

## 1. Transformátory

Transformátor má dvě nebo více vinutí na společném magnetickém obvodu. Přivedeme-li napětí na primární cívku trafo, protékající proud vybudí magnetický tok a ten indukuje do sekundárního vinutí napětí.

### 1.1. Indukované napětí

Pro určení velikosti efektivní hodnoty indukovaného napětí použijeme vztah indukčního zákona  $u_i = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  a v tomto vztahu budeme předpokládat, že  $\Phi = \Phi_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$ . Po dosazení

$$u_i = N \cdot \frac{\Delta(\Phi_{\max} \cdot \sin \omega t)}{\Delta t} = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \frac{\Delta(\sin \omega t)}{\Delta t}.$$

Poslední zlomek se upraví pomocí vyšší matematiky (derivace)  $\frac{\Delta(\sin \omega t)}{\Delta t} = \omega \cdot \cos \omega t$ . Po dosazení dostáváme

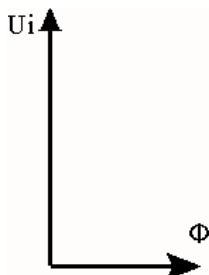
$$u_i = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos \omega t,$$

což je (ko)sinusová funkce s amplitudou  $U_{i\max} = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega$ . Nás zajímá efektivní hodnota napětí, tedy

$$U_i = \frac{N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega}{\sqrt{2}} = \frac{N \cdot \Phi_{\max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot \pi}{2} \cdot N \cdot \Phi_{\max} \cdot f$$

$$\boxed{U_i = 4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N}$$

Fázorový diagram :



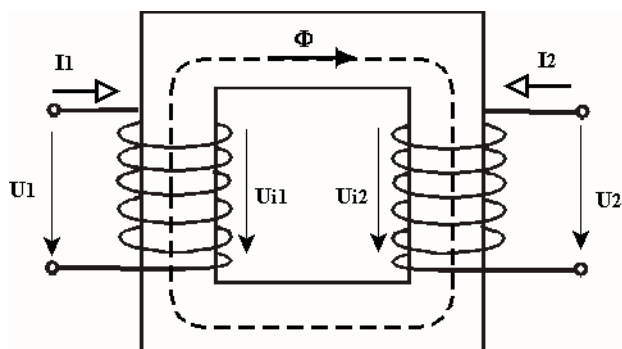
### 1.2. Převod

Převod trafo je definován jako *poměr indukovaných napětí na primáru a na sekundáru*, tedy  $p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}}$ . Dosadíme-li do tohoto

vztahu z transformátorové rovnice, dostáváme  $p = \frac{4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_1}{4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_2} = \frac{N_1}{N_2}$ ; převod je též dán poměrem závitů vinutí.

### 1.3. Poměry na ideálním transformátoru

Ideální trafo má magnetický obvod s nekonečně velkou permeabilitou a nulovým odporem vinutí. Na vybudění magnetického toku pak není třeba žádný magnetizační proud, rozptylový tok je nulový (veškerý tok se uzavře magnetickým obvodem) a úbytky napětí ve vinutích jsou nulové.



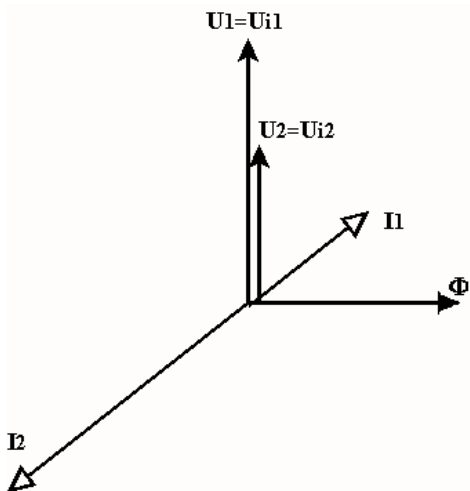
Platí, že  $U_1 = U_{11}$  a  $U_2 = U_{12}$  (úbytky jsou nulové).

Magnetomotorické napětí v ideálním mag.obvodu je nulové, tedy

$$F_m = N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_1 = -\frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{I_2}{p}$$

Proud primáru je **p** krát menší a je se sekundárním proudem v *protifázi* (znaménko mínus v konečném vztahu).

Fázorový diagram:

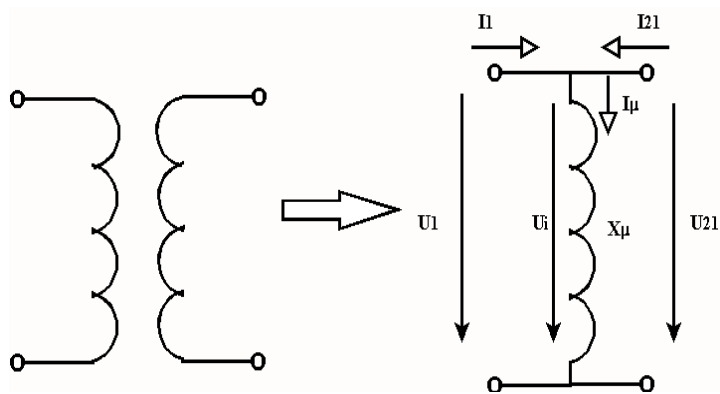


Při kreslení vycházíme ze znalosti  $U_2 = aI_2$ . Zde byl volen proud odpovídající zátěži induktivního charakteru. Mag.tok  $\Phi$  je zpožděn za napětím o  $90^\circ$ . S napětím  $U_2$  je ve fázi  $U_{i2}$  a vzhledem k nulovým úbytkům napětí i  $U_{i1}$  a  $U_{i1}$ . Proud  $I_1$  je v protifázi s proudem  $I_2$ .

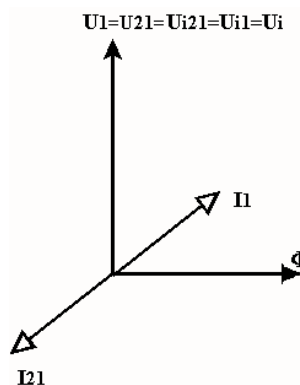
Pokud bychom kreslili f.d. v měřítku, byl by za tohoto stavu značně nepřehledný. Z tohoto důvodu a několika dalších provedeme na trafu tyto myšlené úpravy :

- zvětšíme sekundární napětí  $p$  krát na hodnotu  $U_{21} = p \cdot U_2$  (čti dva-jedna)
  - sekundární proud zmenšíme ve stejném poměru na hodnotu  $I_{21} = \frac{I_2}{p}$ , aby byly zachovány výkonové poměry v sekundáru
- $$U_2 \cdot I_2 = U_{21} \cdot I_{21}$$

Po této úpravě nastane rovnost indukovaných napětí  $U_{i1} = U_{i2} = U_i$  a lze galvanicky spojit primár a sekundár v náhradním schématu :



Magnetizační proud  $I_\mu$  je nulový, magnetizační reaktance  $X_\mu$  je nekonečně velká. Proudů  $I_1$  a  $I_{21}$  budou stejné, fáz.diagram bude přehlednější :



### 1.4. Úplné náhradní schéma

Náhradní schéma je obvod z ideálních pasivních prvků ( $R, L, C$ ), který se na vstupních svorkách chová z hlediska průběhů vstupního proudu a napětí shodně jako zařízení, které má simulovat.

V případě trojfázového stroje předpokládáme symetrii ve všech fázích a náhradní schéma se vytváří pro 1 fázi stroje.

Náhradní schéma se vytváří pro 1 fázi stroje

V úplném náhradním schématu skutečného transformátoru musíme oproti ideálnímu transformátoru respektovat několik aspektů.

- Magnetický obvod má konečnou permeabilitu, na vybuzení toku je potřeba nenulový magnetizační proud  $I_\mu$ . Magnetizační reaktance  $X_\mu$  má konečnou hodnotu.
- V magnetickém obvodu vznikají ztráty, které nezávisí na zatížení. Ekvivalentem v náhradní schématu jsou ztráty na vhodně zvoleném odporu  $R_{Fe}$ , který zapojíme do příčné větve paralelně k mag.reaktanci. Přes tento odpor poteče proud  $I_{Fe}$ , který kryje ztráty v železe
- Tok se již neuzavírá zcela magnetickým obvodem, část se uzavírá tak, že nezasahuje do druhého vinutí. Tento rozptylový tok  $\Phi_\sigma$  snižuje hlavní tok a tím snižuje indukované napětí. Rozptylové toky primáru i sekundáru jsou vyvolány protékajícími proudy těchto vinutí, závisí na jejich velikosti. Vliv rozptylu se simuluje v n.s. zařazením rozptylových reaktancí  $X_{1\sigma}$  a  $X_{2\sigma}$  do podélné větve na straně primáru i sekundáru.
- Při zatížení vzniká na odporech vinutí úbytek napětí. V náhradním schématu jsou zařazeny odpory  $R_1$  a  $R_{21}$  v podélné větvi.

