

12 TRANSFORMÁTORY

12.1 VŠEOBECNÁ ČASŤ

12.1.1 JEDNOFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY

Transformátor je netočivý elektrický stroj, ktorý mení elektrickú energiu na energiu iných parametrov (napätie a prúd) na základe javu elektromagnetickej indukcie. Jednofázový transformátor predstavuje dve cievky, ktoré sú navzájom magneticky viazané železným jadrom, ktoré znižuje magnetický odpor dráhy, na ktorej sa uzatvára základný indukčný tok transformátora spriahnutý s obidvoma jeho vinutiami. Zmenšenie magnetického odporu sa dosahuje pomocou materiálov s vysokou relatívnou permeabilitou. Kvôli zníženiu strát v dôsledku vírivých prúdov je jadro zložené z tenkých, navzájom izolovaných plechov. V ideálnom transformátore zanedbávame straty, úbytky napätí a magnetizačný prúd.

Magnetický tok v jadre transformátora sa mení harmonicky, takže platí

$$\Phi = \Phi_m \sin(2\pi ft) \quad (12.1)$$

kde Φ_m je maximálna hodnota magnetického indukčného toku a $f = \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)$ je frekvencia.

Z Faradayovho zákona okamžitá hodnota napätia v primárnom vinutí u_{i1} je daná vzťahom

$$u_{i1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} = N_1 \frac{d}{dt} \{\Phi_m \sin(2\pi ft)\} = N_1 2\pi f \Phi_m \cos(\omega t). \quad (12.2)$$

Maximálna hodnota napätia je

$$U_{i1m} = 2\pi f N_1 \Phi_m. \quad (12.3)$$

Keďže pre efektívnu hodnotu platí

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (12.4)$$

a v ideálnom transformátore sú zdanlivé výkony na primárnom a sekundárnom vinutí rovnaké,

$$S_1 = S_2, \quad (12.5)$$

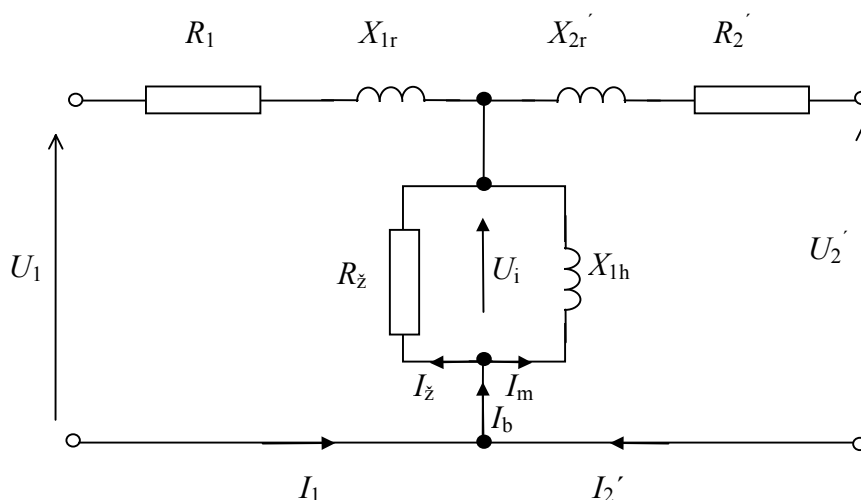
definujeme prevod transformátora ako

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (12.6)$$

V skutočnom (reálnom) transformátore sa uplatňujú najmä tieto reálne vlastnosti, ktoré sa nazývajú stratami:

- rozptylový magnetický tok (rozptyl),
- straty v jadre transformátora, predovšetkým hysterezné a vírivými prúdmi,
- straty v odporoch oboch vinutí.

Prúdové, napäťové a výkonové pomery reálneho jednofázového transformátora vystihuje náhradná schéma (obr. 12.1)



Obr. 12.1 Náhradná schéma transformátora

V obr. 12.1 znamená: R_1 - odpor vinutia vstupnej strany, X_{1r} - rozptylová reaktancia vstupnej strany, R_2' - odpor vinutia výstupnej strany prepočítaný na vstupnú stranu, X_{2r}' - rozptylová reaktancia výstupnej strany prepočítaná na vstupnú stranu, R_z - odpor, ktorý predstavuje straty v železe, X_h - hlavná reaktancia predstavujúca spoločný magnetický tok, Z - zaťažujúca impedancia, U_1 , I_1 , U_2' , I_2' - napätie a prúd vstupnej strany, resp. výstupnej strany prepočítané na vstupnú stranu, I_b - budiaci prúd, I_m - magnetizačný prúd, I_z - stratový prúd, ktorý vytvára straty v železe, U_i - indukované napätie na vstupnej strane.

Prepočítanie sekundárnych veličín na primárnu stranu:

$$R_2' = p^2 R_2 \quad X_{2r}' = p^2 X_{2r} \quad (12.7)$$

$$U_2' = p U_2 \quad I_2' = I_2 / p. \quad (12.8)$$

Prevádzkové stavy transformátora

Pri chode transformátora naprázdno sa z výstupného vinutia neodoberá prúd, $I_2 = 0$ a na vstupnom vinutí je menovité napätie U_{1n} . Transformátor odoberá prúd naprázdno I_{10} ,

ktorého hodnota je pri veľkých transformátoroch 3 – 5 % a pri malých 10 % a viac menovitého prúdu I_{1N} .

Vstupné svorkové napätie U_1 sa približne rovná vnútornému indukovanému protinapätíu U_{i1} , lebo úbytky na R_1 a X_{r1} úmerne klesnú s poklesom prúdu I_1 na I_{10} . Výstupné napätie naprázdno U_{20} sa rovná vnútornému napätíu U_{2i} . Nameraný príkon pri chode naprázdno podľa náhradnej schémy sa veľmi blíži stratám v železe

$$\Delta P_o = R_1 \cdot I_{10}^2 + R_{Fe} \cdot I_{Fe}^2 \approx \Delta P_{Fe}, \quad (12.9)$$

účinník

$$\cos \varphi_o = \frac{\Delta P_o}{U_{10} \cdot I_{10}}. \quad (12.10)$$

Fázový posuv φ_0 medzi prúdom naprázdno I_{10} a napätím má hodnotu $\cos \varphi_0 = 0,05$ až $0,1$.

