

## 2. TRANSFORMATORJI

### NALOGA 2.1:

Enofazni transformator ima na primarni (visokonapetostni) strani  $N_1 = 4800$  ovojev. Grajen je za napajalno napetost  $U_2 = 2400$  V frekvence  $f = 50$  Hz. Izračunajte:

- Glavni magnetni pretok  $\Phi_m$ .
- Število ovojev sekundarnega navitja tako, da bo inducirana napetost neobremenjenega transformatorja  $E_2 = 230$  V.
- Enako transformatorsko jedro uporabimo za transformator, ki ima na primarni strani  $N_1' = 1320$  in  $N_2' = 46$  ovojev na sekundarju. Izračunajte inducirano napetost primarnega in sekundarnega navitja neobremenjenega transformatorja, če je temenska vrednost glavnega magnetnega pretoka  $\Phi_m = 0.045$  Wb pri frekvenci  $f = 50$  Hz.

- Magnetni pretok izračunamo iz inducirane napetosti. V praznem teku je ta enaka napajalni napetosti:

$$E_1 = U_1 = 4 \cdot f_o \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m \quad \Rightarrow \quad \Phi_m = \frac{U_1}{4 \cdot f_o \cdot f \cdot N_1},$$

$$\Phi_m = \frac{2400}{4 \cdot 1.11 \cdot 50 \cdot 4800} = \underline{\underline{0.00225 \text{ Wb}}}.$$

- Število ovojev sekundarnega navitja:

$$E_2 = 4 \cdot f_o \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m \quad \Rightarrow \quad N_2 = \frac{E_2}{4 \cdot f_o \cdot f \cdot \Phi_m},$$

$$N_2 = \frac{230}{4 \cdot 1.11 \cdot 50 \cdot 0.00225} = \underline{\underline{460 \text{ ovojev}}}.$$

- Inducirana napetost:

$$E_1' = 4 \cdot f_o \cdot f \cdot N_1' \cdot \Phi_m' = 4 \cdot 1.11 \cdot 50 \cdot 1320 \cdot 0.045,$$

$$E_1' = 13197 \text{ V} = \underline{\underline{13.2 \text{ kV}}},$$

$$E_2' = 4 \cdot f_o \cdot f \cdot N_2' \cdot \Phi_m' = 4 \cdot 1.11 \cdot 50 \cdot 46 \cdot 0.045,$$

$$E_2' = \underline{\underline{460 \text{ V}}}.$$

**NALOGA 2.2:**

Transformator ima  $N_1 = 200$  ovojev na primarni strani. Priključen je na napajalno napetost  $u(t) = 100 \cdot \sin(\omega_1 t) - 20 \cdot \sin(\omega_5 t)$ . Izračunajte magnetni pretok v jedru transformatorja in efektivno vrednost napajalne napetosti. Transformator je neobremenjen. Stresanje magnetnega pretoka in upornost navitja zanemarimo.

Magnetni pretok izračunamo iz inducirane napetosti, ki je pri danih obratovalnih pogojih ( $I_2 = 0$ ,  $\Phi_{\sigma 1} = 0$ ) enaka napajalni:

$$e(t) = u(t).$$

Napajalna napetost poleg osnovne harmonske vsebuje tudi peto harmonsko komponento:

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 = 314, \quad \omega_5 = 5 \cdot \omega_1 = 1571.$$

Po Faraday-evem zakonu je inducirana napetost v tuljavi z  $N$  ovoji in časovno spremenljivim magnetnim pretokom:

$$e_1(t) = -\frac{d\Psi(t)}{dt} = -N_1 \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt},$$

oziroma:

$$\int e_1(t) \cdot dt = -N_1 \cdot \Phi(t),$$

ali

$$\Phi(t) = -\frac{1}{N_1} \cdot \int e_1(t) \cdot dt = -\frac{1}{N_1} \cdot \int [100 \cdot \sin(\omega_1 t) - 20 \cdot \sin(\omega_5 t)] \cdot dt,$$

$$\Phi(t) = -\frac{1}{200} \cdot \left[ \frac{100}{314} \cdot \cos(314 \cdot t) - \frac{20}{1571} \cdot \sin(1571 \cdot t) \right],$$

$$\Phi(t) = \underline{\underline{0.0016 \cdot \cos(314 \cdot t) - 0.0000636 \cdot \sin(1571 \cdot t) \text{ Wb}}}$$

Efektivna vrednost napetosti:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{100^2}{2} + \frac{20^2}{2}} = \underline{\underline{72.1 \text{ V}}}$$

**NALOGA 2.3:**

Transformator s podatki  $S_n = 100$  kVA, 10 kV/0.4 kV, 50 Hz ima izgube v praznem teku  $P_0 = 600$  W, nazivni izkoristek  $\eta_n = 0.97$ , gostoto toka v navitju pri nazivni obremenitvi  $\Gamma_n = 3$  A/mm<sup>2</sup>, magnetno gostoto v železnem jedru  $B_{Fe} = 1.3$  T ter prerez železnega jedra  $A_{Fe} = 150$  cm<sup>2</sup>. Določite:

- $N_2$  ... število ovojev nizkonapetostnega navitja,
- $N_1$  ... število ovojev visokonapetostnega navitja ,
- $m_{Cu}$  ...skupno maso navitja iz bakrene žice.

V praznem teku transformatorja v sekundarnem navitju ni toka, tok praznega teka na primarni strani (VN) povzroča zanemarljivo majhne padce napetosti. Zato:  $U_2 = E_2$  in  $U_1 = E_1$ !

$$a) \quad N_2 = \frac{E_2}{4.44 \cdot f \cdot B_{Fe} \cdot A_{Fe}} = \frac{U_2}{4.44 \cdot f \cdot B_{Fe} \cdot A_{Fe}} = \frac{400}{4.44 \cdot 50 \cdot 1.3 \cdot 150 \cdot 10^{-4}} = 92.4$$

$$N_2 = \underline{\underline{93 \text{ ovojev}}}$$

$$b) \quad N_1 = \frac{E_1}{4.44 \cdot f \cdot B_{Fe} \cdot A_{Fe}} = \frac{U_1}{4.44 \cdot f \cdot B_{Fe} \cdot A_{Fe}} = \frac{10000}{4.44 \cdot 50 \cdot 1.3 \cdot 150 \cdot 10^{-4}} = 2310$$

$$N_1 = \underline{\underline{2310 \text{ ovojev}}}$$

- Izgube praznega teka transformatorja običajno ugotavljamo s preizkusom praznega teka pri nazivni napetosti in nazivni frekvenci. Ker je tok praznega teka normalnega napetostnega transformatorja  $I_0$  mnogo manjši v primerjavi z nazivnim tokom ( $I_0 \ll I_n$ ), so tudi izgube v bakru (navitju)  $P_{Cu}$  v primerjavi z izgubami v železu  $P_{Fe}$  zanemarljive:

$$P_{Cu0} = I_0^2 \cdot R_1 \ll P_{Fe}.$$

Sledi torej:

$$P_0 = P_{Fe} = P_{Fen}.$$

Ker je preizkus praznega teka opravljen pri nazivni napetosti nazivne frekvence, so to nazivne izgube v železu  $P_{Fen}$ .