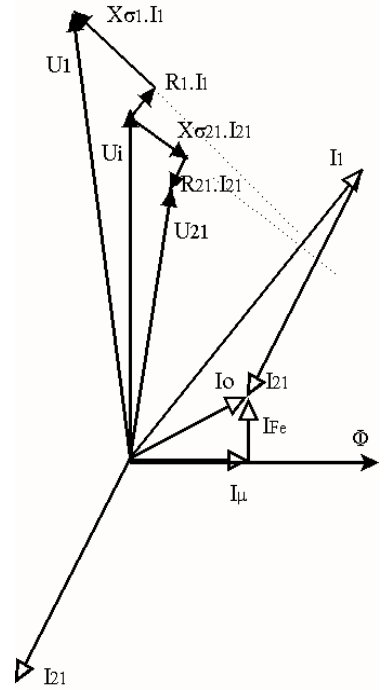
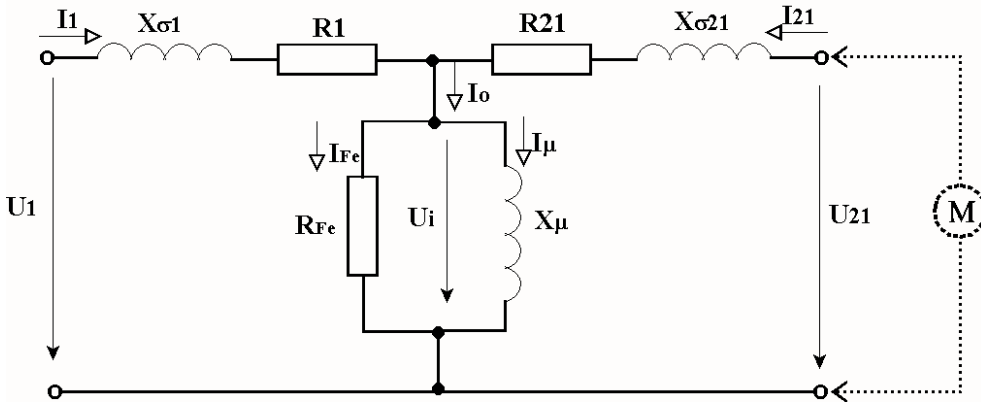
Pro určení  $R_{21}$  ze skutečné hodnoty  $R_2$  platí zásada, že jsou Jouleovy ztráty ve skutečném sekundáru a v náhradním schématu stejné :

$$R_1 \cdot I_1^2 = R_{21} \cdot I_{21}^2 \Rightarrow R_{21} = R_1 \cdot \left( \frac{I_1}{I_{21}} \right)^2 = R_1 \cdot p^2, \text{ protože platí } I_{21} = \frac{I_2}{p}.$$

Pro rozpt.reaktance pak platí stejný vztah.

Orientační poměry velikostí jednotlivých prvků :  $R_1 : R_{21} : X_{\sigma 1} : X_{\sigma 21} : X_\mu : R_{Fe} = 1 : 1 : 2 : 2 : 10^3 : 10^4$ .

Úplné náhradní schema transformátoru a fázorový diagram pro zatížení indukčního charakteru :

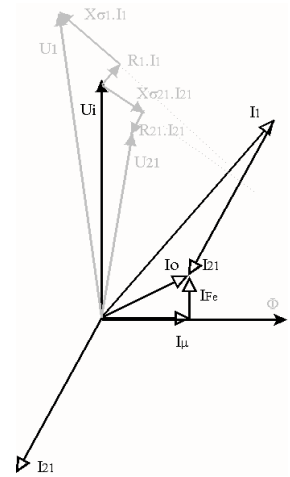
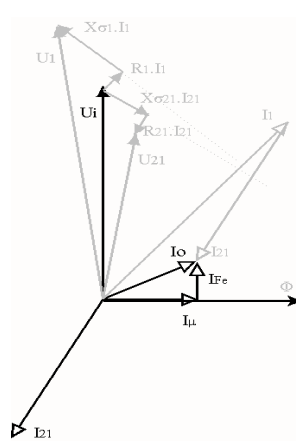
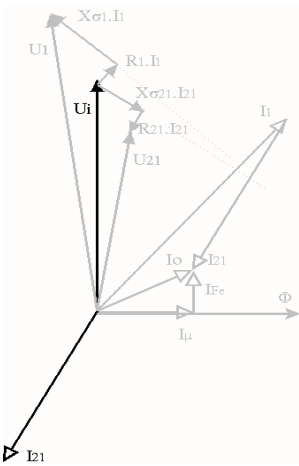


Postup při kreslení diagramu :

a) Vyjdeme ze znalosti  $U_i$  a  $I_{21}$

b) Vyřešíme proudy v příčné větvi  
 - tok je zpožděn za  $U_i$  o  $90^\circ$   
 -  $I_\mu$  je ve fázi s tokem (a o  $90^\circ$  za  $U_i$ )  
 -  $I_{Fe}$  je ve fázi s  $U_i$   
 - platí  $I_o = I_\mu + I_{Fe}$

c) Zjistíme proud  $I_1$  pomocí  $I_o$  a  $I_{21}$  :  $I_o = I_1 + I_{21}$

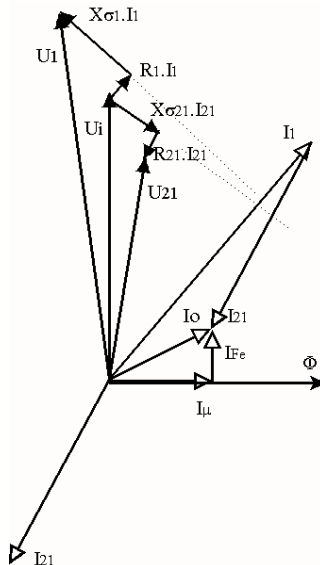
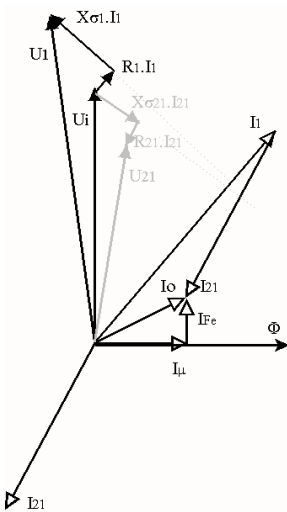


d) Vyřešíme napěťové poměry v primární podélné větvi :

$$U_1 = U_i + R_1 \cdot I_1 + j \cdot X_{\sigma 1} \cdot I_1$$

e) doplníme fázory napětí v sek.větvi :

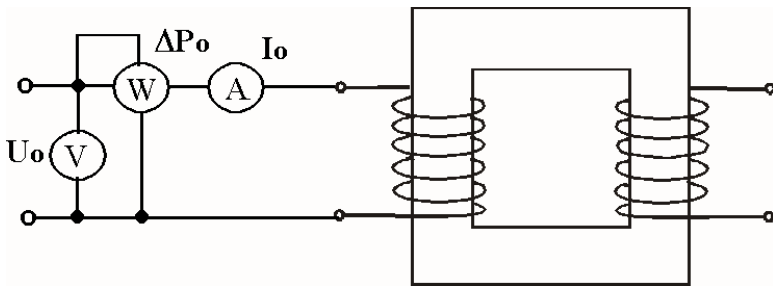
$$U_{21} = U_i + R_{21} \cdot I_{21} + j \cdot X_{\sigma 21} \cdot I_{21}$$



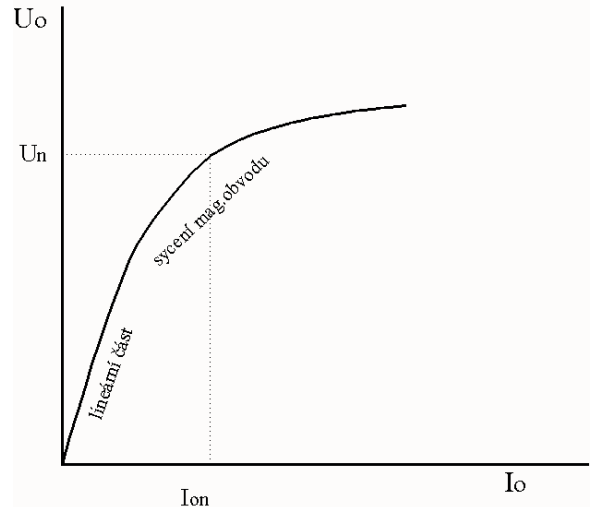
## 1.5. Transformátor naprázdno

Stav naprázdno (obecně) znamená nezatížený stroj. Transformátor nemá na sekundáru připojenou žádnou zátěž.

Budeme-li v tomto stavu měnit napětí na svorkách primáru a zjišťovat změny primárního proudu, získáme *charakteristiku naprázdno*.



Zvyšujeme-li napětí od nuly, proud zpočátku lineárně stoupá. Při dostatečně velkém napětí a tedy i toku i indukci se začne sytit magnetický obvod a proud začne stoupat rychleji (proud je úměrný intenzitě pole v mag.obvodu). Charakteristika se zakřivuje. Jmenovitý bod se volí v zakřivené části charakteristiky. Při nižším napětí vychází příliš velký magnetický obvod, při vyšším napětí značně rostou ztráty v mag.obvodu.



Proud  $I_{on}$  – jmenovitý proud naprázdno – bývá velmi malý, řádově jednotky jmenovitého proudu transformátoru.

$$i_o = \frac{I_{on}}{I_n} \cdot 100 \approx 5\%$$

Čím větší transformátor, tím je menší procentní proud naprázdno.

Z měření naprázdno podle uvedeného schématu lze zjistit ztráty naprázdno  $\Delta P_o$  a následně vypočítat účinník naprázdno  $\cos \varphi_o$ .

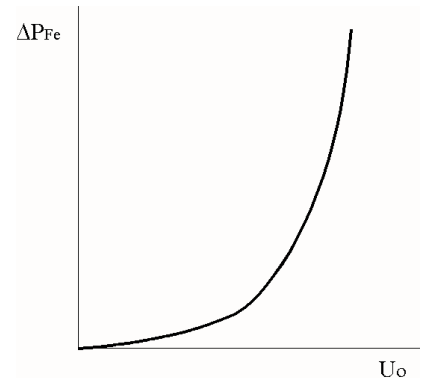
$$\cos \varphi_o = \frac{\Delta P_o}{U_o \cdot I_o}$$

Proud naprázdno je určen především magnetizačním proudem ( $I_{Fe}$  je několikrát menší), proto je účinník velmi nízký, cca 0,1.

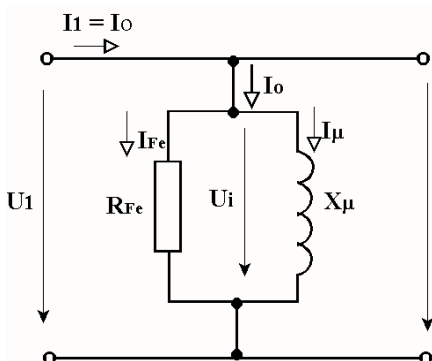
Ztráty naprázdno  $\Delta P_o$  jsou výhradně ztráty v magnetickém obvodu – ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$ . Tyto ztráty lze dále rozdělit na ztráty hysterzní  $\Delta P_h$  a ztráty vířivými proudy  $\Delta P_v$ .

$$\Delta P_o = \Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v$$

Lze dokázat, že ztráty naprázdno závisí na kvadrátu napětí. Charakteristika ztrát naprázdno je *parabolická*. Ztráty při jmenovitém napětí nazýváme *jmenovité ztráty naprázdno*  $\Delta P_{on}$ .