Menovité zaťaženie transformátora je stav, keď na výstupnom vinutí je menovité napätie U_{2N} a menovitý prúd I_{2N} pri určitom $\cos \varphi_2$ (0,8 až 1), a podobne na vstupe sú menovité hodnoty U_{1N} a I_{1N} . Menovitá sieťová frekvencia je $f_n = 50$ Hz, všetky menovité hodnoty sú uvádzané na štítku transformátora.

Transformátor môže byť zaťažený aj tzv. **nadprúdom**, ktorý môže byť asi o 20 % väčší ako menovitý, ale len na obmedzený čas, pokiaľ neprekročí teplota vinutia dovolenú maximálnu teplotu.

Chod transformátora **nakrátko** je stav, keď sú svorky výstupného vinutia spojené nakrátko a na vstup je privedený menovitý prúd $I_{1k} = I_{1N}$. Vstupné napätie nakrátko U_{1k} musí byť výrazne menšie ako menovité (len niekoľko percent). Zmyslom merania nakrátko je určenie percentuálneho napätia nakrátko

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \cdot 100 \%. \quad (12.11)$$

Pre chod nakrátko sa môže upraviť náhradná schéma na obr. 12.1 tak, že vynecháme paralelnú vetvu s X_{1h} a R_{Fe} , ktorá je premostená malou impedanciou s R_2' a X_{2r}' . Zlúčením činných a reaktančných zložiek získame jednoduchú náhradnú schému pre chod nakrátko, v ktorej činný odpor nakrátko R_k a reaktancia nakrátko X_k tvorí impedanciu nakrátko Z_k . Platí, že

$$R_1 + R_2' = R_{1k}, \quad (12.12)$$

$$X_{1r} + X_{2r}' = X_{1k}, \quad (12.13)$$

$$Z_{1k} = R_{1k} + j X_{1k}. \quad (12.14)$$

Pre prúd nakrátko platí

$$I_{1k} = \frac{U_{1N}}{Z_{1k}} = \frac{U_{1k}}{u_k \cdot Z_{1k}} = \frac{I_{1N}}{u_k} \quad (12.15)$$

Skrat na výstupnej strane transformátora (prepojenie svoriek veľmi malou impedanciou napr. pri poruche izolácie), keď na vstupnej strane je napájaný z „tvrdého“ zdroja napätia U_1 (napr. rozvodná sieť), má za následok nárast vstupného prúdu na ustálenú hodnotu skratového prúdu.

Pomerná impedancia (nakrátko) transformátora je

$$z = \frac{Z_{1k}}{Z_{1N}} = \frac{Z_{1k} \cdot I_{1N}}{Z_{1N} \cdot I_{1N}} = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} = u_k \quad (12.16)$$

pomerný činný odpor

$$r = \frac{R_{1k}}{Z_{1N}} = \frac{R_{1k} \cdot I_{1N}^2}{Z_{1N} \cdot I_{1N}^2} \approx \frac{\Delta P_k}{S_N} \quad (12.17)$$

Pomerná reaktancia transformátora

$$x = \frac{X_{1k}}{Z_{1N}} \quad (12.18)$$

Účinnosť transformátora

Straty v transformátore pozostávajú zo strát v železe a vo vinutí. Straty v železe $\Delta P_{Fe} \cong \Delta P_o$ sú pri rôznej záťaži za stále, pretože indukované napätie, resp. magnetický tok sa málo mení. Straty vo vinutí (Joulove straty) $\Delta P_j = \Delta P_k$ sú závislé od štvorca zaťažovacieho prúdu.

Pre celkové straty platí

$$\Delta P = \Delta P_o + \Delta P_k \cdot v_T^2 \quad (12.19)$$

$$v_T = \frac{I}{I_N} = \frac{P}{P_N} = \frac{S}{S_N} \quad \cos \varphi_2 = \text{konšt.} \quad (12.20)$$

kde v_T pomerná záťaž transformátora (zaťažovateľ), P a P_N sú činný a menovitý činný výkon, S a S_N sú zdanlivý a menovitý zdanlivý výkon transformátora. Účinnosť transformátora je

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{v_T \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2}{v_T \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + \Delta P_o + \Delta P_k \cdot v_T^2} \quad (12.21)$$

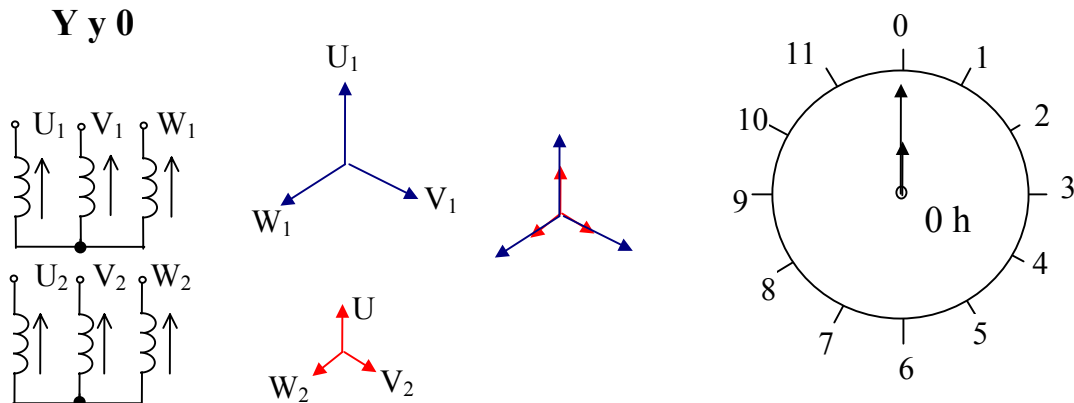
Energetický transformátor je zvyčajne navrhnutý tak, aby maximálna účinnosť bola asi pri 75 % menovitej záťaže ($v_T = 0,75$).