Med nazivno obremenitvijo transformator obratuje na "nazivnem" omrežju torej pri nazivni napetosti nazivne frekvence. Celotne izgube so:

$$P_{izn} = S_n \cdot (1 - \eta_n) = P_{Cum} + P_{Fen}.$$

Nazivne izgube v navitju so:

$$P_{Cun} = P_{izn} - P_{Fen} = S_n \cdot (1 - \eta_n) - P_{Fen} = 100 \cdot 10^3 (1 - 0.97) - 600 = \underline{\underline{2400 \text{ W}}}.$$

Izgube v navitju nastajajo v primarnem (VN) in v sekundarnem (NN) navitju:

$$P_{Cun} = P_{Cu1n} + P_{Cu2n} = I_{1n}^2 \cdot R_1 + I_{2n}^2 \cdot R_2.$$

Ohmska upornost bakrenega navitja je:

$$R = \rho \cdot \frac{l_{Cu}}{q}.$$

$l_{Cu}$  ... dolžina vodnika v [m]

$q$  ... prerez vodnika v [m<sup>2</sup>]

$\rho$  ... specifična električna upornost bakrenega vodnika

$$\rho_{Cu} = 0.0175 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega\text{m}^2/\text{m} \text{ pri } 293 \text{ K (} 20 \text{ } ^\circ\text{C)}.$$

Nazivne izgube v bakrenem navitju so tudi:

$$P_{Cun} = I_n^2 \cdot R = (\Gamma_n \cdot q)^2 \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{Cu}}{q}.$$

Ker je masa bakrene žice:

$$m_{Cu} = \gamma_{Cu} \cdot l_{Cu} \cdot q,$$

so izgube

$$P_{Cun} = \Gamma_n^2 \cdot \gamma_{Cu} \cdot l_{Cu} \cdot q \cdot q \cdot \frac{\rho_{Cu}}{\gamma_{Cu} \cdot q} = \Gamma_n^2 \cdot m_{Cu} \cdot \frac{\rho_{Cu}}{\gamma_{Cu}}.$$

$\gamma$  ... specifična masa bakra

$$\gamma_{Cu} = 8.92 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3.$$

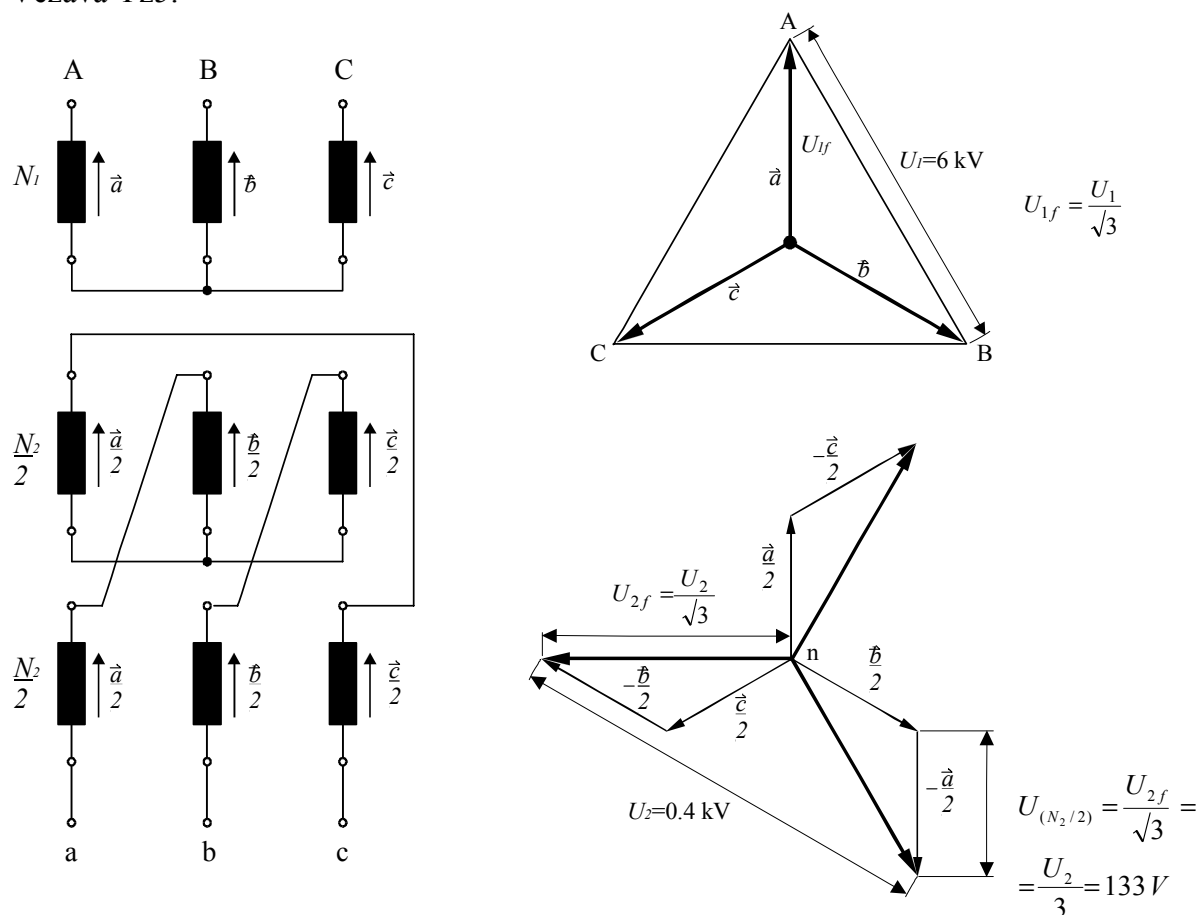
Končno je ocenjena masa bakra:

$$m_{Cu} = \frac{P_{Cun} \cdot \gamma_{Cu}}{\Gamma_n^2 \cdot \rho_{Cu}} = \frac{2400 \cdot 8.92 \cdot 10^3}{(3 \cdot 10^6)^2 \cdot 0.0175 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{136 \text{ kg}}}$$

**NALOGA 2.4:**

Izračunajte število obojev visokonapetostnega (VN) in nizkonapetostnega (NN) navitja trifaznega transformatorja 6 kV/0.4 kV, 50 Hz, vezave Yz 5, katerega jedro je kvadratnega prereza (95x95) mm<sup>2</sup> s faktorjem polnitve  $f_{Fe} = 0.92$ , če predpostavimo, da je gostota v železnem jedru  $B_{Fe} = 1.6$  T. Pri izračunu upoštevajte vezavo transformatorja!

Vezava Yz5:



Število obojev primarnega navitja:

$$N_1 = \frac{U_{1f}}{4.44 \cdot f \cdot B_{Fe} \cdot A_{Fe} \cdot f_{Fe}} = \frac{U_1 / \sqrt{3}}{4.44 \cdot f \cdot B_{Fe} \cdot A_{Fe}} = \frac{3464}{4.44 \cdot 50 \cdot 1.6 \cdot 95 \cdot 95 \cdot 10^{-6} \cdot 0.92}$$

$$N_1 = \underline{\underline{1175 \text{ obojev}}}$$

Število obojev sekundarnega navitja:

$$\frac{N_2}{2} = \frac{U_{(N_2/2)}}{4.44 \cdot f \cdot B_{Fe} \cdot A_{Fe} \cdot f_{Fe}} \text{ ali } \frac{U_{1f}}{U_{(N_2/2)}} = \frac{E_{1f}}{E_{(N_2/2)}} = \frac{N_1}{N_2/2}$$

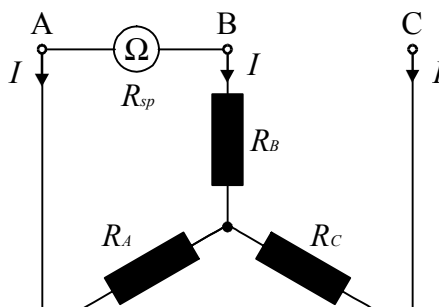
$$\frac{N_2}{2} = \frac{U_{(N_2/2)}}{U_{1f}} \cdot N_1 = \frac{133}{3464} \cdot 1175 = \underline{\underline{45 \text{ obojev}}}$$

**NALOGA 2.5:**

Trifazni transformator  $S_n = 400$  kVA, 5 kV/0.4 kV, Yd 5,  $f_n = 42$  Hz ima izgube v železu na nazivnem omrežju  $P_{Fen} = 1800$  W, ohmsko upornost med visokonapetostnima priključnima sponkama  $R_{1sp} = 0.7 \Omega$  ter med nizkonapetostnima sponkama  $R_{2sp} = 0.0046 \Omega$ . Določite:

- nazivno razmerje izgub  $P_{Cun}/P_{Fen} = \xi_n$ ,
- razmerje izgub v bakru in železu, če je transformator priključen na omrežje  $U_1' = 6$  kV enake frekvence ( $f' = f_n$ ) in je pri tem obremenjen z nazivnim tokom (upoštevajte, da so izgube  $P_{Fe} \propto f \cdot B^2$ ),
- moč iz omrežja, pri kateri transformator doseže maksimalni izkoristek med obratovanjem na nazivnem omrežju in pri spremenjenih pogojih.