Náhradní schéma pro stav naprázdno se značně zjednoduší, jestliže uvážíme, že malý proud naprázdno vyvolá nepatrné úbytky napětí na odporu primárního vinutí a jeho rozptylové reaktanci, takže lze tyto prvky vynechat. Fázorový diagram pak odpovídá diagramu pro příčnou větev.



V dokumentaci transformátoru, popř. na štítku se uvádí jmenovité hodnoty napětí  $U_n$ , zdánlivého výkonu  $S_n$ , jmenovitých ztrát naprázdno  $\Delta P_{on}$  a poměrného (procentního) proudu naprázdno  $i_o$ . Z těchto údajů lze zjistit parametry příčné větve náhradního schématu. Platí (1fázový stroj) :

$$U_{21} \quad \text{Jmenovitý proud je dán } I_n = \frac{S_n}{U_n}. \text{ Proud naprázdno } i_o = \frac{I_{on}}{I_n} \cdot 100 \Rightarrow I_{on} = \frac{i_o}{100} \cdot I_n.$$

$$\text{Pro ztráty platí } \Delta P_{on} = \frac{U_n^2}{R_{Fe}} \Rightarrow R_{Fe} = \frac{U_n^2}{\Delta P_{on}}. \text{ Ze znalosti } R_{Fe} \text{ lze zjistit}$$

$$I_{Fe} = \frac{U_n}{R_{Fe}} \text{ a dále magnetizační proud z Pythagorovy věty } I_\mu = \sqrt{I_o^2 - I_{Fe}^2}.$$

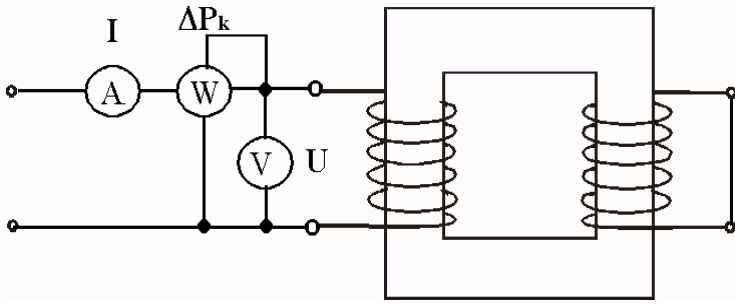
$$\text{Známe-li } I_\mu, \text{ pak lze zjistit } X_\mu = \frac{U_n}{I_\mu}.$$

Příklad : Trafo 1kVA, 500/230V,  $i_o=5\%$ ,  $\Delta P_{on}=20\text{W}$ . Určete parametry příčné větve.

$$I_n=2\text{ A}, I_{on}=0.1\text{ A}, R_{Fe}=12500\ \Omega, I_{Fe}=0,04\text{ A}, I_\mu=0,0917\text{ A}, X_\mu=5455\ \Omega$$

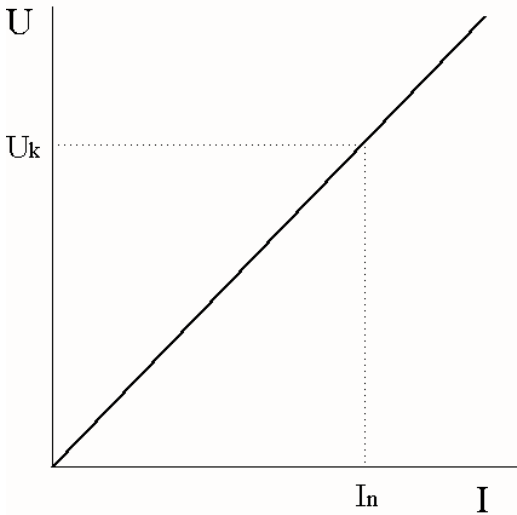
## 1.6. Transformátor nakrátko

Stav nakrátko znamená (obecně) zkratovaný výstup. U motorů se realizuje zabrzděným rotorem.



Budeme-li opět na svorkách primáru opatrně zvyšovat napětí a sledovat změny proudu, získáme *charakteristiku nakrátko*. Charakteristiku lze měřit pouze do proudu jen mírně převyšujícího proud jmenovitý, aby nedošlo k poškození stroje. Napětí potřebné k protlačení takového proudu bude velmi malé a velmi malé tedy bude i indukované napětí stroje a magnetický tok v jádře. Magnetický obvod se nedostane do oblasti sycení. Charakteristika je proto *lineární*.

*Proudy v primáru i v sekundáru jsou sice poměrně velké a vytvářejí velké toky. Tyto toky však působí proti sobě, neboť proudy primáru a sekundáru jsou v protifázi. Výsledný tok je proto velmi malý.*



Jestliže dosáhne proud jmenovité hodnoty, na vstupních svorkách naměříme tzv. *napětí nakrátko*  $U_k$ . Toto napětí je důležitým údajem trafo a uvádí se v procentní hodnotě na štítku stroje nebo v jeho dokumentaci.

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100$$

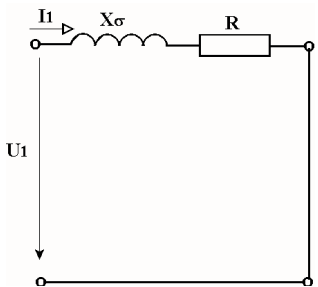
Hodnota napětí nakrátko bývá v rozmezí 5 – 15 % jmenovitého napětí.

Náhradní schéma se opět velmi zjednoduší. Jestliže je napětí na příčné větvi cca 10%  $U_n$ , bude i proud  $I_0$  tekoucí přes tuto větev 10x menší než ve stavu naprázdno při jmenovitém napětí. Jestliže tedy podélnou větví teče jmenovitý proud  $I_n$ , příčnou větví teče  $I_{0n}/10$ , tedy cca 0,5%  $I_n$ . Tento proud poměry na trafu neovlivní. Příčnou větev lze tedy vynechat a následně lze sečíst odpory vinutí a rozptylové reaktance

$$R = R_1 + R_{21}$$

$$X_\sigma = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 21}$$

Fázorový diagram nakreslíme z výchozích hodnot  $U_1$  a  $I_1$ . Odhadneme fázové zpoždění proudu  $\varphi_k$  a následně zakreslíme úbytky  $U_R = R \cdot I_1$  a  $U_X = X_\sigma \cdot I_1$ , které dávají v součtu  $U_1$ .



Z fázorového diagramu lze odvodit, že  $U_1 = \overline{ac} + \overline{bc} = R \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_k + X_\sigma \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_k$ . Pokud poteče obvodem  $I_n$ , bude na svorkách  $U_k$ . Je zvykem vyjadřovat  $U_k$  v procentech  $U_n$ .

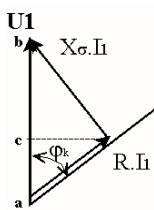
$$u_k = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100 = \frac{R \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_k + X_\sigma \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_k}{U_n} \cdot 100 = \frac{R \cdot I_1}{U_n} \cdot 100 \cdot \cos \varphi_k + \frac{X_\sigma \cdot I_1}{U_n} \cdot 100 \cdot \sin \varphi_k$$

Výraz  $u_R = \frac{R \cdot I_1}{U_n} \cdot 100$  nazýváme činnou složkou napětí nakrátko,

výraz  $u_X = \frac{X_\sigma \cdot I_1}{U_n} \cdot 100$  reaktanční (jalovou) složkou.

Pak lze psát

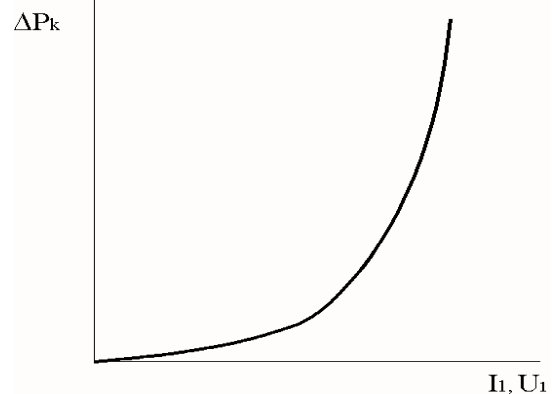
$$u_k = u_R \cdot \cos \varphi_k + u_X \cdot \sin \varphi_k$$



Ztráty ve stavu nakrátko jsou téměř výhradně *Jouleovy ztráty v odporech vinutí*  $\Delta P_j$ . Velmi malou část přičítáme *ztrátám přidavným*  $\Delta P_d$ , což jsou ztráty vířivými proudy od rozptylových toků v kovových částech konstrukce a ztráty způsobené mírným navýšením odporu vinutí při průchodu střídavého proudu vlivem tzv. *skin efektu*. Ztráty nakrátko tedy závisí na *kvadrátu proudu*, a vzhledem k linearitě charakteristiky nakrátko i na *kvadrátu napětí*.

$$\Delta P_k = \Delta P_j + \Delta P_d$$

Ztráty při jmenovitém proudu nazýváme *jmenovitými ztrátami nakrátko*  $\Delta P_{kn}$  a bývají uvedeny na štítku nebo v technické dokumentaci trafo.



Jestliže tedy budeme předpokládat, že  $\Delta P_k = \Delta P_j$  (zanedbáme ztráty přídatné) a pokusíme se vyjádřit jmenovité ztráty nakrátko v procentech jmenovitého výkonu, dostaneme

$$\Delta p_k = \frac{\Delta P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{R \cdot I_n^2}{U_n \cdot I_n} \cdot 100 = \frac{R \cdot I_n}{U_n} \cdot 100 = u_R$$

V procentním vyjádření platí rovnost činné složky napětí nakrátko a ztrát nakrátko. Úbytky  $U_R$  a  $U_X$  tvoří spolu s napětím nakrátko  $U_k$  pravouhlý trojúhelník, platí pro ně Pythagorova věta. Stejně vztahy pak platí i pro procentní hodnoty:  $u_k^2 = u_R^2 + u_X^2$ .

Předchozích 2 vztahů lze využít při stanovení složek napětí nakrátko ze štítkových hodnot nebo pro určení parametrů podélné větve náhradního schématu.

