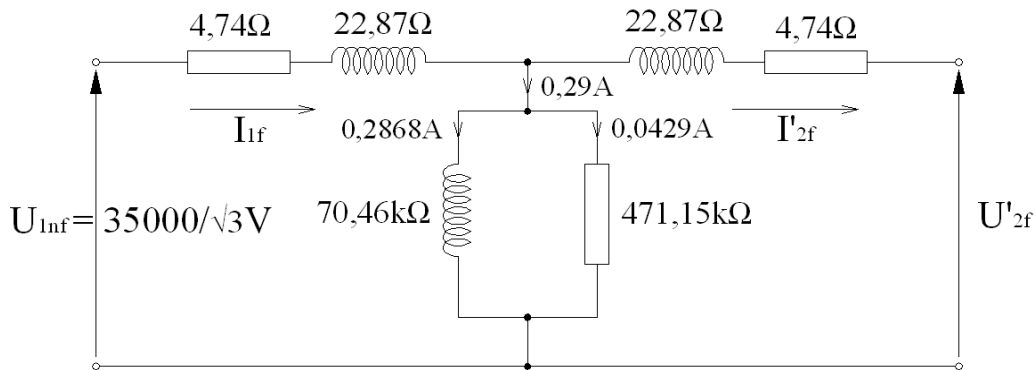
$$P_{V3} = P_{V1} \cdot 9 \cdot 0,14^2 = 0,1764 \cdot P_{V1} = 115 \text{ W}$$

$$P'_V = P_{V1} + P_{V3} = 650 + 115 = 765 \text{ W}$$

$$P'_0 = P'_H + P'_V = 2469 + 765 = 3234 \text{ W}$$



$$\begin{aligned}
 3. \quad I_{1nf} &= \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 26,39 \text{ A} \quad , \quad R_a = \frac{U_{1nf}^2}{P_0/3} = \frac{3 \cdot 35^2 \cdot 10^6}{3 \cdot 2600} = 471,15 \text{ k}\Omega \\
 I_a &= \frac{U_{1nf}}{R_a} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 471,15 \cdot 10^3} = 0,0429 \text{ A} \quad , \quad I_0 = \frac{j_0}{100} \cdot I_{1nf} = \frac{1,1}{100} \cdot 26,39 = 0,29 \text{ A} \\
 I_\mu &= \sqrt{I_0^2 - I_a^2} = \sqrt{0,29^2 - 0,0429^2} = 0,2868 \text{ A} \Rightarrow X_\mu = \frac{U_{1nf}}{I_\mu} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,2868} = 70,46 \text{ k}\Omega \\
 R_k &= \frac{P_{kn}}{3I_k^2} = \frac{19800}{3 \cdot 26,39^2} = 9,48 \Omega \Rightarrow R_1 \approx R_2' = \frac{R_k}{2} = 4,74 \Omega \quad , \\
 Z_k &= \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{1nf}}{I_{1nf}} = \frac{6,1}{100} \cdot \frac{35000}{\sqrt{3} \cdot 26,39} = 46,71 \Omega \Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{46,71^2 - 9,48^2} = 45,74 \Omega \\
 X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2} &= \frac{X_k}{2} = \frac{45,74}{2} = 22,87 \Omega
 \end{aligned}$$



4.

$$\begin{aligned}
 I_a &= (1800 + j 1400) \text{ A}, \quad I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{02}} \Rightarrow \beta = \frac{|I_a|}{I_{2n}} = 1.036, \quad \cos \varphi = \frac{1800}{\sqrt{1800^2 + 1400^2}} = 0.79 \text{ kap.} \Rightarrow \sin \varphi = -0.62 \\
 u_r &= \frac{P_{kn}}{S_n} 100 = 1.238 \quad , \quad u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 5.973 \% \\
 a &= \beta (u_{rn} \cos \varphi + u_{xn} \sin \varphi) = -2.8261 \% \quad , \quad b = \beta (u_{xn} \cos \varphi - u_{rn} \sin \varphi) = 5.6823 \% \\
 \Delta u &= a + \frac{b^2}{200} = -2.66 \% \\
 U_{op} &= 420 \left( 1 - \frac{\Delta u}{100} \right) = 431.2 \text{ V} \\
 \eta &= \frac{\beta S_n \cos \varphi}{\beta S_n \cos \varphi + \beta^2 P_{kn} + P_{0n}} 100 = 98.21 \%
 \end{aligned}$$

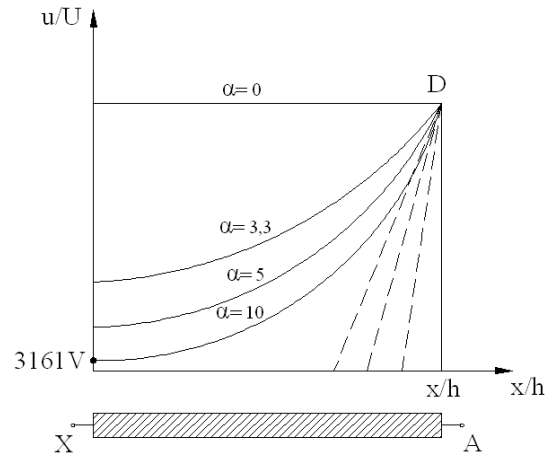
5. теорија

6.  $U_m = 1 MVA$

$$u = U_m \frac{ch\alpha x}{ch\alpha h} = 10^6 \frac{ch10x}{ch6,45}$$

$$U(x=0) = 10^6 \frac{1}{36,35} = 3160 V$$

$$U_{\max} = 2 \cdot 10^6 - 3160 = 1,997 kV \approx 2 MVA$$



7. - почетни услов:  $I_0 = 0$

$$i_k(t) = I_{km} \sin(\phi_0 - \phi_k) e^{-\frac{t}{T_k}} + I_{km} \sin(\omega t + \phi_0 - \phi_k)$$

$$I_{kum} = \sqrt{2} \cdot I_{ku} = \sqrt{2} \cdot I_{ln} \cdot \frac{100}{u_{kn}} = \sqrt{2} \cdot 26,39 \cdot \frac{100}{6,1} = 611,8 A$$