Ohmske upornosti trifaznih navitij običajno merimo kot upornosti med dvema priključnima sponkama. Pri trifaznih strojih je namreč ničlišče le izjemoma dostopno (pri zvezdiščnih vezavah).



Ohmska upornost navitja v stiku zvezda merjena med dvema priključkoma je enaka upornosti dveh zaporednih tuljav:

$$R_{AB} = R_{sp} = R_A + R_B$$

$$R_{BC} = R_{sp} = R_B + R_C$$

$$R_{CA} = R_{sp} = R_C + R_A$$

$$R_A = \frac{1}{2} \cdot (R_{AB} + R_{CA} - R_{BC})$$

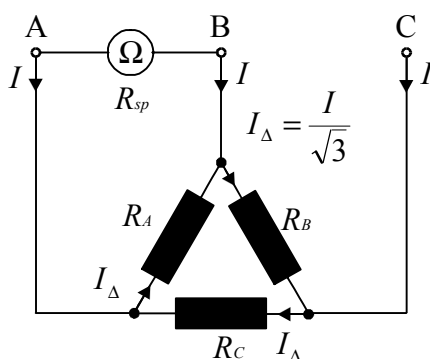
$$R_B = \frac{1}{2} \cdot (R_{BC} + R_{AB} - R_{CA})$$

$$R_C = \frac{1}{2} \cdot (R_{CA} + R_{BC} - R_{AB})$$

Ker so vse tuljave enake ( $R_A = R_B = R_C = R_f$ ,  $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R_{sp}$ ), je upornost faznega navitja:

$$R_f = \frac{1}{2} \cdot R_{sp} \quad \text{ali} \quad R_{sp} = 2 \cdot R_f.$$

Vezava trikot:



$$R_{AB} = \frac{R_A \cdot (R_B + R_C)}{R_A + R_B + R_C}$$

$$R_{BC} = \frac{R_B \cdot (R_C + R_A)}{R_A + R_B + R_C}$$

$$R_{CA} = \frac{R_C \cdot (R_A + R_B)}{R_A + R_B + R_C}$$

Ker je  $R_A = R_B = R_C = R_f$  in  $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R_{sp}$ , je:

$$R_{sp} = \frac{2}{3} \cdot R_f \quad \text{ali} \quad R_f = \frac{3}{2} \cdot R_{sp}.$$

Ohmske upornosti trifaznih navitij potrebujemo za izračun izgubne moči  $P_{Cu}$ , ko po navitju teče tok. Ne zanima nas namreč vezava navitja temveč le ohmska upornost, ki jo izmerimo med dvema priključkoma (n.p.r. A in B, ali a in b), kar dokazujemo z naslednjim izračunom. Moč pri vezavi zvezda je:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I_Y^2 \cdot R_f = 3 \cdot I_Y^2 \cdot \frac{R_{sp}}{2} = \frac{3}{2} \cdot I_Y^2 \cdot R_{sp},$$

ali

$$P_{Cu} = 1.5 \cdot I_Y^2 \cdot R_{sp}.$$

Tu je  $I_Y$  tok v navitju, ki je enak toku v faznem dovodu  $I$ :

$$I_Y = I.$$

Do enake moči pridemo, če računamo moč izgub za trikotno vezavo:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I_{\Delta}^2 \cdot R_f$$

$I_{\Delta}$  je tok v enem navitju. Tok v dovodu je  $I = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta}$ .  $R_f = \frac{3}{2} \cdot R_{sp}$

$$P_{Cu} = 3 \cdot \left(\frac{I}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot R_{sp} = \frac{3}{2} \cdot I^2 \cdot R_{sp}$$

Torej je moč izgub pri trifaznih navitjih neglede na vezavo:

$$P_{Cu} = 1.5 \cdot I^2 \cdot R_{sp}$$

$I$  ... tok v dovodu,

$R_{sp}$  ... ohmska upornost med dvema priključnima sponkama,

$P_{Cu}$  ... celotna trifazna moč izgub v navitju.

a) Nazivno razmerje izgub:

$$\xi_n = \frac{P_{Cun}}{P_{Fen}}$$

Nazivne izgube v bakru:

$$P_{Cun} = 1.5 \cdot I_{1n}^2 \cdot R_{1sp} + 1.5 \cdot I_{2n}^2 \cdot R_{2sp}$$

Nazivna tokova:

$$I_{1n} = \frac{S_{1n}}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 10^3} = 46.2 \text{ A},$$

$$I_{2n} = p_u \cdot I_{1n} = \frac{5}{0.4} \cdot 46.2 = 577.5 \text{ A}.$$

$p_u$  ... napetostna prestava

$$P_{Cun} = 1.5 \cdot 46.2^2 \cdot 0.7 + 1.5 \cdot 577.5^2 \cdot 0.0046 = 4542 \text{ W},$$

$$\xi_n = \frac{4542}{1800} = \underline{\underline{2.52}}$$

b) Če je transformator obremenjen z enakim tokom  $I=I_n$ , so izgube v bakru nespremenjene  $P_{Cu} = P_{Cun}$ . S spremembo napajalne napetosti se spremeni magnetna gostota v jedru  $B_{Fe}$ :

$$U_1 = E_1 = 4.44 \cdot f_n \cdot N_1 \cdot B_{Fen} \cdot A_{Fe}$$

$$U_1' = E_1' = 4.44 \cdot f' \cdot N_1 \cdot B_{Fe}' \cdot A_{Fe}$$

$$\Rightarrow \frac{U_1}{U_1'} = \frac{f_n}{f'} \cdot \frac{B_{Fen}}{B_{Fe}'}$$

oziroma



$$\frac{B_{Fe}'}{B_{Fen}} = \frac{U_1'}{U_1} \cdot \frac{f_n}{f'} = \frac{6 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3} \cdot \frac{42}{42} = 1.2$$

Izgube v železu:

$$P_{Fe}' = P_{Fen} \cdot \frac{f'}{f_n} \cdot \left( \frac{B_{Fe}'}{B_{Fen}} \right)^2 = 1800 \cdot 1 \cdot (1.2)^2 = \underline{\underline{2592 \text{ W}}}$$

Novo razmerje izgub:

$$\xi' = \frac{P_{Cun}}{P_{Fe}'} = \frac{4546}{2592} = \underline{\underline{1.75}}$$

c) Izkoristek transformatorja je razmerje oddane in sprejete moči:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{oddana moč}}{\text{sprejeta moč}} = \frac{S_1 - P_{iz}}{S_1} = \frac{S_1 - (P_{Fen} + P_{Cu})}{S_1} = \frac{S_1 - \left( P_{Fen} + P_{Cun} \cdot \left[ \frac{S_1}{S_n} \right]^2 \right)}{S_1} = \\ &= 1 - \frac{\left( P_{Fen} + \frac{P_{Cun}}{S_n^2} \cdot S_1^2 \right)}{S_1}, \end{aligned}$$

kjer so  $P_{Cu} = P_{Cun} \cdot (I/I_n)^2 = P_{Cun} \cdot (S_1/S_n)^2$  (izgube v bakru so odvisne od kvadrata toka oziroma moči).