Příklad: Trafo 1kVA, 500/230V,  $i_0=5\%$ ,  $\Delta P_{on}=20W$ ,  $\Delta P_{kn}=40W$ ,  $u_k = 10\%$  (pokračování z min.příkladu). Určete parametry podélné větve.

$$u_R = p_k = \frac{\Delta P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{40}{1000} \cdot 100 = 4\% \quad u_R = \frac{R \cdot I_n}{U_n} \cdot 100 \Rightarrow R = \frac{u_R \cdot U_n}{100 \cdot I_n} = \frac{4 \cdot 500}{100 \cdot 2} = 10 \Omega$$

$$\text{buďto a) } u_k = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100 \Rightarrow U_k = \frac{u_k \cdot U_n}{100} = \frac{10 \cdot 500}{100} = 50V \quad \text{Impedance nakrátko } Z_k = \frac{U_k}{I_n} = \frac{50}{2} = 25 \Omega$$

$$\text{Platí } Z_k = \sqrt{R^2 + X_\sigma^2} \Rightarrow X_\sigma = \sqrt{Z_k^2 - R^2} = \sqrt{25^2 - 10^2} = 22,9 \Omega$$

$$\text{nebo b) } u_X = \sqrt{u_k^2 - u_R^2} = \sqrt{10^2 - 4^2} = 9,16\% \quad U_X = \frac{u_X \cdot U_n}{100} = \frac{9,16 \cdot 500}{100} = 45,8V \quad X_\sigma = \frac{U_X}{I_n} = \frac{45,8}{2} = 22,9 \Omega$$

Při chodu nakrátko představuje transformátor na vstupních svorkách impedanci  $Z_k = \frac{U_k}{I_n}$ . Bývá zvykem vyjadřovat hodnoty

impedancí stroje (nejenom transformátorů) v procentech jmenovité impedance  $Z_n = \frac{U_n}{I_n}$ , tedy  $z_k = \frac{Z_k}{Z_n} \cdot 100$ . Po dosazení

$$z_k = \frac{\frac{U_k}{I_n}}{\frac{U_n}{I_n}} \cdot 100 = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100 = u_k. \quad \text{V procentním vyjádření je tedy impedance nakrátko rovna napětí nakrátko. Napětí nakrátko je}$$

někdy proto uváděno jako impedance nakrátko.

Pomocí napětí – impedance nakrátko lze jednoduše odhadnout velikost proudu nakrátko:

$$I_k = \frac{U_n}{Z_k} = \frac{U_n}{\frac{U_k}{I_n}} = \frac{U_n}{U_k} \cdot I_n = \frac{I_n}{u_k} \cdot 100, \quad \text{protože } \frac{U_n}{U_k} = \frac{100}{u_k}.$$

Příklad: Trafo 1kVA, 500/230V,  $u_k = 10\%$  (pokračování z min.příkladu). Určete  $I_k$ .  
 $I_n=2 A$ ,  $I_k = 20 A$

## 1.7. Transformátor při zatížení

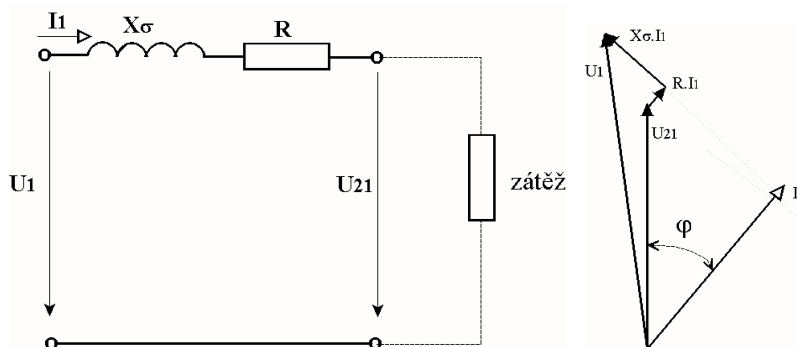
Vyslovíme stejnou úvahu jako v předchozím odstavci: Pro řešení napěťových poměrů je proud naprázdno natolik malý, že neovlivní celkové poměry. Lze ho tedy opět zanedbat a z náhradního schématu vypustit příčnou větev. Dostaneme stejné schéma, jako platilo pro chod nakrátko.

Fázorový diagram:

Vycházíme ze znalosti zátěže, tedy proudu  $I_1$ , napětí na zátěži  $U_{21}$  a jejich fázového posunu  $\varphi$ .

Přičteme-li k  $U_{21}$  úbytky na odpor vinutí a rozptylové reaktanci, dostaneme primární napětí  $U_1$ .

Úbytek napětí budeme definovat jako rozdíl sekundárních napětí naprázdno a napětí při zatížení  $\Delta U = U_{20} - U_{21}$  vyjádřený v procentech napětí naprázdno.



Procentní hodnota je pak dána vztahem  $\Delta u = \frac{\Delta U}{U_{20}} \cdot 100$ . Po dosazení a úpravě platí

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100. \text{ Po rozšíření zlomku převodem } p \text{ dostáváme}$$

$$\Delta u = \frac{p \cdot U_{20} - p \cdot U_2}{p \cdot U_{20}} \cdot 100 = \frac{U_1 - U_{21}}{U_1} \cdot 100.$$

Přesný rozdíl napětí  $U_1 - U_{21}$  lze graficky zjistit z fázorového diagramu tak, že pootočíme napětí  $U_1$  do směru  $U_{21}$  (úsečka **ad**). Protože jsou však úbytky relativně malé (řadově jednotky procent), lze graficky zjistit tento rozdíl *průmětem* napětí  $U_1$  do směru  $U_{21}$  (úsečka **ac**).

Platí, že **ac** = **ab** + **bc**, tedy **ab** =  $R \cdot I_1 \cdot \cos \varphi + X_s \cdot I_1 \cdot \sin \varphi$ . Definujme poměrné zatížení

vztahem  $z = \frac{I_1}{I_{1n}}$ , tedy  $I_1 = z \cdot I_{1n}$ . Potom **ac** =  $z \cdot (R \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi + X_s \cdot I_{1n} \cdot \sin \varphi)$ .

Po dosazení do vztahu pro úbytek napětí pak dostáváme (předp.  $U_1 = U_{1n}$ )

$$\Delta u = \frac{z \cdot (R \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi + X_s \cdot I_{1n} \cdot \sin \varphi)}{U_{1n}} \cdot 100 = z \cdot (u_R \cdot \cos \varphi + u_X \cdot \sin \varphi)$$

$$\Delta u = z \cdot (u_R \cdot \cos \varphi \pm u_X \cdot \sin \varphi) \quad \text{znaménko mínus přísluší kapacitnímu charakteru zátěže}$$

Příklad: Trafo 1kVA, 500/230V,  $i_0=5\%$ ,  $\Delta P_{on}=20W$ ,  $\Delta P_{kn}=40W$ ,  $u_k = 10\%$  je zatíženo  $P = 600 W$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ . Určete napětí na sekundáru.

Z min.příkladu  $u_R = 4\%$ ,  $u_X = 9,16\%$ ,  $I_{1n} = 2 A$

$$I_1 = \frac{P}{U_{1n} \cdot \cos \varphi} = \frac{600}{500 \cdot 0,8} = 1,5 A \quad z = \frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{1,5}{2} = 0,75$$

$$\Delta u = z \cdot (u_R \cdot \cos \varphi + u_X \cdot \sin \varphi) = 0,75 \cdot (4 \cdot 0,8 + 9,16 \cdot 0,6) = 5,56 \%$$

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 \Rightarrow U_2 = U_{20} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = 230 \cdot \left(1 - \frac{5,56}{100}\right) = 217,2 V$$

Příklad: Předcházející trafo je zatíženo čistou kapacitou,  $I_1 = I_{1n} = 2 A$

$z = 1$ ,  $\cos \varphi = 0$ ,  $\sin \varphi = 1$

$$\Delta u = z \cdot (u_R \cdot \cos \varphi + u_X \cdot \sin \varphi) = 4 \cdot 0 - 9,16 \cdot 1 = -9,16\% \quad \text{záporný úbytek, tedy přírůstek napětí}$$

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 \Rightarrow U_2 = U_{20} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = 230 \cdot \left(1 + \frac{9,16}{100}\right) = 251 V \quad \text{napětí na sekundáru vzrostlo o 21 V}$$

## 1.8. Ztráty a účinnost transformátoru při obecném zatížení

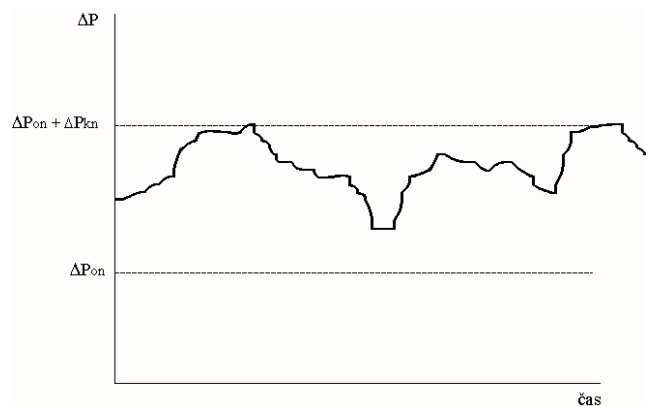
Ztráty při chodu transformátoru vznikají v magnetickém obvodu a ve vinutí.

Ztráty v magnetickém obvodu, tj.ztráty naprázdno, závisí na velikosti napětí. Předpokládáme-li, že se napětí na transformátoru při normálním provozu téměř nemění, pak jsou tyto ztráty konstantní pro jakékoliv zatížení a mají velikost  $\Delta P_o = \Delta P_{on}$ .

Ztráty ve vinutí jsou téměř výhradně ztrátami Jouleovými na odporech primáru a sekundáru, a závisí na kvadrátu proudu ( $R \cdot I^2$ ), tedy obecně na kvadrátu zatížení. Lze tedy psát  $\Delta P_k = \Delta P_{kn} \cdot z^2$ .

