

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13Е013ЕНТ)

фeбруар 2020.

Трофазни дистрибутивни уљни трансформатор има следеће номиналне податке: $S_n = 500 \text{ kVA}$, $U_1/U_{20} = 1000/660 \text{ V}$, 50 Hz , спрега $Yzn11$, $N_1 = 800$, $P_{0n} = 3 \text{ kW}$, $\cos\varphi_{0n} = 0,3$, $u_{kn} = 6,2 \%$, $\cos\varphi_{kn} = 0,48$.

И део

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове. Означити све крајеве намотаја (почетке и крајеве). **(Т-7)**
2. Израчунати Филдов сачинилац сматрајући га једнаким за све намотаје и додатне губитке на референтној температури ако су отпори примарног и секундарног намотаја на 20°C мерени једносмерном струјом $R_{1f} = 0,025 \Omega$ и $R_{2f} = 0,01 \Omega$. **(З-9)**
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шема трансформатора са ВН стране и нацртати шему са унетим бројним вредностима свих параметара и електричним величинама. **(З-12)**
4. Одредити фактор снаге оптерећења везаног на секундар при коме се на месту прикључка на мрежу има јединични фактор снаге. Задатак решавати применом Γ заменске шеме. Посматрати случај да је струја на секундару једнака номиналној, а привидна снага на оптерећењу једнака номиналној снази трансформатора. Усвојити да је снага магнећења магнетног кола једнака вредности одређеној у огледу празног хода. **(З-12)**
5. Нацртати топлотну шему са два чвора и једним топлотним капацитетом (по том моделу се сматра да се по промени оптерећења промена разлике температура намотаја и уља догађа тренутно). **(Т-4)** Полазећи од претпоставке да су топлотни параметри шеме константни и познати, одредити порасте температуре намотаја и уља у односу на амбијент у једном стационарном стању (релативно струјно оптерећење K_I) и током прелазног топлотног процеса до кога долази при повећању оптерећења са K_I на K_2 . Може се сматрати да је промена губитака у магнетном колу занемарљиво мала и позната ($P_{Fe1} \approx P_{Fe2} = P_{Fen}$). Губици који су последица протицања струје при оптерећењу K_I су познати (P_{KI}), као и следеће: 95% тих губитака сконцентрисано у намотајима, а 5% у суду и конструкционим деловима, додатни губици, који су последица потискивања струје, износе 20% губитака добијених као производ отпора намотаја једносмерној струји и квадрата струје. При решавању задатка сматрати да су губици у суду и конструкционим деловима трансформатора сразмерни са квадратом оптерећења K , док је утицај температуре занемарљив. Температура амбијента је константна и износи ϑ_a . Користити апроксимацију да се температура уља током прелазног процеса, из почетно у крајње стационарно стање, мења по експоненцијалној функцији. **(Т-11)**