Maksimalni izkoristek bo:

$$\frac{d\eta}{dS_1} = \frac{P_{Fen}}{S_1} - \frac{P_{Cun}}{S_n^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad S_1 = S_n \cdot \sqrt{\frac{P_{Fen}}{P_{Cun}}} = S_n \cdot \sqrt{\frac{1}{\xi_n}}.$$

Če je  $\xi_n = 2.52$ , je

$$\eta_{\max} \quad \text{pri} \quad S_1 = 400 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{1}{2.52}} = \underline{\underline{252 \text{ kVA}}}.$$

V primeru, ko je  $\xi' = 1.75$ , je

$$\eta_{\max}' \quad \text{pri} \quad S_1' = 400 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{1}{1.75}} = \underline{\underline{302 \text{ kVA}}}.$$

**NALOGA 2.6:**

Trifazni transformator nazivne moči 1 MVA, 10 kV/0.4 kV,  $f = 50$  Hz,  $P_{Cun} = 15$  kW,  $P_0 = 5$  kW,  $u_K = 6$  % obratuje na napajalnem omrežju  $U_1' = 11$  kV,  $f' = 60$  Hz. Po sekundarnem navitju teče tok  $I_2 = 1000$  A pri  $\cos\varphi_2 = 0.5_{ind}$ . Za ta obratovalni primer izračunajte izgube v bakru in železu ter točno sekundarno napetost  $U_2'$ !

Nazivna tokova  $I_{1n}$  in  $I_{2n}$  izračunamo iz nazivne moči in napetosti:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = \underline{\underline{57.34 \text{ A}}},$$

$$I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 0.4 \cdot 10^3} = \underline{\underline{1443.4 \text{ A}}}.$$

Izgube v navitju se spreminjajo s kvadratom toka:

$$P_{Cu}' = P_{Cun} \cdot \left( \frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2 = 15 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{1000}{1443.4} \right)^2 = \underline{\underline{7200 \text{ W}}}.$$

Izgube v železu se spreminjajo približno linearno s frekvenco in s kvadratom magnetne gostote:

$$P_{Fe}' = P_{Fen} \cdot \left( \frac{f'}{f_n} \right) \cdot \left( \frac{B'}{B_n} \right)^2.$$

Nazivne izgube v železu so enake izgubam v praznem teku pri nazivnem omrežju (tok praznega teka  $I_0 \ll I_n$ , zato so tudi izgube v praznem teku  $P_{Cu0}$  zanemarljive):

$$P_{Fen} = P_0,$$

$$U_{1n} = E_{n1} = 4.44 \cdot f_n \cdot N_1 \cdot B_{Fen} \cdot A_{Fe},$$

$$U_1' = E_1' = 4.44 \cdot f' \cdot N_1 \cdot B' \cdot A_{Fe},$$

$$U_1' = 1.1 \cdot U_{1n}.$$

Sledi:

$$f' \cdot B' = 1.1 \cdot f_n \cdot B_n \quad \Rightarrow \quad \frac{B'}{B_n} = 1.1 \cdot \frac{f_n}{f'}.$$

Torej so izgube v železu pri novih obratovalnih pogojih:

$$P_{Fe}' = P_{Fen} \cdot \left( \frac{f'}{f_n} \right) \cdot \left( 1.1 \cdot \frac{f_n}{f'} \right)^2 = 1.21 \cdot P_{Fen} \cdot \frac{f_n}{f'},$$

$$P_{Fe}' = 1.21 \cdot 5000 \cdot \frac{50}{60} = \underline{\underline{5042 \text{ W}}}.$$

Sekundarna napetost neobremenjenega transformatorja na novem omrežju ( $U_1' = 11 \text{ kV}$ ,  $f' = 60 \text{ Hz}$ ) se prav tako poveča za 10 %:

$$E_2' = 1.1 \cdot E_{2n} = \underline{\underline{440 \text{ V}}} (= U_2 \text{ v praznem teku!})$$

Transformator obremenimo na nizkonapetostni strani tako, da po navitju teče tok  $I_2 = 1000 \text{ A}$  pri  $\cos\varphi_2 = 0.5_{\text{ind}}$ . V transformatorju nastane padec napetosti, ki ga izračunamo na osnovi Kappovega diagrama. Pred tem izračunamo elemente Kappovega trikotnika  $u_R' \%$ ,  $u_x' \%$  in  $u_K' \%$ . Pri nazivni obremenitvi ( $I = I_n$ ,  $U = U_n$ ,  $f = f_n$ ) je ohmski padec napetosti  $u_R \%$  številsko enak procentualnim izgubam v navitju (bakru):

$$\underline{I = I_n} :$$

$$u_R \% = p_{Cu} \% = \frac{P_{Cum}}{S_n} \cdot 100 \% = 1.5 \%,$$

$$u_K \% = 6 \%,$$

$$u_x \% = \sqrt{u_K^2 \% - u_R^2 \%} = \sqrt{6^2 - 1.5^2} = 5.81 \%,$$

Vsi napetostni padci se spreminjajo linearno s tokom:

$$I_2 = \frac{1000}{1443.4} \cdot I_{2n} = 0.6928 \cdot I_{2n},$$

$$\underline{I_1 = 0.6928 \cdot I_{1n}} :$$

$$u_R' \% = 1.039 \%,$$

$$u_x' \% = 4.025 \%,$$

$$u_K' \% = 4.157 \%.$$

Celotni padec napetosti  $\Delta U$  je enak:

$$\overline{AH} = \overline{AE} + \overline{EF} + \overline{FH} = \Delta U.$$

Pri tem je:

$$\overline{AE} = u_R' \% \cdot \cos\varphi_2$$

$$\overline{EF} = \overline{BG} = u_x' \% \cdot \sin\varphi_2$$

$$\begin{aligned} \overline{FH} &= \overline{OH} - \overline{OF} = U_1 - \sqrt{U_1^2 - (\overline{CF})^2} = U_1 - \sqrt{U_1^2 - (\overline{CG} - \overline{GF})^2} \\ &= U_1 - \sqrt{U_1^2 - (\overline{CG} - \overline{EB})^2} = U_1 - \sqrt{U_1^2 - (u_x' \% \cdot \cos\varphi_2 - u_R' \% \cdot \sin\varphi_2)^2} \end{aligned}$$

ali

$$\Delta u' \% = u_R' \% \cdot \cos\varphi_2 + u_x' \% \cdot \sin\varphi_2 + U_1 - \sqrt{U_1^2 - (u_x' \% \cdot \cos\varphi_2 - u_R' \% \cdot \sin\varphi_2)^2}$$