12.1.2 TROJFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY

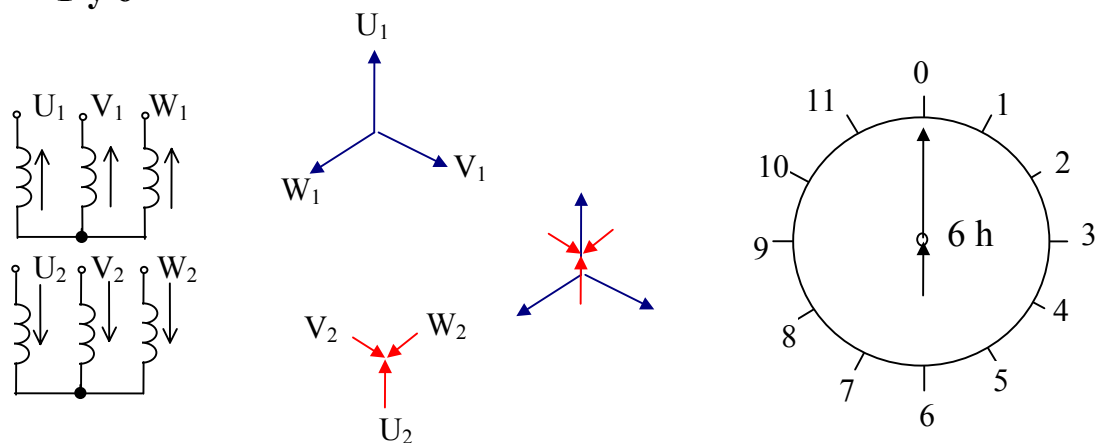
Trojfázové vinutia každej strany transformátora môžeme zapojiť do hviezdy (Y, y), trojuholníka (D, d) a do lomenej hviezdy (z). Uhol medzi fázorom napätia vstupnej (vn) strany a fázorom napätia výstupnej (nn) strany sa nazýva hodinové číslo. Tento uhol je totiž násobkom uhla 30° , čo zodpovedá jednej hodine na hodinách.

Teoreticky možno pri bežnom transformátore uskutočniť 36 rôznych zapojení. Pre účely praxe sú však vhodné len niektoré.

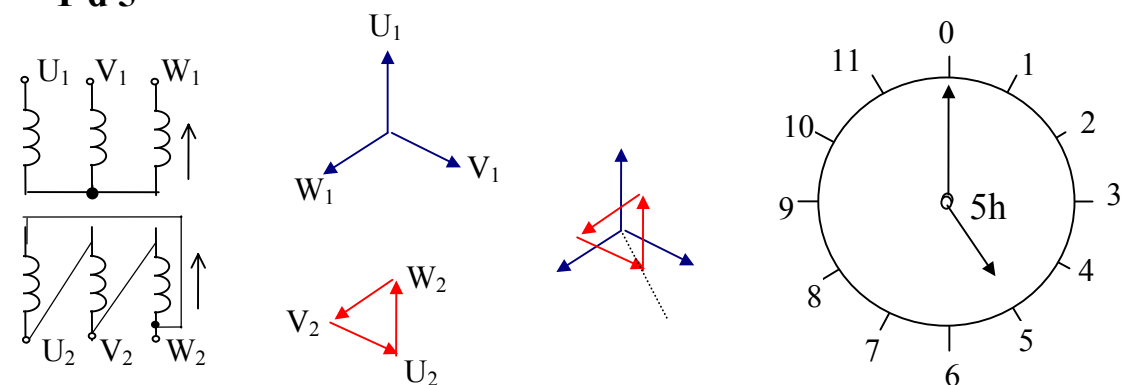
① Y y 0



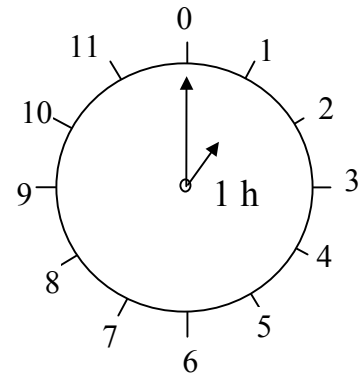
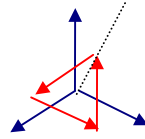
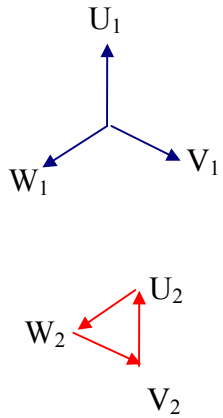
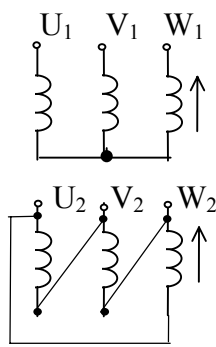
② Y y 6



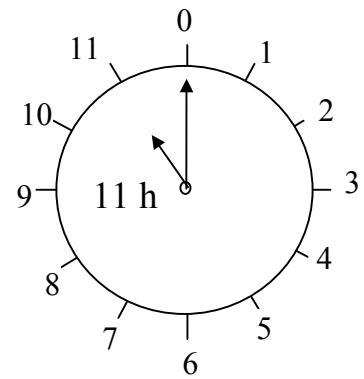
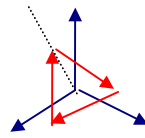
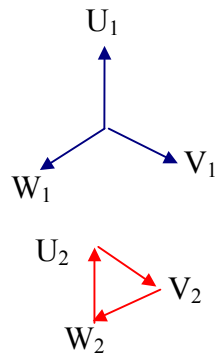
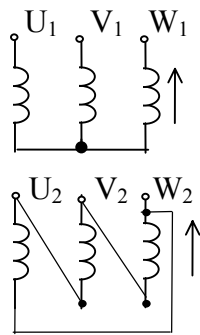
③ Y d 5



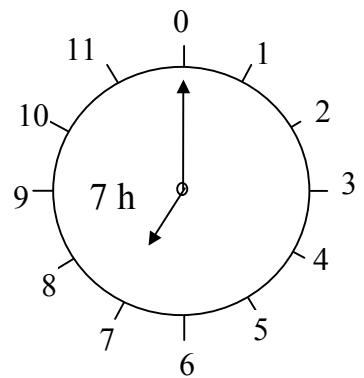
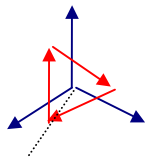
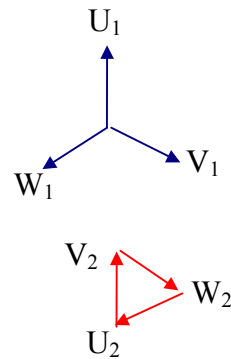
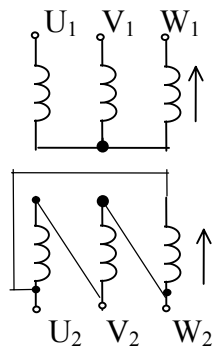
④ **Y d 1**