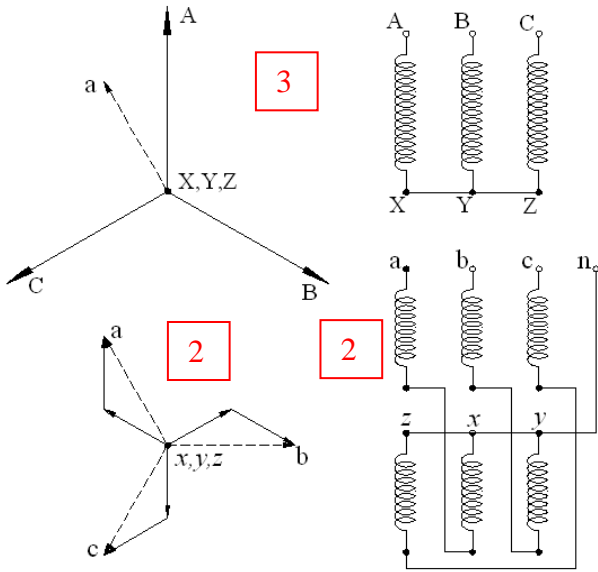
II део

6. Скицирати линије магнетне индукције по попречном пресеку намотаја примара и секундара у равни магнетног кола. Написати израз за силу која делује на мали део проводника, за познату вредност струје кроз проводник и аксијалне и радијалне компоненте магнетне индукције на посматраној позицији проводника. Скицирати аксијалне и радијалне компоненте магнетне индукције и силе на позицији при дну, око средине и на врху намотаја примара и секундара, и то за једну изо-линију магнетне индукције на примару и једну изо-линију магнетне индукције на секундару. **(Т-12)**
7. Колика је критична сила кидања у сваком навојку примара која потиче од аксијалне компоненте поља расипања, ако је висина оба намотаја 350 mm, средњи пречник намотаја примара 220 mm, коефицијент Роговског 0,92 и ако је примарни намотај спољашњи? **(З-10)**
8. Ако на намотај трансформатора, чији је један крај уземљен, наилази пренапонски талас амплитуде 1 MVA нацртати почетну, средњу и крајњу расподелу пренапона на намотају и означити критична места у погледу изолације намотаја. Колико износи максимална вредност напона према маси која се јавља у току прелазног процеса? Коефицијент расподеле пренапона износи 10. **(З-10)**
9. Паралелно задатом трансформатору прикључују се трансформатори снага $S_{n2} = 600 \text{ kVA}$ и $S_{n3} = 400 \text{ kVA}$ и напона кратког споја $u_{k2} = 5 \%$ и $u_{k3} = 7 \%$. Како ће трансформатори поделити укупно оптерећење од 1500 kVA? Колико износи максимална снага којом ови трансформатори могу бити оптерећени тако да у трајном раду ни један од њих не буде преоптерећен и колика су тада појединачна оптерећења? **(З-10)**
10. Нацртати Скотову спрегу **(Т-4)** и њен фазорски дијаграм **(Т-4)**. Полазећи од познатих номиналних (линијских) напона на примару U_p , номиналног напона на секундару U_s и (истог) броја навојака на оба примарна намотаја ($N_1' \approx N_1'' = N_1$), одредити број навојака на једном и другом намотају секундара. **(Т-5)**

Испит траје 180 минута, а други колоквијум (питања 6-10) 120 минута. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати оно што није за преглед. Т - Теорија, З - Задаци

РЕШЕЊА:

1.



$$2. R_{1,DC}^{75} = \frac{235 + 75}{235 + 20} \cdot 0,025 = 0,0304 \Omega, R_{2,DC}^{75} = \frac{235 + 75}{235 + 20} \cdot 0,01 = 0,0122 \Omega \quad (2)$$

$$n = \frac{U_1}{U_{02}} = \frac{1000}{660} = 1,515, \quad I_{1nf} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1000} = 288,7 \text{ A}$$

$$P_{Cu,DC}^{75} = 3 \cdot (R_{1,DC}^{75} + R_{2,DC}^{75} \cdot n^2) \cdot I_{1nf}^2 = 3 \cdot (0,0304 + 0,0122 \cdot 1,515^2) \cdot 288,7^2 = 14603 \text{ W} \quad (2)$$

$$u_m = u_{kn} \cos \varphi_{kn} = 6,2 \cdot 0,48 = 2,976\% \Rightarrow P_{kn} = \frac{u_m}{100} \cdot S_n = \frac{2,976}{100} \cdot 500 \cdot 10^3 = 14880 \text{ W} \quad (2)$$

$$k_F = \frac{P_{kn}}{P_{Cu,DC}^{75}} = \frac{14880}{14603} = 1,019, \quad P_d^{75} = P_{kn} - P_{Cu,DC}^{75} = 277 \text{ W} \quad (3)$$

$$3. R_1^{75} = k_F \cdot R_{1,DC}^{75} = 1,019 \cdot 0,0304 = 0,03098 \Omega$$

$$R_2^{75'} = k_F \cdot R_{2,DC}^{75} \cdot n^2 = 1,019 \cdot 0,0122 \cdot 1,515^2 = 0,02853 \Omega \quad (2)$$

$$R_k' = R_1^{75} + R_2^{75'} = 0,03098 + 0,02853 = 0,05951 \Omega$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{1nf}}{I_{1nf}} = \frac{6,2}{100} \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 288,7} = 0,124 \Omega$$