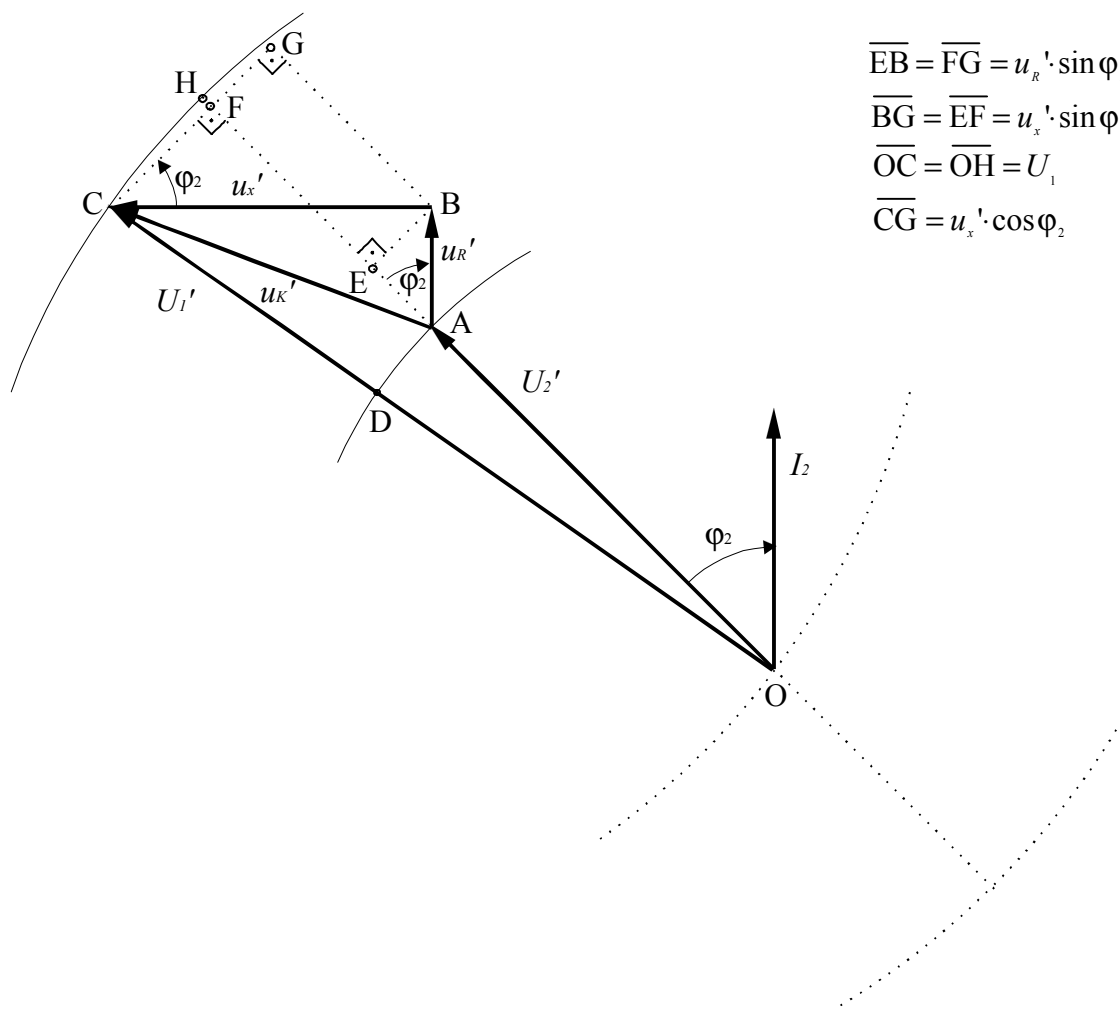
$$= 1.039 \cdot 0.5 + 4.025 \cdot 0.866 + 110 - \sqrt{110^2 - (4.025 \cdot 0.5 - 1.039 \cdot 0.866)^2}$$

$$= 0.520 + 3.485 + 110 - 109.995 = 4 \%$$

$$\Delta U = \Delta u' \% \cdot U_2 = 0.04 \cdot 440 = 17.6 \text{ V}$$

Dejanska medfazna napetost na sekundarnih sponkah je:

$$U_2' = E_2' - \Delta U = 440 - 17.6 = \underline{\underline{422.4 \text{ V}}}$$

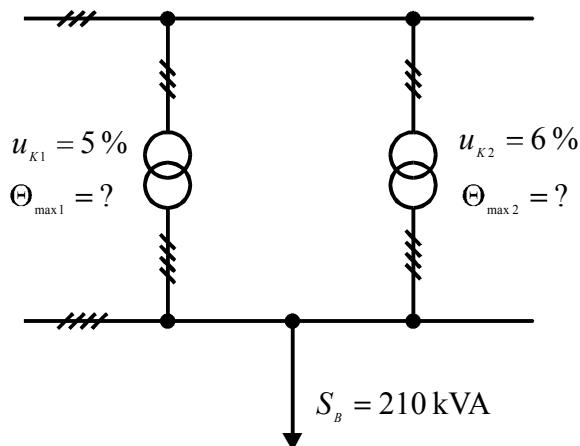


### **NALOGA 2.7:**

Dva transformatorja z enako nazivno močjo  $S_{n1} = S_{n2} = 100 \text{ kVA}$ ,  $20 \text{ kV}/0.4 \text{ kV}$  obratujeta paralelno. Prvi ima relativno kratkostično napetost  $u_{K1} = 5 \%$  in drugi  $u_{K2} = 6 \%$ . Nazivno razmerje izgub  $P_{Cun}/P_{Fen} = \xi_n = 5$ . Pri ločenem obratovanju z nazivno močjo bi se oba segrela na  $\Theta = 65 \text{ }^\circ\text{C}$  nadtemperature. V paralelnem obratovanju sta že nekaj dni obremenjena s skupno močjo  $210 \text{ kVA}$ . Do kakšne nadtemperature se segreje prvi oziroma drugi transformator ( $\Theta_{max1} = ?$ ,  $\Theta_{max2} = ?$ ), če smatramo, da je transformator homogeno telo?

Pri paralelnem obratovanju sta transformatorja priključena na skupne zbiralke na VN in NN strani. Zato sta celotna napetostna padca na prvem in na drugem transformatorju enaka:

$$\Delta U_1 = \Delta U_2.$$



Če je  $x_1$  stopnja obremenitve prvega in  $x_2$  stopnja obremenitve drugega transformatorja z ozirom na njihovo nazivno moč, bosta napetostna padca:

$$x_1 \cdot u_{K1} = x_2 \cdot u_{K2}.$$

Vsota obeh moči, ki ju transformatorja prenašata, je enaka bremenski moči:

$$x_1 \cdot S_{n1} + x_2 \cdot S_{n2} = x_1 \cdot S_{n1} + x_1 \cdot S_{n2} \cdot \frac{u_{K1}}{u_{K2}} = S_B.$$

Zato je

$$x_1 = \frac{S_B}{S_{n1} + S_{n2} \cdot \frac{u_{K1}}{u_{K2}}} = \frac{210}{100 + 100 \cdot \frac{5}{6}} = 1.145,$$

$$x_2 = \frac{S_B}{S_{n1} \cdot \frac{u_{K2}}{u_{K1}} + S_{n2}} = \frac{210}{100 \cdot \frac{6}{5} + 100} = 0.955.$$

Kar pomeni, da prvi transformator prenaša moč

$$S_1 = x_1 \cdot S_{n1} = 114.5 \text{ kVA}$$

in drugi

$$S_2 = x_2 \cdot S_{n2} = 95.5 \text{ kVA}.$$

$$S_B = S_{n1} + S_{n2} = 210 \text{ kVA}.$$

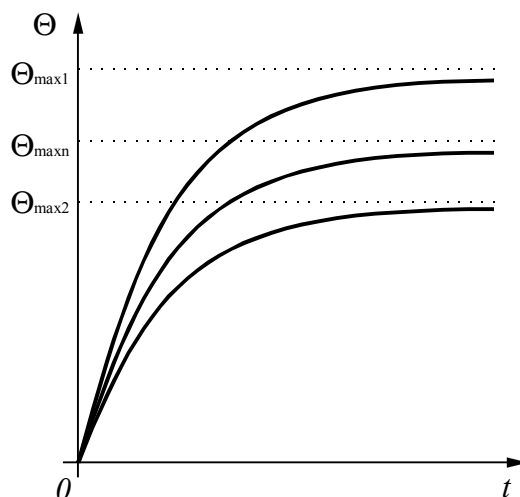
Prvi bolj obremenjen transformator se segreje na maksimalno nadtemperaturo:

$$\Theta_{\max 1} = \Theta_{\max n} \cdot \frac{1 + \xi_n \cdot x_1^2}{1 + \xi_n} = 65 \cdot \frac{1 + 5 \cdot 1.145^2}{1 + 5} = \underline{\underline{82 \text{ } ^\circ\text{C}}}.$$

To je 26 % večja nadtemperatura od nazivne. Manj obremenjen transformator se segreje na maksimalno nadtemperaturo:

$$\Theta_{\max 2} = \Theta_{\max n} \cdot \frac{1 + \xi_n \cdot x_2^2}{1 + \xi_n} = 65 \cdot \frac{1 + 5 \cdot 0.955^2}{1 + 5} = \underline{\underline{62 \text{ } ^\circ\text{C}}}.$$

To je le 92.6 % nazivne nadtemperature.