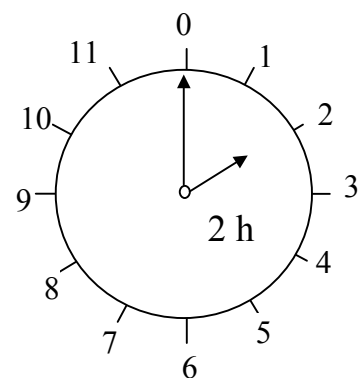
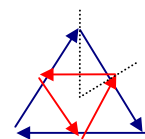
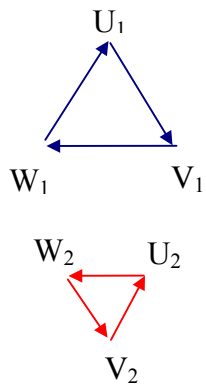
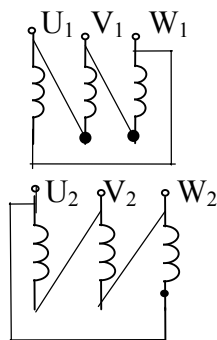
⑤ **Y d 11**



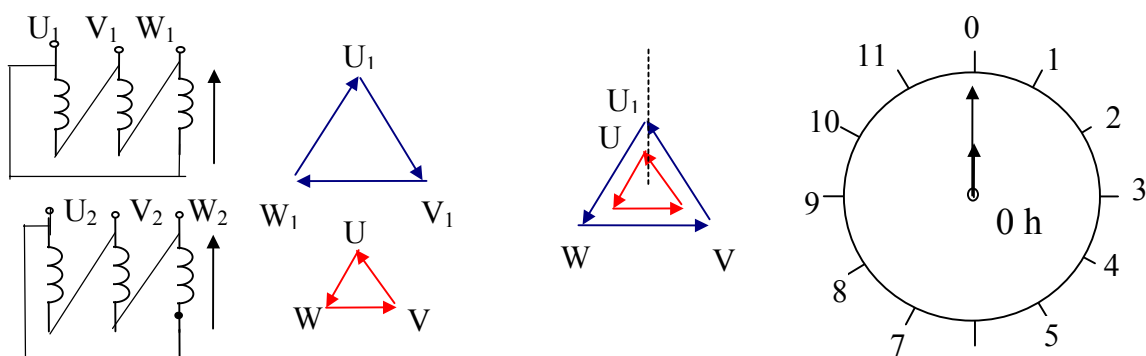
⑥ **Y d 7**



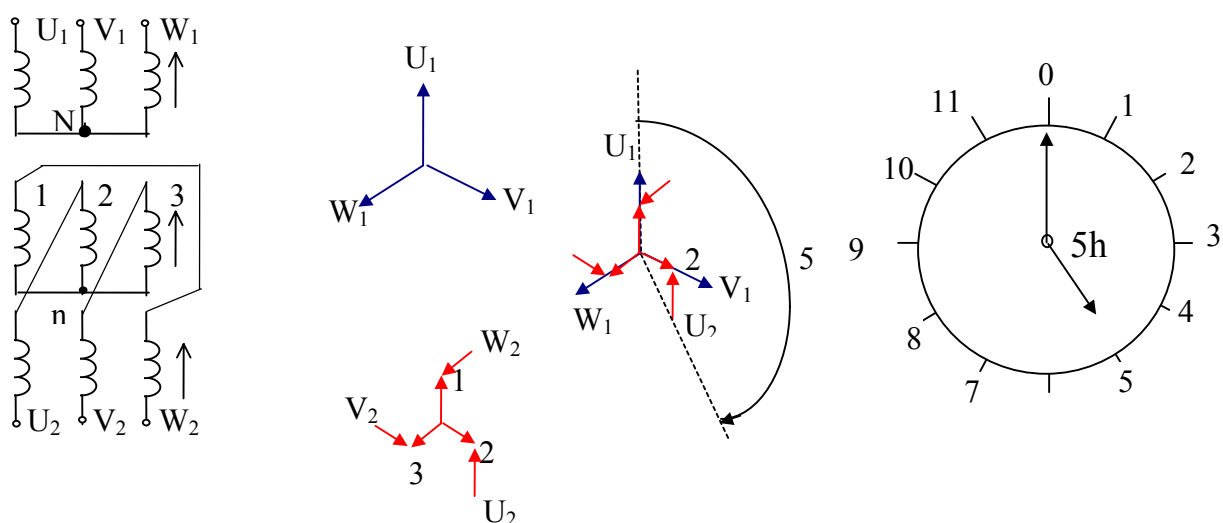
⑦ **D d 2**



⑧ **D d 0**



⑨ **Y z 5**



Pre činný výkon trojfázového transformátora platí

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi . \quad (12.22)$$

Na štítku transformátora býva udaný zdanlivý výkon. Menovitý prúd určíme zo štítkových hodnôt podľa vzťahu

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{1N}} . \quad (12.23)$$

Pre účinnosť transformátora platí vzťah

$$\eta = 100 - \frac{1}{\cos \varphi} \left(\frac{z_0}{\nu} + z_k \cdot \nu \right) , \quad (12.24)$$

kde z_0 sú percentuálne straty naprázdno

$$z_0 = \frac{\Delta P_{Fe}}{S_n} \cdot 100 \% , \quad (12.25)$$

z_k sú percentuálne straty nakrátko

$$z_k = \frac{\Delta P_j}{S_N} \cdot 100 \% \quad (12.26)$$

a v_T pomerná záťaž transformátora (zaťažovateľ)

$$v_T = \frac{I}{I_N} = \frac{P}{P_N} = \frac{S}{S_N} . \quad (12.27)$$

12.2 RIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 12.2.1. Zvončekový transformátor s primárnym napätím $U_{1N} = 230 \text{ V}$, sekundárnym napätím $U_{2N} = 4 \text{ V}$ dodáva prúd $I_{2N} = 0,2 \text{ A}$. Aký veľký je výkon S_{2N} a aký veľký je primárny prúd I_{1N} ? Straty zanedbajte.

Riešenie: Výkon na sekundárnej strane transformátora vypočítame

$$S = U_{2N} \cdot I_{2f} = 0,2 \text{ V} \cdot 4 \text{ A} = 0,8 \text{ VA} .$$

Pri zanedbaní strát je

$$S_{1N} = S_{2N}$$

a prúd na primárnej strane

$$I_{1N} = \frac{S_{1N}}{U_{1N}} = \frac{0,8 \text{ VA}}{230 \text{ V}} = 0,00348 \text{ A} = 3,48 \text{ mA} .$$

Príklad 12.2.2. Transformátor sieťového adaptéra pre notebook má v stave naprázdno primárne napätie $U_{10} = 230 \text{ V}$ a sekundárne $U_{20} = 16 \text{ V}$. Primárne vinutie má $N_1 = 540$ závitov a je napájané sínusovým napätím frekvencie $f = 50 \text{ Hz}$, prierez jadra transformátora je $S = 15 \text{ cm}^2$. Za predpokladu, že ide o ideálny transformátor, vypočítajte:

- maximálnu hodnotu magnetickej indukcie v jadre transformátora B_m ,
- prevod p ,
- počet závitov sekundárneho vinutia N_2 .