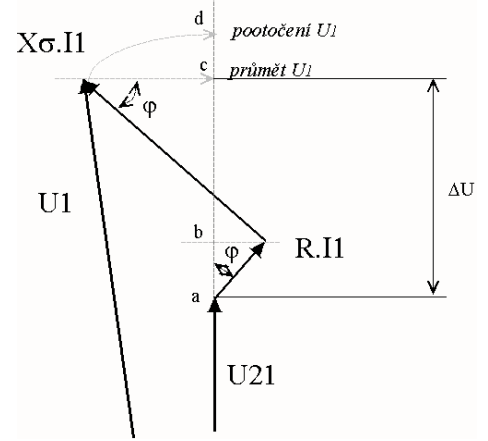
Pro celkové ztráty platí

$$\Delta P = \Delta P_{on} + \Delta P_{kn} \cdot z^2, \quad \text{kde } z = \frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{S_1}{S_{1n}}$$



Účinnost je obecně definována jako poměr výkonu  $P_2$  ku příkonu  $P_1$ , tedy  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ .

Rozdíl mezi příkonem a výkonem tvoří ztráty:  $\Delta P = P_1 - P_2 \Rightarrow P_2 = P_1 - \Delta P$ .



Po dosazení 
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}$$

Po další úpravě s využitím vztahu  $P_1 = S_n \cdot \cos \varphi = z \cdot S_n \cdot \cos \varphi$  dostáváme 
$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_{on} + \Delta P_{kn} \cdot z^2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_{on} + \Delta P_{kn} \cdot z^2}{z \cdot S_n \cdot \cos \varphi}$$

Definujme poměrné ztráty jako  $\Delta p_{on} = \frac{\Delta P_{on}}{S_n}$  a  $\Delta p_{kn} = \frac{\Delta P_{kn}}{S_n}$ . Potom vztah pro

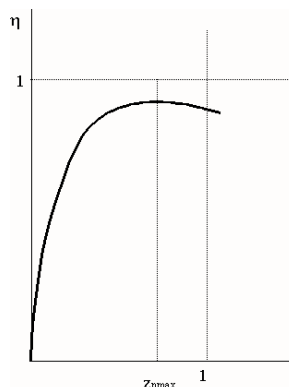
účinnost lze upravit

$$\eta = 1 - \frac{\Delta p_{on} + \Delta p_{kn} \cdot z^2}{z \cdot \cos \varphi}$$

Průběh účinnosti v závislosti na zatížení má typický průběh pro všechny stroje. Pro

transformátory lze dokázat, že stroj dosáhne max. účinnosti při zatěžovateli  $z_{\eta \max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{on}}{\Delta P_{kn}}}$ .

Na základě tohoto zjištění se konstruují malé transformátory tak, aby platilo  $\Delta P_{on} = \Delta P_{kn}$  (max. účinnost při  $z=1$ , tedy jmenovité zátěži), velké transformátory pak s poměrem  $\Delta P_{on} : \Delta P_{kn} = 1 : (3 \div 4)$ , protože průměrné zatížení bývá menší než 100%.



**Příklad :** Trafo 1kVA, 500/230V,  $i_0=5\%$ ,  $\Delta P_{on}=20W$ ,  $\Delta P_{kn}=40W$ ,  $u_k = 10\%$  je zatíženo  $P = 600 W$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ . Určete ztráty a účinnost při tomto zatížení.

Z předchozích příkladů  $z = 0,75$

$$\Delta P = \Delta P_{on} + \Delta P_{kn} \cdot z^2 = 20 + 40 \cdot 0,75^2 = 42,5 W$$

$$\Delta p_{on} = \frac{\Delta P_{on}}{S_n} = \frac{20}{1000} = 0,02 \quad \Delta p_{kn} = \frac{\Delta P_{kn}}{S_n} = \frac{40}{1000} = 0,04$$

$$\eta = 1 - \frac{\Delta p_{on} + \Delta p_{kn} \cdot z^2}{z \cdot \cos \varphi} = 1 - \frac{0,02 + 0,04 \cdot 0,75^2}{0,75 \cdot 0,8} = 1 - 0,0708 = 0,9292 \quad \eta = 92,9\%$$

Maximální účinnosti dosáhne transformátor při zatěžovateli  $z_{\eta \max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{on}}{\Delta P_{kn}}} = \sqrt{\frac{20}{40}} = 0,707$

Při účinnku 0,8 by účinnost dosáhla hodnoty  $\eta = 1 - \frac{\Delta p_{on} + \Delta p_{kn} \cdot z^2}{z \cdot \cos \varphi} = 1 - \frac{0,02 + 0,04 \cdot 0,707^2}{0,707 \cdot 0,8} = 1 - 0,0707 = 0,9293$

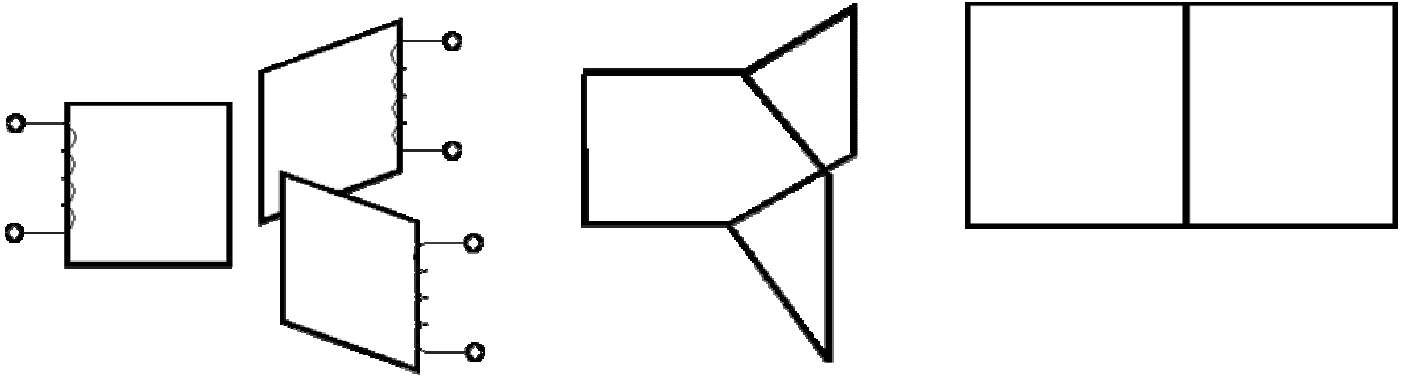
#### Kontrolní otázky :

1. Proč je mag.obvod složen z plechů ?
2. Druhy plechů pro mag.obvody. Jakými veličinami je určena kvalita plechů ?
3. Vztah pro indukované napětí traťa, význam a jednotky jednotlivých členů vztahu.
4. Definice převodu. Jaké další vztahy lze pro převod uvést, jak přesně platí ?
5. Jak a z jakého důvodu jsou vůči sobě časově posunuty proudy primáru a sekundáru ?
6. Co to je náhradní schema jakéhokoli zařízení, tedy i traťa ?
7. Ve stavu naprázdno odebírá trafo ze sítě proud  $I_0$ , který lze rozložit na složky. Jak se tyto složky nazývají a jaký je jejich fyzikální význam ? Jak bývá velký proud naprázdno ?
8. Z jakých složek se skládají ztráty naprázdno ? Na jakých veličinách z hlediska provozu traťa závisejí a jak ?
9. Nakreslete typický průběh charakteristiky naprázdno, zdůvodněte její průběh a vyznačte na ní umístění jmenovitého bodu.
10. Nakreslete typický průběh charakteristiky nakrátko, zdůvodněte její průběh.
11. Co to je napětí nakrátko ? Jak byste odečetli jeho velikost z ch.nakrátko ? Jakou má velikost ?
12. Jaká je podstata ztrát nakrátko ? Na jakých veličinách tyto ztráty závisejí a jak ?
13. V náhradním schematu je v podélné větvi zařazen odpor  $R_{21} = R_2 \cdot p^2$ . Na jakém principu byl odvozen tento vztah ?
14. V podélné větvi jsou dále zařazeny reaktance  $X_\sigma$ . Jak je nazýváme a jaký je důvod jejich zařazení do schematu ?
15. Proč jsou do náhradního schematu zařazeny prvky  $R_{Fe}$  a  $X_\mu$  ?
16. Naznačte na fázorovém diagramu, jak zjednodušeně určujeme úbytek napětí.
17. Jaké ztráty vykazuje trafo za provozu ? Proveďte krátký rozbor těchto ztrát z hlediska jejich změny v závislosti na změně zatížení.
18. Jak vypadá křivka účinnosti v závislosti na zatížení ? Při jakém zatížení má trafo nejvyšší účinnost ?



### 1.9. Vznik trojfázového mag.obvodu

Sdružený trojfázový magnetický obvod lze vydedukovat postupným sblíživáním 3 jednofázových magnetických obvodů :

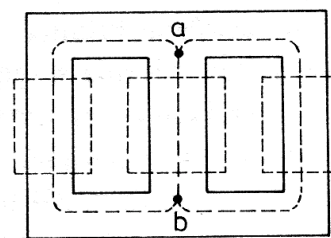
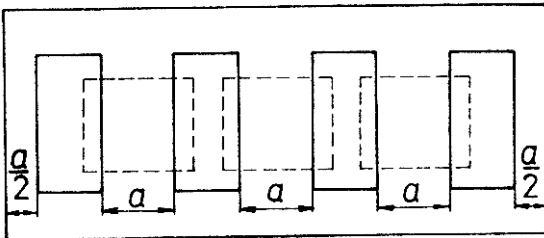


V první fázi přiblížíme 3 nesdružené trojfázové soustavy (napětí a tedy i toky jednotlivých fází jsou posunuty o  $120^\circ$  v čase). V druhé fázi lze vynechat společnou část magnetického obvodu, protože součet 3 toků je v této části v každém okamžiku nulový. V poslední fázi vyrovnáme magnetický obvod do roviny tak, že jeden magnetický obvod zkrátíme. Tímto postupem získáme tzv. jádrový typ magnetického obvodu. Nesymetrie obvodu se projeví při chodu naprázdno nižším proudem naprázdno v kratším sloupku.