### **NALOGA 2.8:**

Transformator s časovno konstanto segrevanja  $T = 3.5$  h obratuje na nazivnem omrežju in je nazivno obremenjen. V kolikem času  $t$  bo dosegel 75 % končne nadtemperature  $\Theta(t) = 0.75 \cdot \Theta_{\max n}$ , če je nazivno obremenjen iz hladnega stanja ( $\Theta(0) = 0$ ). Transformator obravnavamo kot homogeno telo.

Segrevalna krivulja transformatorja kot homogenega telesa pri nazivni obremenitvi:

$$\Theta(t) = \Theta_{\max n} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}),$$

$$\Theta_{\max n} - \Theta(t) = \Theta_{\max n} \cdot e^{-\frac{t}{T}},$$

$$e^{\frac{t}{T}} = \frac{\Theta_{\max n}}{\Theta_{\max n} - \Theta(t)},$$

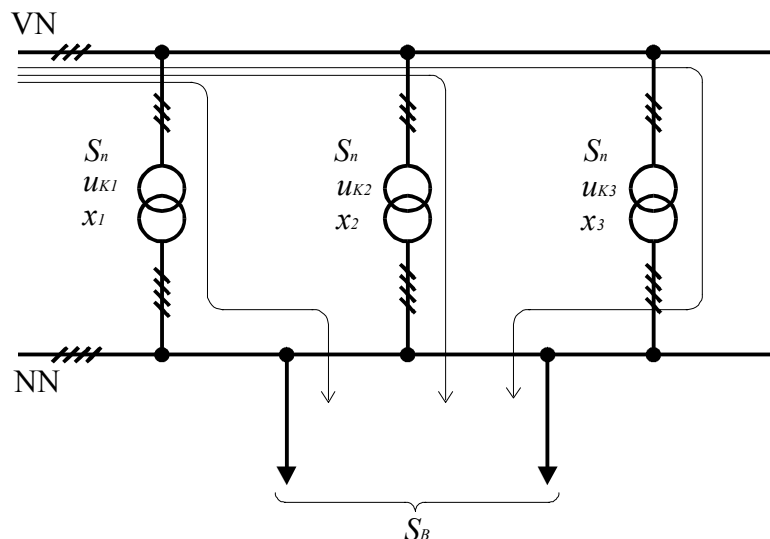
$$t = T \cdot \ln \frac{\Theta_{\max n}}{\Theta_{\max n} - \Theta(t)},$$

$$t = 3.5 \cdot \ln \frac{\Theta_{\max n}}{\Theta_{\max n} - 0.75 \cdot \Theta_{\max n}},$$

$$t = \underline{\underline{4.85 \text{ h}}}.$$

**NALOGA 2.9:**

Trije transformatorji enake nazivne moči  $S_n$ , ki imajo različne kratkostične napetosti in sicer:  $u_{K1} = 5\%$ ,  $u_{K2} = 5.5\%$  in  $u_{K3} = 6\%$ , obratujejo paralelno. Kolikšna je skupna prenesena moč, če se noben transformator ne sme pregrete (noben transformator ne sme biti preobremenjen)?



Skupna moč:

$$S_B = S_1 + S_2 + S_3 = x_1 \cdot S_{n1} + x_2 \cdot S_{n2} + x_3 \cdot S_{n3}.$$

Noben izmed transformatorjev ne sme biti preobremenjen. Torej sme transformator z najmanjšim  $u_K$  (TR1) prevzeti obremenitev, ki je kvečjemu enaka nazivni moči. To pomeni, da stopnja obremenitve ne sme biti večja kot  $x_1 = 1$ . Napetostni padci so enaki:

$$x_1 \cdot u_{K1} = x_2 \cdot u_{K2} = x_3 \cdot u_{K3}.$$

Iz tega sledi:

$$x_2 = x_1 \cdot \frac{u_{K1}}{u_{K2}} = 1 \cdot \frac{5}{5.5} = 0.909$$

in

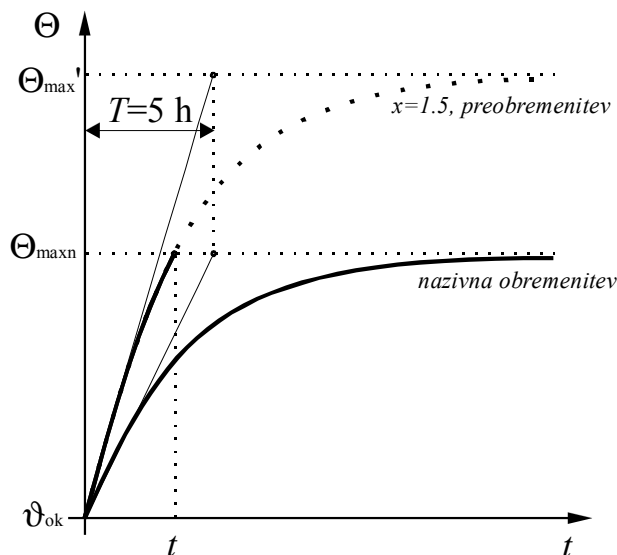
$$x_3 = x_2 \cdot \frac{u_{K2}}{u_{K3}} = x_1 \cdot \frac{u_{K1}}{u_{K2}} \cdot \frac{u_{K2}}{u_{K3}} = x_1 \cdot \frac{u_{K1}}{u_{K3}} = 1 \cdot \frac{5}{6} = 0.833.$$

Skupna moč je:

$$S_B = S_n + 0.909 \cdot S_n + 0.833 \cdot S_n = \underline{\underline{2.742 \cdot S_n}}.$$

**NALOGA 2.10:**

Transformator, ki je ohlajen na temperaturo okolice, obratuje na nazivnem omrežju ( $U_{1n}$ ,  $f_n$ ) in je pri tem obremenjen z  $I = 1.5I_n$ . Koliko časa sme obratovati pod temi pogoji, ne da bi se pregrel preko dopustne temperature? Časovna konstanta segrevanja je  $T=5$  h, nazivno razmerje izgub je  $P_{Cun} / P_{Fen} = \xi_n = 3$ . Transformator obravnavamo kot homogeno telo!



Če bi transformator trajno obratoval z  $I = 1.5 \cdot I_n = x \cdot I_n$ , bi se segrel na maksimalno nadtemperaturo:

$$\Theta_{\max}' = \Theta_{\max n} \cdot \frac{1 + \xi_n \cdot x^2}{1 + \xi_n} = \Theta_{\max n} \cdot \frac{1 + 3 \cdot 1.5^2}{1 + 3} = 1.9375 \cdot \Theta_{\max n}$$

Po času  $t$  se transformator segreje do dopustne nadtemperature  $\Theta_{\text{dop}} = \Theta_{\max n}$ :

$$\Theta'(t) = \Theta_{\max n}$$

$$\Theta_{\max n} = \Theta_{\max}' \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

$$1 - \frac{\Theta_{\max n}}{\Theta_{\max}'} = e^{-\frac{t}{T}}$$

$$e^{\frac{t}{T}} = \frac{\Theta_{\max}'}{\Theta_{\max}' - \Theta_{\max n}}$$

$$t = T \cdot \ln \frac{\Theta_{\max}'}{\Theta_{\max}' - \Theta_{\max n}} = 5 \cdot \ln \frac{1.9375 \cdot \Theta_{\max n}}{1.9375 \cdot \Theta_{\max n} - \Theta_{\max n}} = \underline{\underline{3.63 \text{ h}}}$$



**NALOGA 2.11:**

Transformator 10 kV/0.4 kV, 50 Hz,  $P_{Cun} = 5900$ ,  $P_{Fen} = 1475$  W se pri trajni nazivni obremenitvi segreje za  $\Theta_{maxn} = 60$  °C pri temeperaturi okolice  $\vartheta_{ok} = 40$  °C (313 K).