Riešenie: a) Pre maximálnu hodnotu magnetickej indukcie bude platiť

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S} ,$$

pričom Φ_m maximálna hodnota magnetického toku sa určí zo vzťahu pre efektívnu hodnotu indukovaného napätia

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m.$$

Ak zanedbáme úbytky napätia prechodom prúdu naprázdno na primárnej strane (rádovo desatiny percenta menovitého napätia), môžeme písať

$$U_i \doteq U_{10},$$

potom

$$\Phi_m = \frac{U_{10}}{4,44 \cdot N_1 \cdot f} = \frac{230 \text{ V}}{4,44 \cdot 540 \cdot 50 \text{ s}^{-1}} = 1,92 \cdot 10^{-3} \text{ Wb},$$

$$B_m = \frac{1,92 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 1,279 \text{ T}.$$

b) Prevod jednofázového transformátora je daný pomerom indukovaných napätí

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} \doteq \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{230 \text{ V}}{16 \text{ V}} = 14,375.$$

Pri použití uvedeného vzorca pre U_i môžeme písať

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Z toho počet sekundárnych závitov

$$N_2 = \frac{N_1}{p} = \frac{540}{14,375} = 37,6 \quad \text{tzn. 38 závitov.}$$

Príklad 12.2.3. Jednofázový ideálny transformátor má menovitý výkon $S_N = 1 \text{ kVA}$ a menovité napätie $U_{1N} = 220 \text{ V}$, $U_{2N} = 110 \text{ V}$.

Pri zanedbaní strát, úbytkov napätí a magnetizačného prúdu vypočítajte:

- menovité prúdy,
- wattový výkon pri menovitom zaťažení, ak $\cos \varphi = 0,78$,
- menovitú impedanciu Z_{1n} tohto transformátora.

Riešenie: Pri zanedbaní uvedených veličín môžeme vychádzať z rovnice

$$U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

a) Sekundárny menovitý prúd určíme zo štítkového výkonu

$$S_N = U_{2N} I_{2N},$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{1000 \text{ VA}}{110 \text{ V}} = 9,09 \text{ A}.$$

Podobne vypočítame primárny menovitý prúd

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{1000 \text{ VA}}{220 \text{ V}} = 4,54 \text{ A}.$$

b) Činný výkon transformátora bude

$$P_2 = U_{2N} \cdot I_{2N} \cdot \cos \varphi = 110 \text{ V} \cdot 9,09 \text{ A} \cdot 0,78 = 780 \text{ W}.$$

c) Menovitú impedanciu vypočítame

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{220 \text{ V}}{4,54 \text{ A}} = 48,46 \Omega.$$

Príklad 12.2.4. Jednofázový transformátor s menovitým napätím $U_{1N} = 230 \text{ V}$, $U_{2N} = 125 \text{ V}$ a menovitým prúdom $I_{1N} = 25 \text{ A}$ napája usmerňovač staničnej batérie. Pri skúške transformátora bolo namerané napätie nakrátko $U_{1k} = 18,4 \text{ V}$. Určte percentuálne napätie nakrátko u_k , skutočný ustálený skratový prúd I_{1k} a I_{2k} v primárnom a sekundárnom vinutí.

Riešenie: Napätie nakrátko

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \cdot 100 = \frac{18,4 \text{ V}}{230 \text{ V}} \cdot 100 = 8,0 \%,$$

ustálený skratový prúd v primárnom a sekundárnom vinutí

$$I_{1k} = \frac{I_{1N}}{u_k} \cdot 100 = \frac{25 \text{ A}}{8} \cdot 100 = 312,5 \text{ A},$$

$$I_{2k} = p \cdot I_{1k} = 1,84 \cdot 312,5 \text{ A} = 575,0 \text{ A},$$

kde p je prevod transformátora

$$p = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{230 \text{ V}}{125 \text{ V}} = 1,84.$$

Príklad 12.2.5. Jednofázový transformátor so štítkovými údajmi: $U_{1N} = 220 \text{ V}$, $U_{2N} = 12 \text{ V}$, $S_N = 1,1 \text{ kVA}$, má percentuálne napätie nakrátko $u_k = 4 \%$. Transformátor bol pri menovitej prevádzke omylom na sekundárnej strane skratovaný. Treba určiť:

- aké ustálené skratové prúdy budú tiecť pri primárnej I_{k1} a sekundárnej strane I_{k2}
- aké veľké napätie môžeme v stave nakrátko na primár pripojiť, aby to transformátor tepelne vydržal.

Riešenie: a) Na určenie skratového prúdu použijeme vzťah

$$I_k = \frac{I_N}{u_k} \cdot 100 \%$$

Prúd nakrátko primárnej strany bude

$$I_{k1} = \frac{I_{1N}}{u_k} 100 \% = \frac{5 \text{ A}}{4} 100 \% = 125 \text{ A}.$$

Pre určenie prúdu nakrátko sekundárnej strany vypočítame najprv prevod

$$p \doteq \frac{220 \text{ V}}{12 \text{ V}} = 18,3,$$

potom $I_{k2} = I_{k1} \cdot p = 125 \text{ A} \cdot 18,3 = 2290 \text{ A}$.

a) Transformátor je tepelne navrhovaný na menovité prúdy. Veľkosť napätia, pri ktorom v stave napätia tečú pravé menovité prúdy je napätím nakrátko U_{kN} [V].

Percentuálne napätie nakrátko

$$u_k = \frac{U_{kN}}{U_N} \cdot 100 \%,$$

pričom U_N je menovité napätie tej strany transformátora na ktorú sa vzťahuje U_{kN} .

Z toho

$$U_{kN1} = \frac{u_k}{100 \%} \cdot U_{1N} = \frac{4 \%}{100 \%} 220 \text{ V} = 8,8 \text{ V}.$$

Toto napätie môžeme pripojiť v stave nakrátko na primárnu stranu.