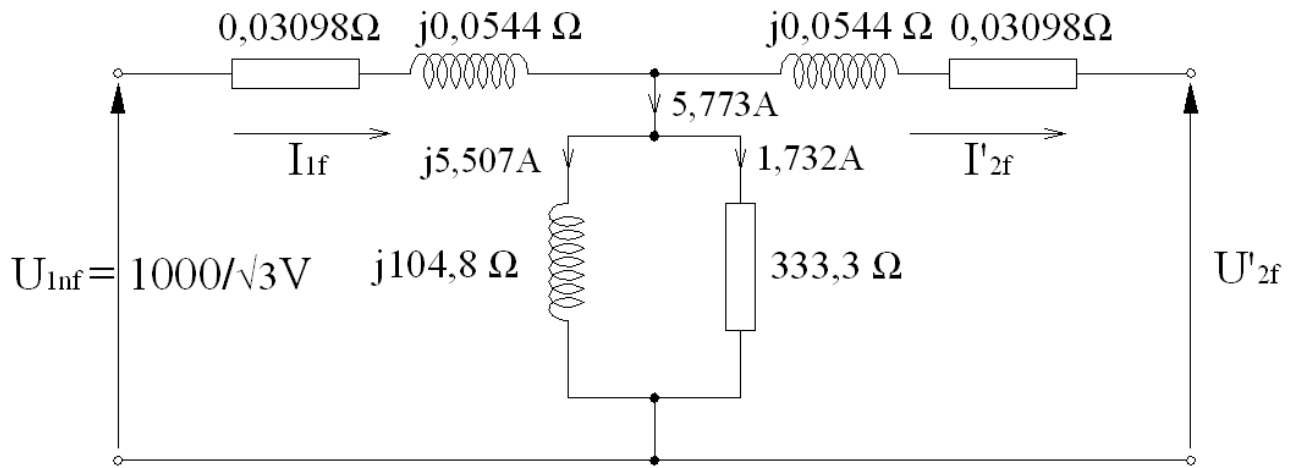
(2) + (2)

$$\Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 0,1088 \Omega \Rightarrow X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2}' = \frac{X_k}{2} = 0,0544 \Omega$$

$$R_a = \frac{U_{1nf}^2}{P_0/3} = \frac{1000^2}{3000} = 333,3 \Omega \Rightarrow I_{af} = \frac{U_{1nf}}{R_a} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 333,3} = 1,732 \text{ A} \quad (2)$$

$$I_{0f} = \frac{I_{af}}{\cos \varphi_0} = \frac{1,732}{0,3} = 5,773 \text{ A} \Rightarrow I_{\mu f} = \sqrt{I_{0f}^2 - I_{af}^2} = \sqrt{5,773^2 - 1,732^2} = 5,507 \text{ A} \quad (2)$$

$$X_\mu = \frac{U_{1nf}}{I_{\mu f}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 5,507} = 104,8 \Omega \quad (2)$$



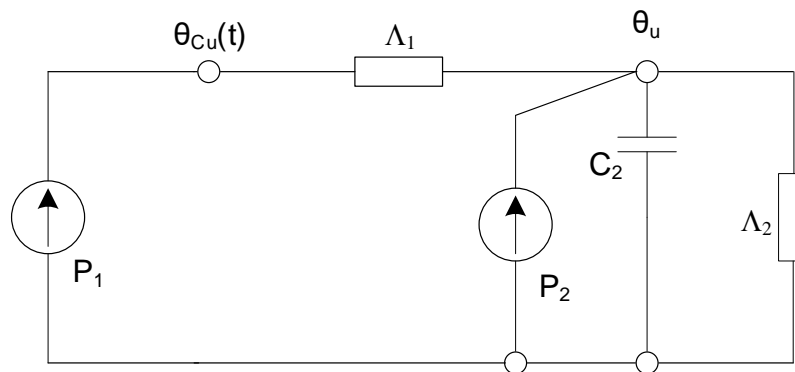
4. Реактивна снага оптерећења се може наћи из услова да фактор снаге треба да буде један, посматрано са стране мреже. То значи да реактивна снага коју ствара трансформатор (односно индуктивни елементи у заменској шеми-реактансе расипања и магнећења) мора бити компензована капацитивном реактансом оптерећења. Узимајући у обзир Г заменску шему трансформатора сведену на секундарну страну, услов да са секундарне стране трансформатора тече номинална струја и да се пад напона на импеданси кратког споја може занемарити, укупна реактивна снага трансформатора износи:

$$Q_{3f} = 3 \frac{U_{1nf}^2}{X'_{\mu}} + 3X''_k I_{2nf}^2 = 3 \cdot \frac{1000^2}{3 \cdot 104,8} + 3 \cdot 47,4 \cdot 10^{-3} \cdot 437,4^2 = 36,6 \text{ kvar} \quad (6)$$

Из услова да је снага оптерећења једнака номиналној снази трансформатора, тражени фактор снаге оптерећења износи:

$$\cos \varphi_{op} = \frac{\sqrt{S_n^2 - Q_{3f}^2}}{S_n} = \frac{\sqrt{500^2 - 36,6^2}}{500} = 0,99732 \text{ кар} \quad (6)$$

5.



Полазећи од претпоставке да су топлотни параметри шеме константни и познати, одредити порасте температуре намотаја и уља у односу на амбијент у једном стационарном стању (релативно струјно оптерећење K_1) и током прелазног топлотног процеса до кога долази при повећању оптерећења са K_1 на K_2 . Може се сматрати да је промена губитака у магнетном колу занемарљиво мала и позната ($P_{Fe1} \approx P_{Fe2} = P_{Fen}$). Губици који су последица протикања струје при оптерећењу K_1 су познати (P_{K1}), као и следеће: 95% тих губитака сконцентрисано у намотајима, а 5% у суду и конструкционим деловима, додатни губици, који су последица потискивања струје, износе 20% губитака добијених као производ отпора намотаја једносмерној струји и квадрата струје. При решавању задатка сматрати да су губици у суду и конструкционим деловима трансформатора сразмерни са квадратом оптерећења K , док је утицај температуре занемарљив. Температура амбијента је константна и износи ϑ_a .

Порасте температуре намотаја и уља у стационарном стању при K_1 :

$$\theta_{CuK1} = \frac{P_{1K1}}{\Lambda_1} + \frac{P_{1K1} + P_{2K1} + P_{Fen}}{\Lambda_2} = \frac{0,95 P_{K1}}{\Lambda_1} + \frac{0,95 P_{K1} + 0,05 P_{K1} + P_{Fen}}{\Lambda_2} = \frac{0,95 P_{K1}}{\Lambda_1} + \frac{P_{K1} + P_{Fen}}{\Lambda_2}$$

$$\theta_{uK1} = \frac{P_{1K1} + P_{2K1} + P_{Fen}}{\Lambda_2} = \frac{0,95 P_{K1} + 0,05 P_{K1} + P_{Fen}}{\Lambda_2} = \frac{P_{K1} + P_{Fen}}{\Lambda_2}$$

Температуре намотаја и уља у стационарном стању при K_1 :

$$\mathcal{G}_{CuK1} = \theta_{CuK1} + \mathcal{G}_a$$

$$\mathcal{G}_{uK1} = \theta_{uK1} + \mathcal{G}_a$$

Порасте температуре намотаја и уља у стационарном стању при K_2 :

$$P_{1K2} = P_{K1} \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 \left(0.8 \cdot 0.95 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK2}}{235 + \mathcal{G}_{CuK1}} + 0.2 \cdot 0.95 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK1}}{235 + \mathcal{G}_{CuK2}} \right)$$

$$P_{2K2} = 0.05 P_{K1} \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2$$