- максимум наступа за  $\phi_0 - \phi_k = -\frac{\pi}{2}$  у тренутку  $t = \frac{\pi}{\omega}$

$$i_k(t = \frac{\pi}{\omega}) = I_{kr} = I_{km} e^{-\frac{\pi \cdot u_r}{u_x}} + I_{km} = 611,8 \cdot e^{-\frac{\pi \cdot 1,238}{5,973}} + 611,8 = 930,8 A$$

$$T_k = \frac{L_k}{R_k} = \frac{X_k}{\omega \cdot R_k} = \frac{45,74}{314 \cdot 9,48} = 0,0154 s, \quad t_k \approx 4T_k = 4 \cdot 0,0154 = 0,0616 s$$

8.  $I_{kr} = 950,3 A$ ,  $k_R = 1 - \frac{a+b+\delta}{\pi h} = 1 - \frac{30+54+30}{\pi \cdot 645} = 0,94$

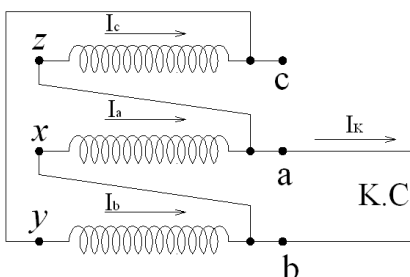
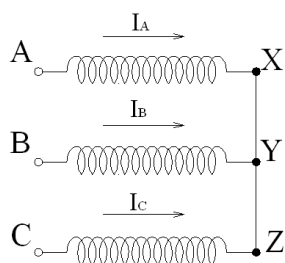
$$F_r = \frac{\mu_0 \pi}{2} \cdot (N_1 I_{kr})^2 \cdot D_1 \cdot \frac{k_R}{h} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-7}}{2} \cdot (1263 \cdot 950,3)^2 \cdot \frac{406}{645} \cdot 0,94 = 1,68 \cdot 10^6 N$$

$$F_y = \frac{F_r}{\pi \cdot D_1 \cdot N_1} \cdot R_1 = \frac{1,68 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 1263} = 211,7 N, \quad S_{Cu} = \frac{I_{ln}}{j} = \frac{26,39}{3 \cdot 10^6} = 8,8 \cdot 10^{-6} m^2$$

$$\sigma_r = \frac{F_y}{S_{Cu}} = \frac{211,7}{8,8 \cdot 10^{-6}} = 2,4 \cdot 10^7 Pa < \sigma_d = 10^8 Pa, \quad \delta' = \delta + \frac{1}{3}(a+b) = 30 + \frac{1}{3}(30+54) = 58 mm$$

$$F_a = F_r \cdot \frac{\delta'}{h} = 1,68 \cdot 10^6 \cdot \frac{58}{645} = 1,51 \cdot 10^5 N$$

9.



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

$$U_a = 0, I_b = I_c$$

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

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

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

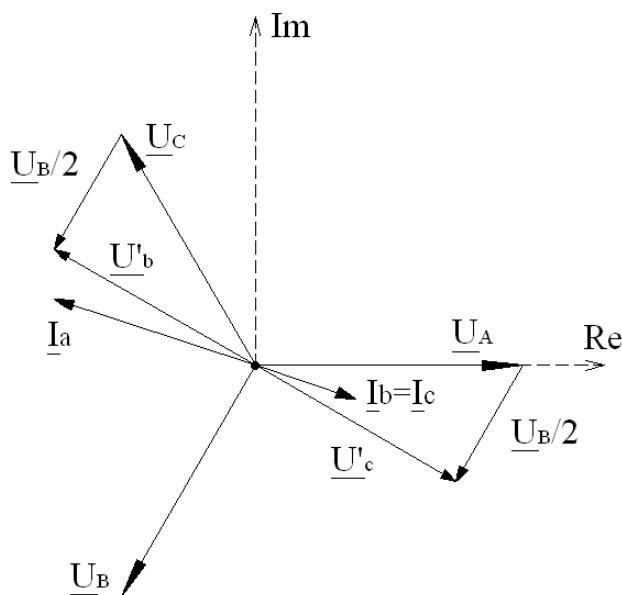
$U_A + U_B + U_C - Z_k \cdot (I_A + I_B + I_C) = U_a + U_b + U_c \Rightarrow U_A + U_B + U_C = 0$  - нема нултих напона на примару

$$Z_k = (9,48 + j45,74) \Omega = 46,71 \angle 78,3^\circ \Omega,$$

$$\underline{U}_B - Z_k \underline{I}_B = \underline{U}_a = 0 \Rightarrow \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{Z_k} = \frac{35 \cdot 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3} \cdot 46,71 \angle 78,3^\circ} = 432,6 \angle -198,3^\circ A \Rightarrow \underline{I}_a = n \underline{I}_B = 20,8 \angle -198,3^\circ kA$$

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

$$\underline{I}_c = \underline{I}_b \Rightarrow \underline{I}_A = \underline{I}_C = \frac{-\underline{U}_B}{2Z_k} = \frac{-35 \cdot 10^3 \angle -120^\circ}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 46,71 \angle 78,3^\circ} = -216,3 \angle -198,3^\circ A \Rightarrow \underline{I}_c = \underline{I}_b = -10,4 \angle -198,3^\circ A$$



10. теорија