Príklad 12.2.6. Primárne vinutie transformátora má $N_1 = 660$ závitov a $U_1 = 230 \text{ V}$. Výstupná cievka má dve sekundárne vinutia (podľa obr. 12.2) s napätiami $U_2 = 3 \text{ V}$ a $U_3 = 5 \text{ V}$.

Vypočítajte: a) prevody p_2 a p_3 ,

b) počty závitov vinutí N_2 a N_3 ,

c) prúd tečúci primárnym vinutím I_1 , ak prúd, odoberaný sekundárnym vinutím s napätím U_3 je $I_3 = 200 \text{ mA}$.

Riešenie: a) $p_2 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230 \text{ V}}{3 \text{ V}} = 76,66$ $p_3 = \frac{U_1}{U_3} = \frac{230 \text{ V}}{5 \text{ V}} = 46$

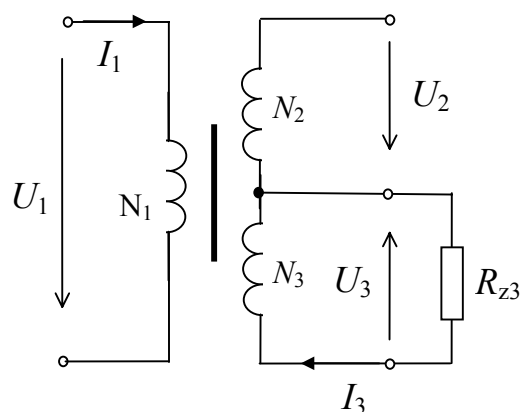
b) $N_2 = \frac{N_1}{p_2} = \frac{660}{76,66} = 8,61$

($N_2 = 9$ závitov)

$$N_3 = \frac{N_1}{p_3} = \frac{660}{46} = 14,34$$

($N_3 = 15$ závitov)

c) $\frac{I_1}{I_3} = \frac{N_3}{N_1}$



Obr. 12.2

$$I_1 = I_3 \frac{N_3}{N_1} = 0,2 \text{ A} \frac{15}{660} = 4,55 \text{ mA}.$$

Príklad 12.2.7. Jednofázový transformátor so zdanlivým výkonom 40 kVA, s primárnym a sekundárnym napätím 2000/250 V má odpory vinutí $R_1 = 1,15 \text{ } \Omega$ a $R_2 = 0,0155 \text{ } \Omega$ a rozptylové indukčnosti $L_{1r} = 7,96 \text{ mH}$ a $L_{2r} = 0,124 \text{ mH}$. Vypočítajte menovitý prúd transformátora, impedanciu nakrátko a straty vo vinutí transformátora pri plnom zaťažení.

Riešenie: Menovitý prúd transformátora vypočítame zo zdanlivého výkonu a napätia na sekundárnej strane

$$I_{2N} = \frac{S}{U_2} = \frac{40 \cdot 10^3 \text{ m}^2}{250 \text{ V}} = 160 \text{ A}.$$

Prevod transformátora je pomer napätí

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{2000 \text{ V}}{250 \text{ V}} = 8.$$

Prepočítaný odpor sekundárneho vinutia na primárne vinutie

$$R'_2 = p^2 R_2 = 8^2 \cdot 0,0155 \text{ } \Omega = 0,992 \text{ } \Omega.$$

Prepočítaná rozptylová reaktancia sekundárneho vinutia na primárne vinutie

$$X'_{2r} = p^2 \omega L_{2r} = 8^2 \cdot 314 \text{ s}^{-1} \cdot 0,000124 \text{ H} = 2,492 \text{ } \Omega.$$

Impedancia nakrátko transformátora

$$Z_k = R_1 + R'_2 + j(X_{1r} + X'_{2r}) = [1,15 + 0,992 + j(2,5 + 2,492)] \Omega = (2,142 + j 5) \Omega.$$

Straty vo vinutí transformátora vypočítame zo vzťahu

$$P_v = R_k I_{1n}^2 = (R_1 + R'_2) I_{1n}^2 = R'_k I_{2n}^2.$$

Reálnu časť impedancie nakrátko prepočítajme na sekundárnu stranu:

$$R'_k = \frac{R_1}{p^2} + R_2 = \frac{1,15 \text{ } \Omega}{64} + 0,0155 \text{ } \Omega = 0,0335 \text{ } \Omega.$$

Vtedy straty vo vinutí

$$P_v = R'_k I_{2n}^2 = 0,0335 \text{ } \Omega \cdot 160^2 \text{ A}^2 = 857 \text{ W}.$$

Príklad 12.2.8. Jednofázový transformátor má tieto parametre: $R_1 = 0,9 \text{ } \Omega$, $R_2 = 0,03 \text{ } \Omega$, $X_{1r} = 5 \text{ } \Omega$, $X_{2r} = 0,13 \text{ } \Omega$. Prevod transformátora $p = 6$, frekvencia v sieti $f = 50 \text{ Hz}$. Vypočítajte, aký prúd nakrátko preteká primárnym a sekundárnym vinutím transformátora, ak na jeho primárnu stranu v stave nakrátko privedieme napätie 330 V.

Riešenie: Veľkosť impedancie nakrátko transformátora

$$Z_k = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{1r} + X_{2r}')^2} = \sqrt{(0,9 + 6^2 \cdot 0,03)^2 + (5 + 6^2 \cdot 0,013)^2} \Omega = 9,86 \Omega.$$

Prúd nakrátko pretekajúci primárnym vinutím vypočítame zo vzťahu

$$I_{1k} = \frac{U_{1k}}{Z_k} = \frac{330 \text{ V}}{9,86 \Omega} = 33,5 \text{ A}.$$

Prúd nakrátko pretekajúci sekundárnym vinutím

$$I_{2k} = p I_{1k} = 6 \cdot 33,5 \text{ A} = 201 \text{ A}.$$

Fáza impedancie nakrátko transformátora

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{X_k}{R_k} = \frac{9,68 \Omega}{1,98 \Omega} = 4,9,$$

$$\varphi_k = 78,5^\circ.$$

Účinník nakrátko transformátora

$$\cos \varphi_k = 0,2.$$

Príklad 12.2.9. Transformátor s transformáciou nadol má účinnosť 95 % a dvakrát viac primárnych závitov než sekundárnych. Ak je menovitý sekundárny prúd 10 A pri napätí 120 V, aký je primárny prúd a napätie? Aká je maximálna hodnota napätia na primáre?