$$\theta_{uK2} = \frac{P_{1K2} + P_{2K2} + P_{Fen}}{\Lambda_2} = \frac{P_{K1} \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 \left(0.05 + 0.95 \left(0.8 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK2}}{235 + \mathcal{G}_{CuK1}} + 0.2 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK1}}{235 + \mathcal{G}_{CuK2}} \right) \right)}{\Lambda_2}$$

$$\theta_{CuK2} = \frac{P_{1K2}}{\Lambda_1} + \theta_u = P_{K1} \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 \left(\left(0.8 \cdot 0.95 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK2}}{235 + \mathcal{G}_{CuK1}} + 0.2 \cdot 0.95 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK1}}{235 + \mathcal{G}_{CuK2}} \right) + \frac{\left(0.05 + 0.95 \left(0.8 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK2}}{235 + \mathcal{G}_{CuK1}} + 0.2 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK1}}{235 + \mathcal{G}_{CuK2}} \right) \right)}{\Lambda_2} \right)$$

Температура намотаја при оптерећењу K_2 \mathcal{G}_{CuK2} ($\mathcal{G}_{CuK2} = \theta_{CuK2} + \mathcal{G}_a$) може се одредити решавањем једначине

$$\mathcal{G}_{CuK2} = P_{K1} \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 \left(\frac{\left(0.8 \cdot 0.95 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK2}}{235 + \mathcal{G}_{CuK1}} + 0.2 \cdot 0.95 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK1}}{235 + \mathcal{G}_{CuK2}} \right) + \left(0.05 + 0.95 \left(0.8 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK2}}{235 + \mathcal{G}_{CuK1}} + 0.2 \cdot \frac{235 + \mathcal{G}_{CuK1}}{235 + \mathcal{G}_{CuK2}} \right) \right)}{\Lambda_2} \right) + \mathcal{G}_a$$

Након што се на овај начин добије \mathcal{G}_{CuK2} , једноставно се добија и θ_{uK2} , а затим и временске промене температуре

Помена температуре намотаја након повећања оптерећења и пораста снага загревања са вредности P_1 на P_1' :

$$\mathcal{G}_{uK1-K2}(t) = \theta_{uK1} + (\theta_{uK2} - \theta_{uK1}) \left(1 - e^{-\frac{t}{C_2/\Lambda_2}} \right) + \mathcal{G}_a$$

$$\mathcal{G}_{CuK1-K2}(t) = \mathcal{G}_{uK1-K2}(t) + (\mathcal{G}_{CuK2} - \mathcal{G}_a)$$

6. Предавања, одељак 6.2.2. из Поглавља 6., почетак: страна 15, текст испод слике 6.11, завршетак страна 17, закључно са сликом 6.13

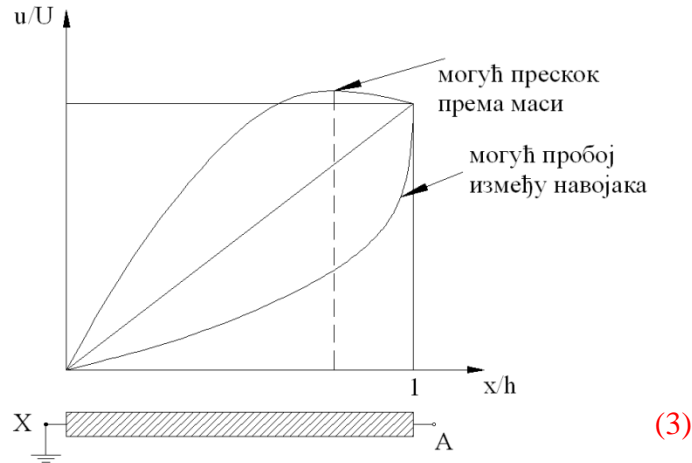
$$7. I_{k \max 1} = \sqrt{2} \cdot k_m \cdot \frac{100 I_n}{u_{k \%}}, \quad k_m = \left(1 + e^{-\frac{u_r}{u_x} \pi} \right) = \left(1 + e^{-\frac{2,976}{5,439} \pi} \right) = 1,179$$