- Koliko smemo transformator trajno obremeniti, če je postavljen v prostor, kjer je temperatura okolice  $\vartheta_{ok}' = 60$  °C (333 K)?
- Transformator priključimo na 6 kV,  $f = 60$  Hz. Kolikšno je razmerje izgub na novem omrežju, če je obremenjen z nazivnim tokom? Do katere nadtemperature se bo segrel ( $\vartheta_{ok} = 40$  °C)?

Transformator obravnavamo kot homogeno telo!

$$a) \quad \Theta_{maxn} = 60^{\circ}C \quad \rightarrow \quad I = I_n,$$

torej je srednja temperatura transformatorja:

$$\vartheta_{maxn} = \vartheta_{ok} + \Theta_{maxn} = 100^{\circ}C (373 K).$$

Prirastek temperature v novih temperaturnih pogojih:

$$\frac{\Theta_{maxn}'}{\Theta_{maxn}} = \frac{1 + \xi_n \cdot x^2}{1 + \xi_n},$$

$$\frac{40}{60} = \frac{1 + 4 \cdot x^2}{1 + 4} \quad \Rightarrow \quad x^2 = 0.5833.$$

Stopnja obremenitve:

$$x = \frac{I'}{I_n} = \sqrt{0.5833} = 0.764.$$

Transformator lahko trajno obremenjujemo s tokom:  $I' = \underline{\underline{0.764 \cdot I_n}}$ .

- Na omrežju  $U'$ ,  $f'$  se spremenijo izgube v železu, izgube v bakru ostanejo nespremenjene pri nazivnem toku!

$$P_{Fe}' = P_{Fen} \cdot \left(\frac{f'}{f}\right) \cdot \left(\frac{B'}{B_n}\right)^2.$$

Razmerje magnetnih gostot  $B'/B_n$  poiščemo iz inducirane napetosti:

$$E_1' = 4.44 \cdot N_1 \cdot f' \cdot B' \cdot A_{Fe},$$

$$E_1 = 4.44 \cdot N_1 \cdot f \cdot B \cdot A_{Fe}.$$

V praznem teku transformatorja z zadostno natančnostjo velja, da sta inducirani napetosti enaki pritisnjenima,  $E_1' = U_1'$  in  $E_n = U_1$ . Zato je :

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{f' \cdot B'}{f_n \cdot B_n} \quad \text{ali} \quad \frac{B'}{B_n} = \frac{U_1' \cdot f_n}{U_1 \cdot f'} = \frac{6000 \cdot 50}{10000 \cdot 60} = \frac{1}{2}.$$

Torej so izgube v železu:

$$P_{Fe}' = 1475 \cdot \left(\frac{60}{50}\right) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 442.5 \text{ W}.$$

Ker je  $P_{Cu}' = P_{Cun}$  bo razmerje toplot  $Q'/Q$ :

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{\Theta_{\max}'}{\Theta_{\max n}} \Rightarrow \frac{\Theta_{\max}'}{\Theta_{\max n}} = \frac{P_{iz}'}{P_{izn}} = \frac{P_{Fe}' + P_{Cu}'}{P_{Fe n} + P_{Cun}} = \frac{442.5 + 5900}{1475 + 5900} = 0.86,$$

$$\Theta_{\max}' = 0.86 \cdot \Theta_{\max n} = \underline{\underline{51.6 \text{ } ^\circ\text{C}}}.$$

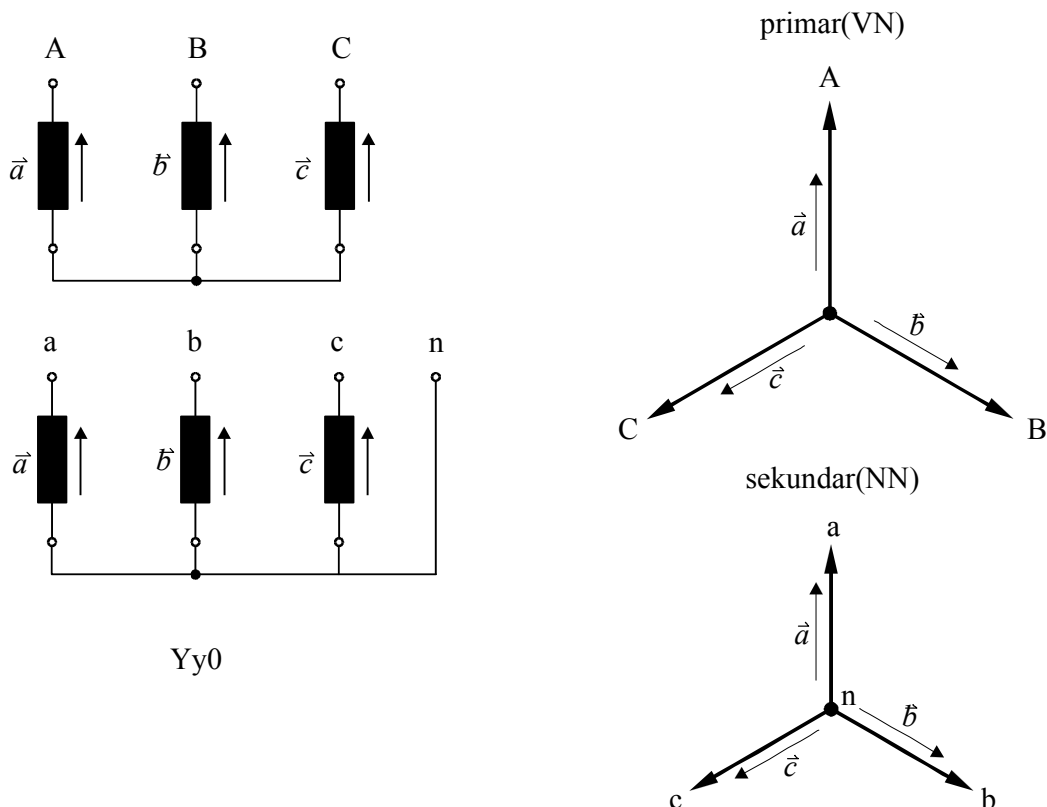
### NALOGA 2.12:

Trifazni transformator 35 kV / 0.4 kV, Yy = 0 želimo uporabiti na omrežju 20 kV, zato navitje prevezemo. Narišite vezalno shemo transformatorja za:

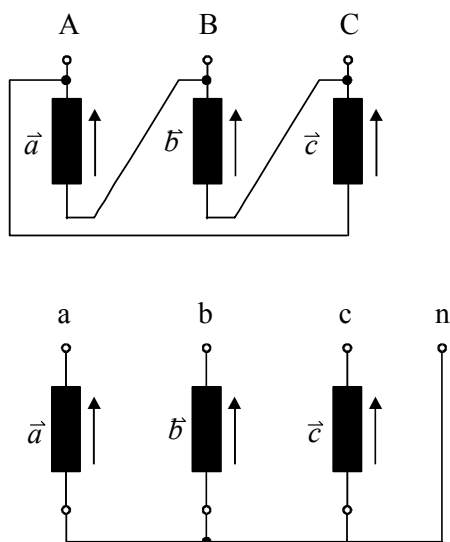
- vezavo Yy0,
- vezavo Dy11,
- vezavo Dy5.

Vsa navitja so navita v isto smer navijanja.