$$\text{Riešenie: } \eta = \frac{P_2}{P_1} = 0,95,$$

$$U_{1N} = p U_{2N} = 2 \cdot 120 \text{ V} = 240 \text{ V},$$

$$I_{2N} = \frac{U_2 I_2}{\eta U_1} = \frac{120 \text{ V} \cdot 10 \text{ A}}{0,95 \cdot 240 \text{ V}} = 5,26 \text{ A},$$

$$U_{1\max} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{2}} = 339,5 \text{ V}.$$

Príklad 12.2.10. Trojfázový transformátor Yy0 so štítkovými hodnotami 500 kVA, 3000/400 V sa skúšal nakrátko. Pri skratovanej sekundárnej strane tiekol na primárnej strane prúd 25 A pri zníženom napätí 46,8 V. Treba určiť:

- ustálený skratový prúd primárnej I_{1kt} a sekundárnej strany I_{2kt} ,
- percentuálne napätie nakrátko u_k ,
- nárazový skratový prúd primárnej $I_{1knár.}$ a sekundárnej $I_{2knár.}$

Riešenie: Pre ustálený skratový prúd I_{kt} platí

$$I_k = \frac{I_{1N}}{u_k} \cdot 100\%,$$

pričom I_{1N} je menovitý prúd primárnej strany, u_k percentuálne napätie nakrátko.

Zo štítkových hodnôt určíme I_{1N}

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{1N}} = \frac{500\,000 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot 3000 \text{ V}} = 96,2 \text{ A}$$

Percentuálne napätie nakrátko u_k je definované

$$u_k = \frac{U_{kN}}{U_N} \cdot 100\%,$$

kde U_{kN} je absolútna hodnota napätia nakrátko, U_N – menovité napätie tej strany transformátora, na ktorú sa vzťahuje U_{kN} . Z merania nakrátko je známe, že pri $U_{1k} = 46,8 \text{ V}$ tiekol prúd $I_{1k} = 25 \text{ A}$. Závislosť $I_k = f(U_k)$ je lineárna, teda pri $I_{1kN} = I_{1N} = 96,2 \text{ A}$ bude

$$U_{1kN} = \frac{I_{1N}}{I_{1k}} U_{1k} = \frac{96,2 \text{ A}}{25 \text{ A}} 46,8 \text{ V} = 180 \text{ V},$$

takže percentuálne napätie nakrátko bude

$$u_k = \frac{U_{1kN}}{U_{1N}} 100\% = \frac{180 \text{ V}}{3000 \text{ V}} 100\% = 6\%.$$

Ustálený skratový prúd primárnej strany bude

$$I_{1kt} = \frac{I_{1t}}{u_k} 100 = \frac{96,2 \text{ A}}{6} 100 = 1600 \text{ A}.$$

Veľkosť nárazového skratového prúdu budeme uvažovať ako dvojnásobok ustáleného skratového prúdu

$$I_{1k \text{ nár}} = 2 \cdot I_{1kt} = 2 \cdot 1600 \text{ A} = 3200 \text{ A}.$$

Ustálený skratový prúd skratovanej sekundárnej strany môžeme určiť priamo pomocou prevodu

$$p = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{3000 \text{ V}}{400 \text{ V}} = 7,5,$$

$$I_{2kt \text{ nár}} = p \cdot I_{1kt} = 7,5 \cdot 1600 \text{ A} = 12\,000 \text{ A}.$$

Nárazový skratový prúd sekundárnej strany

$$I_{2k \text{ nár}} = 2 \cdot I_{2kt} = 2 \cdot 12\,000 \text{ A} = 24\,000 \text{ A}.$$

Z výsledkov vidíme, že skratové prúdy nárazové aj ustálené tohto transformátora pri menovitých napätiach sú veľmi veľké, teda skratovať trojfázový transformátor pri menovitých napätiach je veľmi nebezpečné. Preto je potrebné istiť poistkami, alebo ističmi.

Príklad 12.2.12. Vypočítajte účinnosť trojfázového transformátora s údajmi $S_N = 500 \text{ kVA}$, $\Delta P_{Fe} = 2700 \text{ W}$, $\Delta P_j = 10\,800 \text{ W}$, a to pre menovité zaťaženie a účinník $\cos \varphi = 0,8$ a $0,6$.

Riešenie: Percentuálne straty naprázdno

$$z_0 = \frac{\Delta P_{Fe}}{S_n} \cdot 100 \% = \frac{2\,700 \text{ W}}{500\,000} \cdot 100 \% = 0,54 \%$$

Percentuálne straty nakrátko

$$z_k = \frac{\Delta P_j}{S_n} \cdot 100 \% = \frac{10\,800 \text{ W}}{500\,000 \text{ VA}} \cdot 100 \% = 2,16 \%$$

Zaťažovateľ pre menovité zaťaženie je $\nu = 1$. Vypočítané a zadané hodnoty dosadíme do vzťahu (12.23) pre účinnosť transformátora

a) pre $\cos \varphi = 0,8$ dostaneme

$$\eta = 100 - \frac{1}{0,8} \left(\frac{0,54}{1} + 2,16 \cdot 1 \right) = 96,63 \%$$

b) pre $\cos \varphi = 0,6$ dostaneme $\eta = 95,5 \%$.

Z toho vyplýva poznatok, že pri zhoršení účinníka záťaže zhoršuje sa aj účinnosť samotného transformátora.

12.3 ÚLOHY NA SAMOSTATNÉ RIEŠENIE

Úloha 12.3.1. Jednofázový ideálny transformátor s menovitým výkonom $S_N = 5000 \text{ VA}$, primárnym napätím $U_{1N} = 1\,000 \text{ V}$, sekundárnym napätím $U_{2N} = 230 \text{ V}$, a frekvenciou $f = 50 \text{ Hz}$ má na primárnej strane $N_1 = 700$ závitov a prierez jadra $S = 46 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Vypočítajte prevod transformátora p , počet závitov N_2 v sekundárnej cievke, magnetickú indukciu B_m v jadre a veľkosť prúdov I_{1n} a I_{2n} na primárnej a sekundárnej strane.
($p = 4,35$; $N_2 = 161$; $B_m = 6,44 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$; $I_{1N} = 5 \text{ A}$; $I_{2N} = 21,74 \text{ A}$)

Úloha 12.3.2. Primárne vinutie jednofázového transformátora má $N_1 = 880$ závitov, sekundárne $N_2 = 1\,200$. Aké veľké napätie U_2 sa indukuje v sekundárnom vinutí, ak je

primárne vinutie pripojené na napätie $U_1 = 230 \text{ V}$ a frekvenciu $f = 50 \text{ Hz}$. Aký veľký je magnetický tok Φ_m a prierez jadra S pri magnetickej indukčii $B_m = 1,1 \text{ T}$.