Trojčlenné magnetické obvody

Plášťový obvod

jádrový obvod

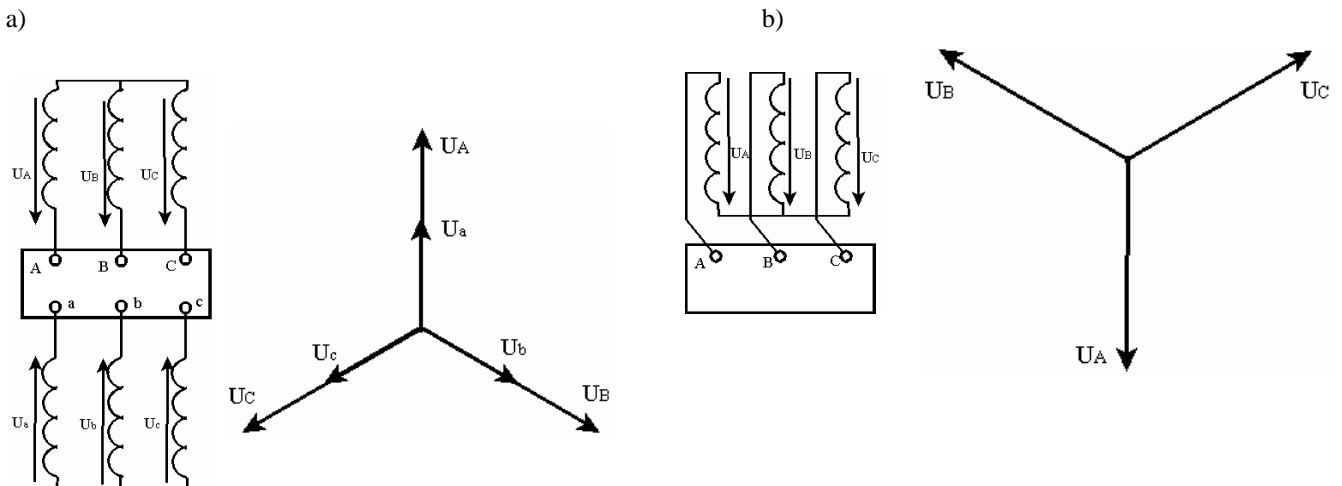


### 1.10. Zapojení trojfázových transformátorů

Vinutí jedné strany (primáru, sekundáru) lze zapojit do hvězdy (Y), trojúhelníka (D) nebo lomené hvězdy (Z). Pro kreslení zapojení a volbu kladného smyslu indukovaného napětí, z čehož vyplývá tvar fázorových diagramů, přijmeme následující pravidla :

- Svorkovnici umístíme mezi vinutími primáru a sekundáru.
- Kladný smysl indukovaných napětí orientujeme na obou stranách směrem ke svorkovnici.
- Fázory kreslíme pro okamžik, kdy fáz.napětí 1.fáze směřuje kolmo nahoru (2.fáze doprava dolů a 3.fáze doleva dolů)

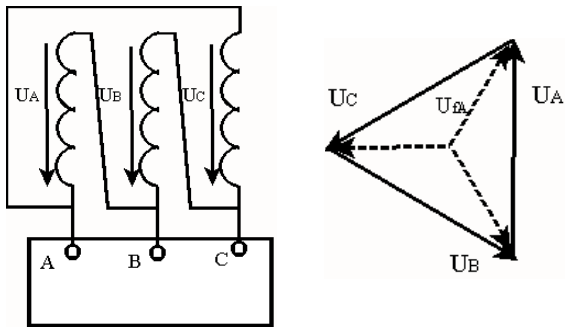
Následující obrázky znázorňují základní zapojení obou vinutí do Y a fázorový diagram.



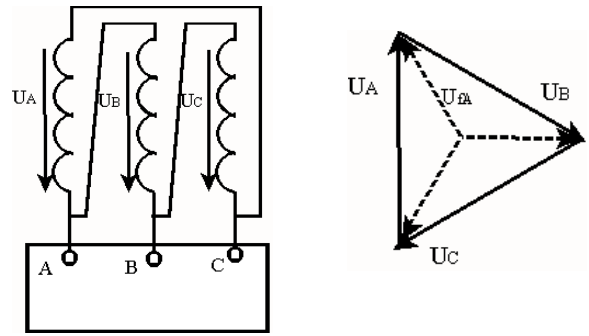
V případě b) byly zaměněny konce cívek, všechna 3 fázová napětí byla otočena o  $180^\circ$ .

Zapojení do trojúhelníku lze také zapojit ve dvojném provedení :

a)



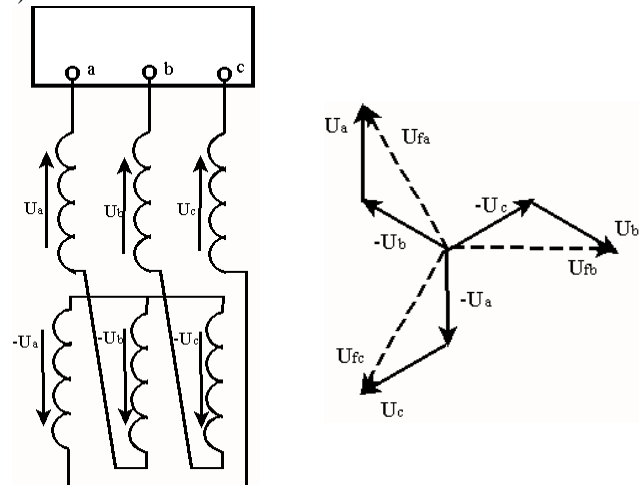
b)



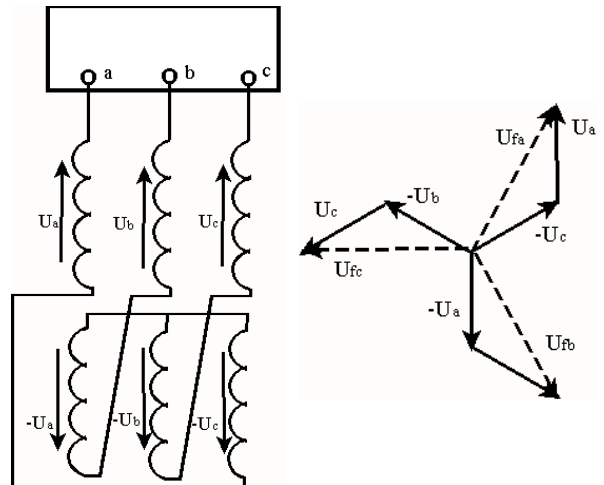
Trojúhelníky sružených napětí odpovídají příslušným zapojením. Pro účely určování tzv.hodinového čísla jsou v diagramech naznačeny i odpovídající polohy fázových napětí soustavy.

Při zapojení do lomené hvězdy se vinutí jednotlivých sloupků rozdělí do dvou částí a ty se cyklicky propojí tak, že každá fáze je kombinací 2 částí, které nejsou na stejném sloupku. I zde jsou 2 možnosti zapojení.

a)



b)



Opět jsou naznačeny polohy výsledných fázových napětí.

Zapojení transformátorů se označuje písmeny, velké písmeno přísluší primáru a malé sekundáru, např. Yy, Dy, Yz.

Porovnání jednotlivých zapojení z hlediska počtu závitů

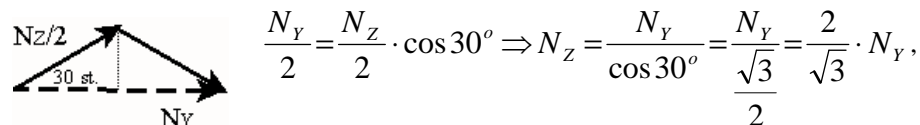
Pro porovnání použijeme vztah pro indukované napětí  $U_i = 4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N$ . Pro danou frekvenci, sycení a průřez magnetického obvodu je počet závitů úměrný velikosti indukovaného napětí.

Předpokládejme, že při zapojení do hvězdy je potřeba  $N_Y$  závitů na každém sloupku. Počet  $N_Y$  je úměrný fázovému napětí sítě, protože při zapojení do hvězdy je na každém vinutí právě fázové napětí.

Při zapojení do trojúhelníku je na každém vinutí sružené napětí. Protože platí, že  $U = \sqrt{3} \cdot U_f$ , bude muset mít každé vinutí

$\sqrt{3}$  x více závitů, než v případě hvězdy, tedy  $N_D = \sqrt{3} \cdot N_Y$ .

U lomené hvězdy je fázové napětí složeno z dvou stejných napětí pootočených vůči sobě o  $30^\circ$ .

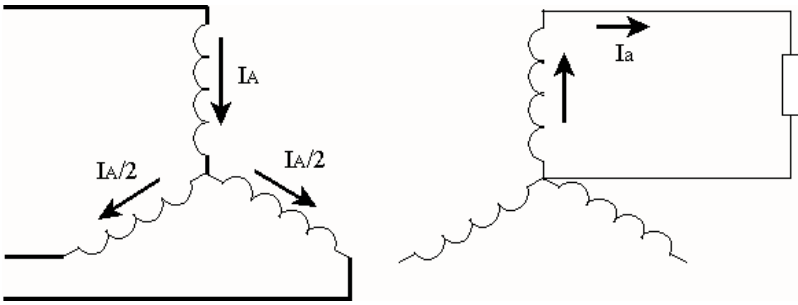


po vyčíslení  $N_Z = 1,155 \cdot N_Y$ .

Platí tedy, že  $N_Y : N_Z : N_D = 1 : 1,155 : 1,732$ . Zapojení do hvězdy vyžaduje nejméně závitů (tedy materiálu vinutí), zapojení do trojúhelníku nejvíce.

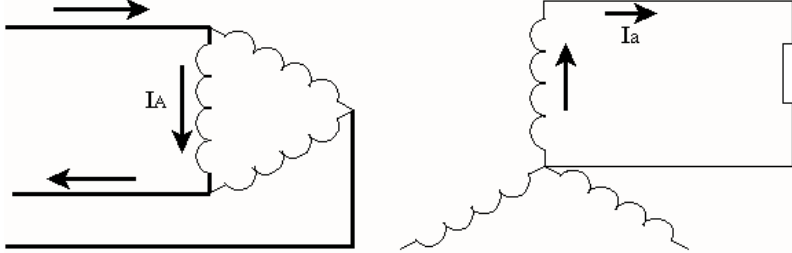
Budeme uvažovat maximální nesymetrii zátěže (zatížení pouze 1 fáze) u zapojení Yy, Dy, Yz. V případě zapojení Y předpokládáme 3vodičový přívod na primáru (bez středního vodiče – síť vn, vvn).