$$I_{k \max 1} = \sqrt{2} \cdot 1,179 \cdot \frac{100 \cdot 288,7}{6,2} = 7763,9 \text{ A} \quad (3)$$

$$F_{r1} = \frac{1}{2} \cdot \pi \mu_0 \frac{k_R}{h} D_1 (N_1 I_{k \max 1})^2 = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,92}{0,35} \cdot 0,22 \cdot (800 \cdot 7763,9)^2 \approx 44 \cdot 10^6 \text{ N} \quad (4)$$

$$F_y = f_r R_1 = \frac{F_{r1}}{2\pi N_1} = 8,75 \text{ kN} \quad (3)$$

8.



Приближан израз за расподелу пренапона у прелазном режиму:

$$u(x) = 2U \frac{x}{h} - U \frac{sh \alpha x}{sh \alpha h} \quad (2)$$

Диференцирањем овог израза по x добија се место максималног напона који се јавља у прелазном режиму:

$$x = \frac{1}{\alpha} \cdot \operatorname{arch} \left(\frac{2}{\alpha h} \cdot sh(\alpha h) \right) = \frac{1}{10} \cdot \operatorname{arch} \left(\frac{2}{3,5} \cdot sh(3,5) \right) = 0,294 \text{ m} \quad (2)$$

Сада се може израчунати вредност максималног напона која се јавља у овој тачки намотаја:

$$u(0,294) = 2 \cdot 1 \cdot \frac{0,294}{0,35} - 1 \cdot \frac{sh 2,94}{sh 3,5} = 1,11 \text{ MV} \quad (3)$$

$$9. \quad S_i = \frac{S}{\frac{u_{ki}}{S_{ni}} \sum_i \left(\frac{S_{ni}}{u_{ki}} \right)}$$

$$\sum_i \left(\frac{S_{ni}}{u_{ki}} \right) = \frac{S_{n1}}{u_{k1}} + \frac{S_{n2}}{u_{k2}} + \frac{S_{n3}}{u_{k3}} = \frac{500}{6,2} + \frac{600}{5} + \frac{400}{7} = 257,8$$

$$S_1 = \frac{1500}{\frac{6,2}{500} \cdot 257,8} = 469,2 \text{ kVA}, \quad S_2 = \frac{1500}{\frac{5}{600} \cdot 257,8} = 698,2 \text{ kVA}$$

$$S_3 = \frac{1500}{\frac{7}{400} \cdot 257,8} = 332,48 \text{ kVA} \quad (4)$$

$$S_2 = S_{2n} = 600 \text{ kVA} = \frac{S_d}{\frac{5}{600} \cdot 257,8} \Rightarrow S_d = 1289 \text{ kVA} \quad (4)$$

$$S_1 = \frac{1289}{1500} \cdot 469,2 = 403,2 \text{ kVA}, \quad S_1 = \frac{1289}{1500} \cdot 332,48 = 285,7 \text{ kVA} \quad (2)$$

10. Поглавље 10, страна 2, слика 10.1.

$$(U_{MA} / U_{BC}) = ((U_{AC} \sin(60^\circ)) / U_{BC}) = (\sin(60^\circ)) = \sqrt{3} / 2$$

$$U_s' = U_{BC} / n' = U_{lin} / (N_1' / N_2') = U_{lin} / (N_1 / N_2')$$

$$U_s'' = U_{MA} / n'' = (\sqrt{3} / 2) U_{lin} / (N_1'' / N_2'') = (\sqrt{3} / 2) U_{lin} / (N_1 / N_2'')$$

$$U_s' = U_s''$$

$$U_{lin} / (N_1 / N_2') = (\sqrt{3} / 2) U_{lin} / (N_1 / N_2'')$$

$$n' = U_p / U_s = N_1' / N_2' = N_1 / N_2';$$

$$N_2' = N_1 / n' = (U_s / U_p) N_1$$

$$n'' = (\sqrt{3} / 2) n' .$$

$$N_2'' = (2 / \sqrt{3}) (U_s / U_p) N_1 = (2 / \sqrt{3}) N_2'$$