$$(\Phi_m = 1,177 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}; S = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2)$$

Úloha 12.3.3. Jednofázový transformátor s menovitým výkonom $S_{2N} = 400 \text{ VA}$, je pripojený na menovité napätie $U_{1N} = 230 \text{ V}$. Prevod transformátora $p = 9,2$ počet závitov primárnej cievky $N_1 = 500$, prierez jadra $S = 20 \text{ cm}^2$. Pri účinnosti transformátora $\eta = 91 \%$ určte napätie na sekundárnej strane U_{2N} a prúdy I_{1N} a I_{2N} .

$$(U_{2N} = 25 \text{ V}; I_{1N} = 1,91 \text{ A}, I_{2N} = 16 \text{ A})$$

Úloha 12.3.4. Dva jednofázové transformátory majú štítkové údaje: menovité napätia $U_{1N} = 220 \text{ V}$, $U_{2N} = 12 \text{ V}$ a menovitý výkon $S_N = 1,1 \text{ kVA}$. Rozdiel je len v percentuálnom napätí nakrátko – prvý má $u_k = 3 \%$ a druhý $u_k = 5 \%$. Oba transformátory boli pri menovitej prevádzke omylom na sekundárnej strane skratované. Vypočítajte:

- Aké ustálené skratové prúdy budú tiecť na primárnej I_{k1} a sekundárnej strane I_{k2} prvého transformátora?
- Aké veľké napätie môžeme v stave nakrátko na ich primár pripojiť, aby to transformátory tepelne vydržali?
- Pri ktorej hodnote percentuálneho napätia nakrátko u_k sú pomery pri skratovaní priaznivejšie?

$$(I_{k1} = 166 \text{ A}; I_{k2} = 3\,040 \text{ A}; U_{k1(1)} = 6,6 \text{ V}; U_{k1(2)} = 11 \text{ V}; \text{priaznivejšie pomery sú pri } u_k = 5 \%)$$

Úloha 12.3.5. Vypočítajte impedanciu nakrátko jednofázového transformátora a zložky impedancie nakrátko, keď poznáme výsledky merania nakrátko transformátora: $U_k = 60 \text{ V}$, $I_k = 100 \text{ A}$, $P_k = 1,2 \text{ kW}$.

$$(z_k = 0,6 \Omega; \cos \varphi_k = 0,2; R_k = 0,12 \Omega; X_k = 0,588 \Omega)$$

Úloha 12.3.6. Vypočítajte parametre a nakreslite náhradnú schému jednofázového transformátora so štítkovými údajmi: $S = 10 \text{ kVA}$, $p = 400/200 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Z merania transformátora naprázdno poznáme: $U_1 = 400 \text{ V}$, $I_{10} = 1 \text{ A}$, $P_{10} = 100 \text{ W}$. Z merania nakrátko $U_{1k} = 32 \text{ V}$, $I_{1k} = 25 \text{ A}$, $P_{1k} = 400 \text{ W}$.

$$(X_h = 387,3 \Omega; R_z = 1500 \Omega; R_1 = R'_2 = 0,32 \Omega; X_{r1} = X'_{r2} = 0,55 \Omega)$$

Úloha 12.3.7. Vypočítajte účinnosť a menovité prúdy transformátora, ktorý má údaje: $S = 20 \text{ kVA}$, $p = 3300/240 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, ak z merania transformátora naprázdno poznáme: $P_{10} = 110 \text{ W}$ a z merania nakrátko: $P_{1k} = 280 \text{ W}$.
($\eta = 98,1 \%$; $I_{1N} = 6,06 \text{ A}$; $I_{2N} = 83,33 \text{ A}$)

Úloha 12.3.8. Trojfázový transformátor Yy0 má štítkové hodnoty 630 kVA , $3000 / 525 \text{ V}$. Vypočítajte prúdy tečúce oboma vinutiami a menovitú impedanciu Z_{1N} .
($I_{1N} = 121,2 \text{ A}$; $I_{2N} = 692,8 \text{ A}$; $Z_{1N} = 14,3 \Omega$)

Úloha 12.3.9. Trojfázový transformátor Yy0, 315 kVA , $15 \text{ kV}/400\text{V}$ mal pri meraní nakrátko na strane vyššieho napätia tieto hodnoty: $U_k = 412 \text{ V}$; $I_k = 8,33 \text{ A}$ a $\Delta P_k = 2060 \text{ W}$. Za predpokladu, že závislosť $I_k = f(U_k)$ je lineárna, určte percentuálne napätie nakrátko a straty nakrátko pri menovitom prúde.
($u_k = 4 \%$; $\Delta P_k = 4361 \text{ W}$)

Úloha 12.3.10. Na trojfázovom transformátore Yy0, 75 kVA , $6000/525 \text{ V}$ boli pri meraní nakrátko namerané hodnoty $U_k = 160 \text{ V}$ a $I_k = 4,8 \text{ A}$. Určte percentuálne napätie nakrátko a ustálený skratový prúd.
($u_k = 4,01 \%$; $I_{1k} = 180 \text{ A}$)

Úloha 12.3.11. Na trojfázovom transformátore s výkonom $S_N = 250 \text{ kVA}$ a primárnym napätím $U_{1N} = 10\,000 \text{ V}$ bolo pri chode nakrátko namerané napätie nakrátko $U_k = 530 \text{ V}$ a straty nakrátko $\Delta P_k = 3\,500 \text{ W}$. Určte percentuálne napätie nakrátko u_k , účinník nakrátko $\cos \varphi_k$, menovitú impedanciu Z_N a impedanciu nakrátko Z_k pre jednu fázu.
($u_k = 5,3 \%$; $\cos \varphi_k = 0,26$; $Z_N = 400 \Omega$; $Z_k = 21,2 \Omega$)

Úloha 12.3.12. Na trojfázovom transformátore s výkonom $S_N = 450 \text{ kVA}$ boli pri chode naprázdno a nakrátko namerané straty $\Delta P_0 = 7\,800 \text{ W}$ a $\Delta P_k = 5\,000 \text{ W}$. Účinnosť transformátora je 90% a zaťažovateľ $0,8$. Vypočítajte, s akým účinníkom pôsobí transformátor v rozvodni závodu.
($\cos \varphi = 0,306$)