Yy:



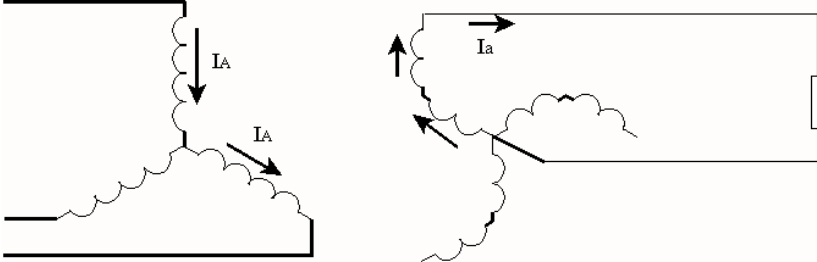
Sekundární proud  $I_a$  vyvolá primární proud v příslušném vinutí  $I_A$ . Tento proud je *nucen* uzavřít obvod přes vinutí, které nemají svůj ekvivalent v sekundáru. Proud  $I_A/2$  v neztižených fázích jsou tedy proudy *naprázdno* značně převyšující jmenovitý proud naprázdno transformátoru. Neztižené sloupky se přesyť. Důsledkem je *zvýšení sekundárních napětí neztižených fází* a *zvýšení ztrát v železe*.  
Zapojení Yy je značně citlivé na nesymetrii zátěže.  
Použije se v případech, kdy není očekávána nesymetrie (např. vvn).

Dy:



Proud  $I_A$  vyvolaný zátěží  $I_a$  se uzavře podle schématu a nezatíží zbývající fáze.  
Zapojení Dy je necitlivé k nesymetrii.

Yz:



Proud  $I_a$  protéká přes poloviny vinutí na různých sloupcích. Vyvolá tedy primární proud v různých fázích a jedna fáze na primáru bude nezatížená.  
Zapojení Yz je necitlivé k nesymetrii zátěže.  
V porovnání se zapojením Dy má však menší spotřebu materiálu na vinutí (viz minulý odstavec), proto se často používá např. pro transformaci vn/nn.

### 1.11. Hodinový úhel

Definice : *Hodinový úhel (číslo) je fázové zpoždění fázového napětí sekundáru za odpovídajícím fázovým napětím primáru měřené v násobcích třiceti stupňů.*

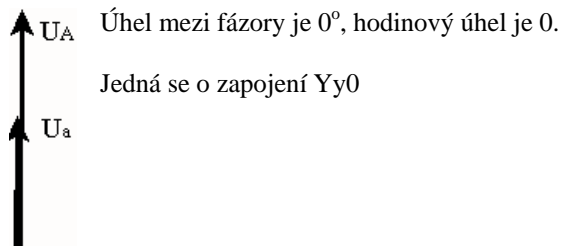
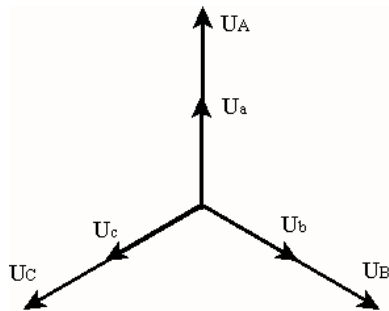
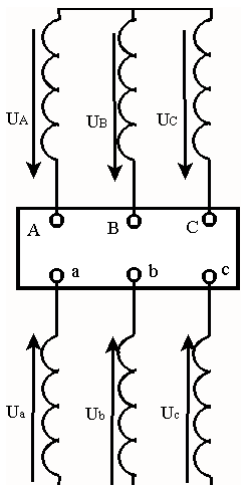
Hodinový úhel tedy může nabývat hodnot 0 – 11 ( $0^\circ$  –  $330^\circ$ ). Toto číslo pak připojujeme k označení zapojení, např. Yy0, Dy5 apod. Při zjišťování hodinového úhlu daného zapojení je třeba nakreslit schéma zapojení, z něho odvodit fázorové diagramy primárních a sekundárních napětí (v konečné fázi fázových napětí) a porovnat fázová napětí jedné fáze.

Příklady :

Schema :

fázorový diagram :

Porovnání napětí jedné fáze :



Úhel mezi fázory je  $0^\circ$ , hodinový úhel je 0.

Jedná se o zapojení Yy0



## 1.12. Paralelní chod

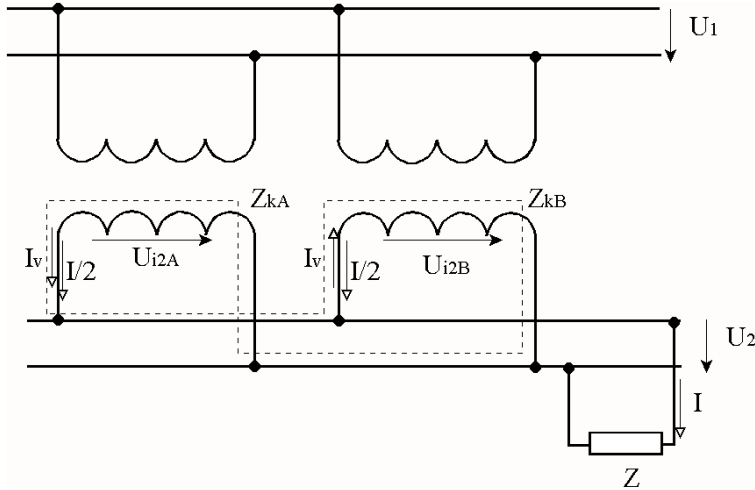
Paralelním chodem nazýváme takové zapojení transformátorů, při němž jsou vstupní vinutí napájena ze společných přípojníc a výstupní vinutí pracují rovněž na společné přípojnici.

Kvalita paralelního chodu závisí na vnitřních vlastnostech transformátorů, na něž nemá obecně obsluha vliv.

Za základní podmínky dokonalého paralelního chodu budeme považovat

1. Při nezatížené výstupní síti neprotékají vinutími žádné proudy kromě proudu naprázdno v primárech.
2. Se vzrůstem zatěžovacího proudu se zatěžují transformátory rovnoměrně a dosahují současně svých jmenovitých proudů.

Základní problematiku vysvětlíme na paralelním chodu 2 jednofázových transformátorů stejného jmenovitého výkonu :



Sekundáry transformátorů tvoří uzavřenou smyčku (čárkovaně). V této smyčce působí rozdíl indukovaných napětí  $\Delta U = U_{i2A} - U_{i2B}$ . Pokud bude rozdíl napětí nenulový, protlačí přes tuto smyčku vyrovnávací proud, který je omezen pouze impedancemi nakrátko obou transformátorů

$$I_V = \frac{\Delta U}{Z_{kA} + Z_{kB}} = \frac{U_{i2A} - U_{i2B}}{Z_{kA} + Z_{kB}}$$

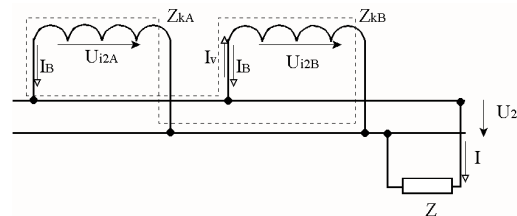
V horším případě bude tento proud vyšší než jmenovitý (až zkratové hodnoty) a ohrozí transformátory.

V lepším případě, při malém  $\Delta U$ , způsobí přerozdělení výkonu na transformátory (ve schématu u transformátoru A zvyšuje původní proud  $I/2$ , u transformátoru B o stejnou hodnotu tento proud snižuje).

Z předchozích úvah a základních podmínek vyplývají tyto konkrétní podmínky pro paralelní chod :

1. Stejný převod ( $\Delta p \leq u_k/10$ , avšak max.  $\Delta p = 0,5\%$ )
2. Stejně napětí nakrátko
3. Stejný hodinový úhel
4. Poměr jmenovitých výkonů do 3:1 (doporučení)

Rámcové důkazy :



Definujme chybu převodu jako  $\Delta p = \frac{U_{i2A} - U_{i2B}}{U_{n2}} \cdot 100$ . Pro čárkovanou smyčku

přes sekundární vinutí napišme napěťovou rovnici se skutečnými proudy v algebraickém stavu (zanedbáme vzájemné fázové posuny).

$$U_{i2A} - Z_{kA} \cdot I_A - U_{i2B} + Z_{kB} \cdot I_B = 0$$

po úpravě  $U_{i2A} - U_{i2B} = Z_{kA} \cdot I_A - Z_{kB} \cdot I_B$

Dále využijeme vztahu pro impedanci nakrátko  $Z_k = \frac{U_k}{I_n}$  :  $U_{i2A} - U_{i2B} = \frac{U_{kA}}{I_{nA}} \cdot I_A - \frac{U_{kB}}{I_{nB}} \cdot I_B = U_{kA} \cdot \frac{I_A}{I_{nA}} - U_{kB} \cdot \frac{I_B}{I_{nB}}$

Rovnici vydělíme  $U_{n2}$  a vynásobíme 100. Na levé straně dostaneme chybu převodu, na pravé straně v každém členu přejdeme napětí nakrátko do procentních hodnot. Dále využijeme toho, že poměr proudů je stejný jako poměr zdánlivých výkonů. Tímto způsobem se dopracujeme k zajímavému vztahu :

$$\Delta p = u_{kA} \cdot \frac{S_A}{S_{nA}} - u_{kB} \cdot \frac{S_B}{S_{nB}}$$

ad 1. : Pro zjednodušení předpokládejme paralelní spolupráci 2 transformátorů o stejném jmenovitém výkonu  $S_n$ , stejném napětí

nakrátko  $u_k = 10\%$  a chybě převodu  $\Delta p = 1\%$ . Potom platí  $\Delta p = \frac{u_k}{S_n} \cdot (S_A - S_B)$ . Vyjádříme-li pro náš příklad rozdíl

výkonů, pak dostaneme  $S_A - S_B = \frac{\Delta p}{u_k} \cdot S_n = \frac{1}{10} \cdot S_n$ . Jednoprocentní chyba převodu způsobí desetiprocentní rozdíl ve

výkonech. Podmínku stejného převodu je tedy třeba splnit velmi přesně !

ad 2. : Předpokládejme, že převody transformátorů jsou shodné, že  $\Delta p = 0$ . Potom  $u_{kA} \cdot \frac{S_A}{S_{nA}} = u_{kB} \cdot \frac{S_B}{S_{nB}}$ . Tento výraz se častěji

interpretuje po úpravách jako  $S_A : S_B = \frac{S_{nA}}{u_{kA}} : \frac{S_{nB}}{u_{kB}}$ , tedy že rozdělení výkonů je úměrné hodnotám  $\frac{S_n}{u_k}$ .