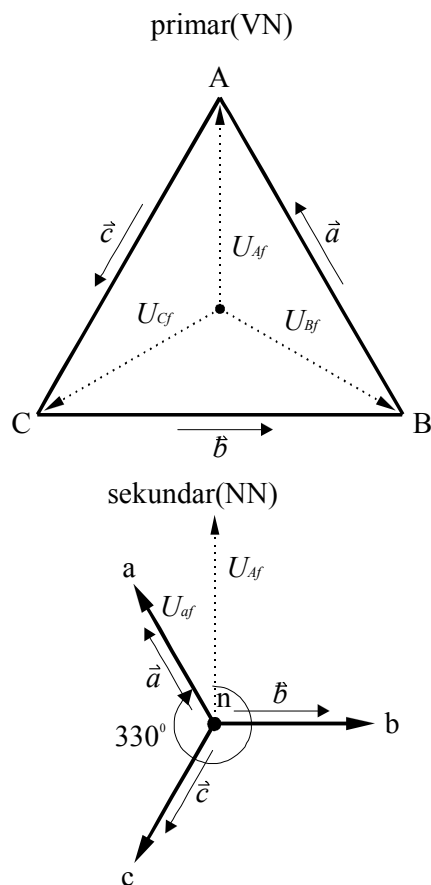
a)



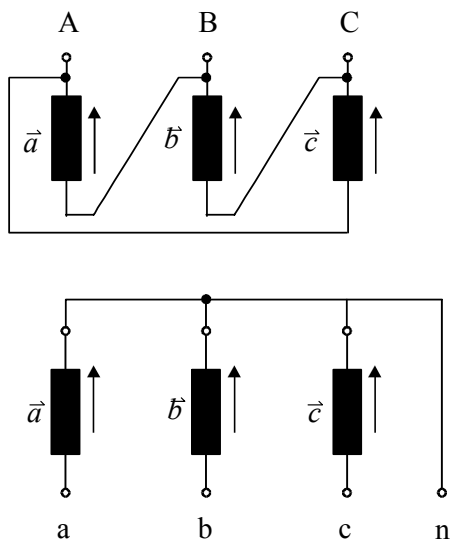
b)



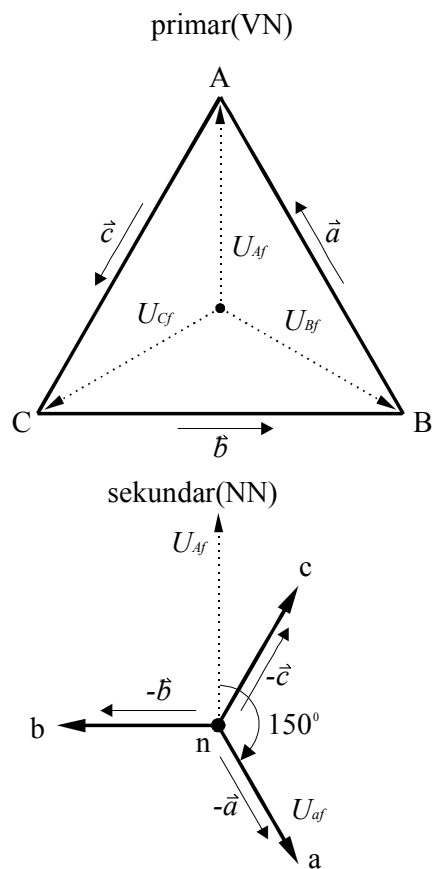
Dy11



c) Za 6 manjše fazno število (11-6=5) dobimo s prevezavo nizkonapetostnega navitja.

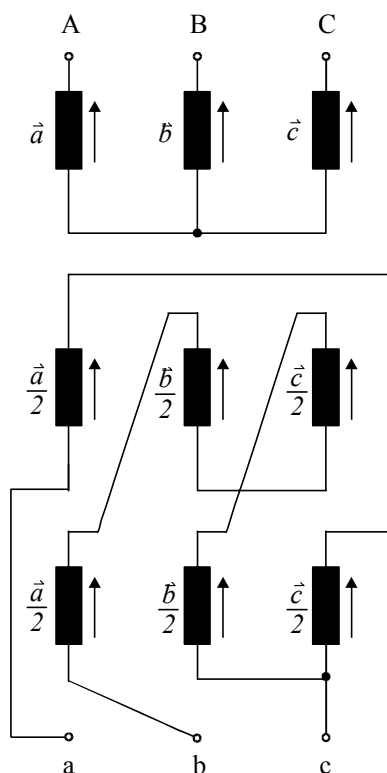


Dy5



**NALOGA 2.13:**

Transformator je na nizkonapetostni (sekundarni) strani napačno zvezan (skica). Kakšne so napetosti med nizkonapetostnimi priključnimi sponkami a, b in c, če je pri pravilni cik-cak (lomljena zvezda) vezavi medfazna napetost  $U_2 = U_{a-b} = U_{b-c} = U_{c-a} = 400 \text{ V}$ ?



Če je vezava pravilna, je fazna napetost:

$$U_{2f} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V.}$$

Napetost, ki se inducira na polovici sekundarnega navitja oziroma na eni sekundarni tuljavi, je:

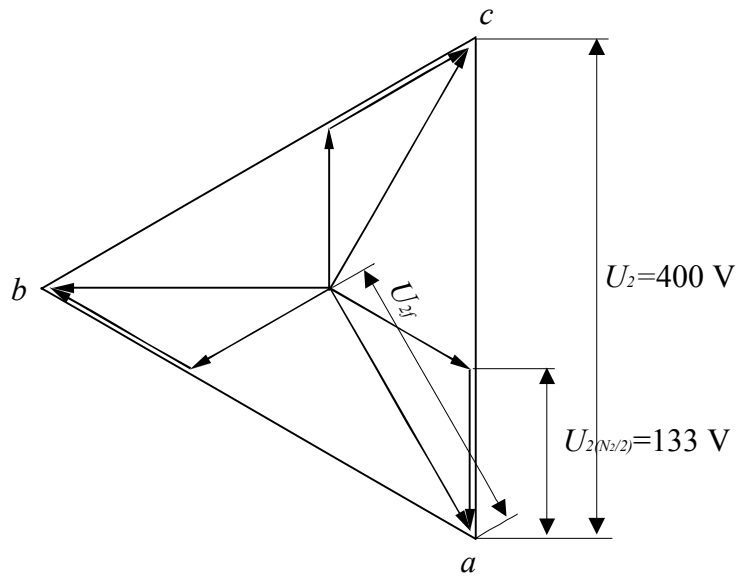
$$U_{2(N_2/2)} = \frac{U_{2f}}{\sqrt{3}} = \frac{U_2}{3} = \frac{400}{3} = 133 \text{ V.}$$

Po kazalčnem diagramu napačno zvezanega transformatorja so napetosti:

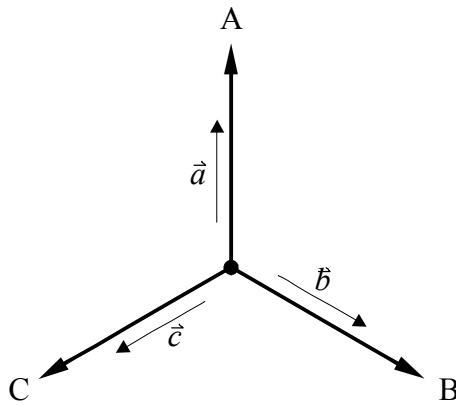
$$U_{a-c} = U_{2f} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{231 \text{ V}}}$$

$$U_{c-b} = U_{2f(N_{72})} + \sqrt{U_{2f}^2 + U_{2f(N_{72})}^2} = 133 + \sqrt{231^2 + 133^2} = \underline{\underline{400 \text{ V}}}$$

$$U_{a-b} = \sqrt{U_{2f}^2 + U_{c-b}^2} = \sqrt{231^2 + 400^2} = \underline{\underline{462 \text{ V}}}$$



primar(VN)



sekundar(NN)