Jestliže budou shodná napětí nakrátko, pak rozdělení výkonů na jednotlivé transformátory bude úměrné jejich jmenovitému výkonům a při zvyšování zátěže dosáhnou transformátory svých jmenovitých výkonů ve stejnou chvíli. Pokud se budou lišit napětí nakrátko, bude transformátor s nižším  $u_k$  více zatěžován. Tento transformátor je pak bude limitní faktorem skupiny.

Příklad : Transformátor  $S_{nA} = 60\text{MVA}$ ,  $u_{kA} = 8\%$  a transformátor  $S_{nB} = 120\text{MVA}$ ,  $u_{kB} = 12\%$  pracují paralelně. Určete

- rozdělení výkonu  $S = 100\text{MVA}$  na jednotlivé transformátory
- maximální zatížení skupiny

a) Výkon se rozdělí v poměru  $S_A : S_B = \frac{S_{nA}}{u_{kA}} : \frac{S_{nB}}{u_{kB}} = \frac{60}{8} : \frac{120}{12} = 7,5 : 10$ , tedy platí

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{7,5}{10} \quad a \quad S_A + S_B = 100. \quad \text{Po vyjádření } S_A \text{ z první rovnice a dosazení do druhé dostaneme}$$

$$0,75 \cdot S_B + S_B = 100 \Rightarrow S_B = \frac{100}{1,75} = 57,1\text{MVA} \quad S_A = 100 - 57,1 = 42,9\text{MVA}$$

b) Transformátor s nižším  $u_k$  převezme vyšší poměrné zatížení. Dříve tedy dosáhne jmenovitého výkonu transformátor A. Proto předpokládejme, že  $S_A = S_{nA} = 60\text{MVA}$ .

Pro výpočet výkonu  $S_B$  využijeme známý poměr výkonů, který jsme zjistili v předchozí části :

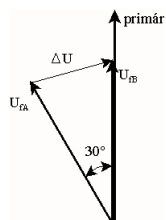
$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{7,5}{10} \Rightarrow S_B = \frac{10}{7,5} \cdot S_A = \frac{10}{7,5} \cdot 60 = 80\text{MVA}$$

Tuto skupinu lze tedy zatížit maximálně na 140 MVA, aniž by se kterýkoli transformátor přetížil.

$$\text{Někdy se definuje koeficient využití skupiny jako } \lambda = \frac{\text{max. možný výkon}}{\sum \text{jmenovitých výkonů}} = \frac{60 + 80}{60 + 120} = \frac{140}{180} = 0,78.$$

Skupinu lze využít max. na 78% sumy jmenovitých výkonů

ad 3. : U trojfázových transformátoru může dojít k rozdílu napětí  $\Delta U = U_{i2A} - U_{i2B}$  v sekundární smyčce i fázovým posunem sekundárních napětí, mají-li transformátory různé hod.číslo. Nejmenší možnou chybou je  $1^\circ$ . Z fázorového diagramu lze odvodit, že  $\Delta U = 2 \cdot U_f \cdot \sin 15^\circ = 0,518 \cdot U_f$ . Tento rozdíl napětí protlačí vyrovnávací proud přes součet impedancí nakrátko, předpokládejme  $2Z_k$ . Vyrovnávací proud pak má hodnotu



$$I_V = \frac{\Delta U}{2 \cdot Z_k} = \frac{0,518 \cdot U_f}{2 \cdot Z_k} = \frac{0,259 \cdot U_f}{\frac{U_k}{I_n}} = 0,259 \cdot \frac{I_n}{u_k} \cdot 100 = 25,9 \cdot \frac{I_n}{u_k} \quad (\text{protože zde platí } u_k = \frac{U_k}{U_f} \cdot 100).$$

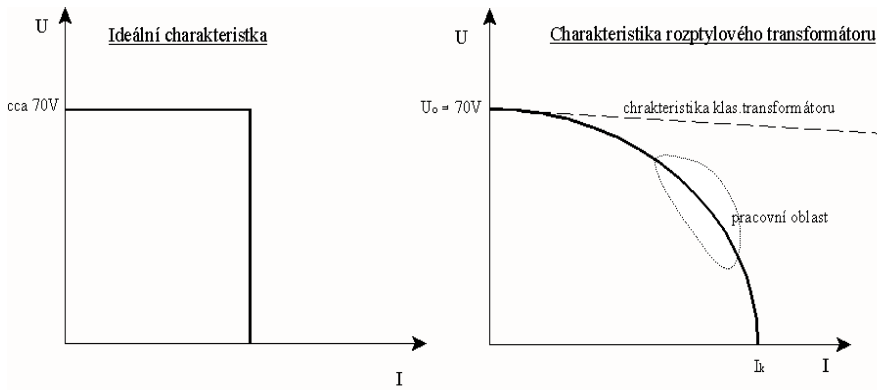
Při rozumné hodnotě  $u_k = 10\%$  dostáváme vyrovnávací proud jako cca 2,6 násobek jmenovitého proudu. Ani nejmenší chybu hodinového úhlu nelze tedy dovolit.

ad 4.: Poměr jmenovitých výkonů do hodnoty 3 : 1 lze chápat jako ekonomické doporučení (menší transformátor je při vyšších poměrech výkonů téměř zbytečný).

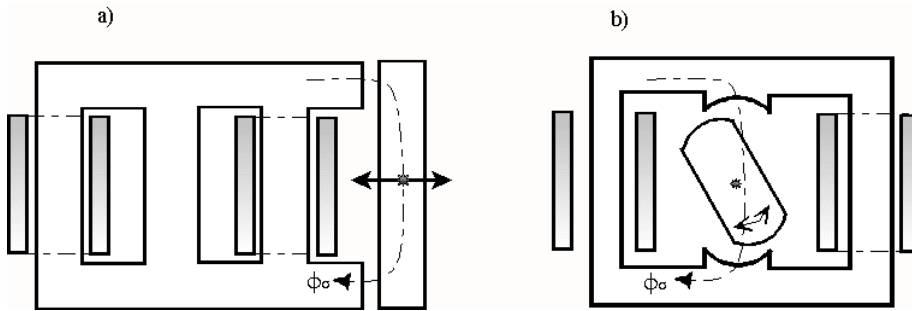
## 1.13. Zvláštní transformátory

### Rozptylové transformátory

Typickým představitelem rozptylových transformátorů jsou *svařovací* transformátory. U svařování obloukem potřebujeme vyšší napětí na zapálení oblouku (cca 70V) a na udržení oblouku napětí nižší (30-40V), které by se navíc mělo kolísat s délkou oblouku tak, by proud oblouku byl přibližně konstantní. Tyto požadavky vedou na měkký zdroj přibližující se charakteristice proudového zdroje s napěťovým omezením.



Měkčí charakteristiky lze dosáhnout zvětšením vnitřního odporu zdroje, zde zvýšením impedance nakrátko  $Z_k$ . Impedance  $Z_k$  má dvě složky: činný odpor  $R$  a rozptylovou reaktanci  $X_\sigma$ . Pokud bychom zvýšili činný odpor (použití odporového materiálu v primárním nebo sekundárním vinutí), zvýšily by se i ztráty ve vinutí, což by bylo ekonomicky nepříznivé. Správnou cestou je tedy zvýšení rozptylové reaktance zvýšením rozptylového toku transformátoru. Tohoto záměru lze dosáhnout zařazením *magnetického bočnicku* do cesty rozptylového toku.



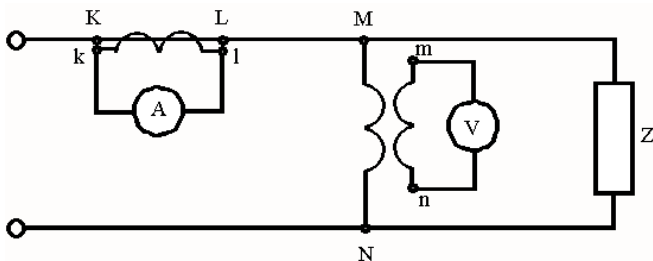
Pohybem, resp. otáčením magnetického bočnicku lze v určitém rozmezí měnit volt-ampérovou charakteristiku. Při zvětšování vzduchové mezery bude klesat rozptyl a charakteristika se stane tvrdší.

### Měřicí (přístrojové) transformátory

Důvodem použití měřicích transformátorů (MT) jsou

- převod měřené veličiny (napětí, proud) na vhodnou úroveň
- galvanické oddělení měřeného obvodu

Zapojení MT do obvodu:



MT zařazujeme do obvodu jako příslušné měřicí přístroje:

- MT proudu (MTP) do série
- MT napětí (MTN) paralelně

Vstupní a výstupní svorky jsou na přístrojích značeny tak jak je uvedeno ve schématu, vstupní velkými písmeny a výstupní malými písmeny.

Základním požadavkem na MT je, aby měřenou veličinu převáděly v přesně daném poměru. Takový požadavek však může splnit pouze *ideální* transformátor. V praxi budou MT zatíženy systémovými chybami, jež vyplývají z faktů uvedených v kapitole 1.4 *Úplné náhradní schéma*. U každého skutečného transformátoru je potřeba na vytvoření toku magnetizační proud, v mag.obvodu vznikají ztráty v železe a v každém vinutí vznikají ztráty Jouleovy. Na základě těchto jevů každý MT vykazuje *chybu převodu*  $\varepsilon$  a *chybu úhlu*  $\delta$ .

### Měřicí transformátory proudu (MTP)

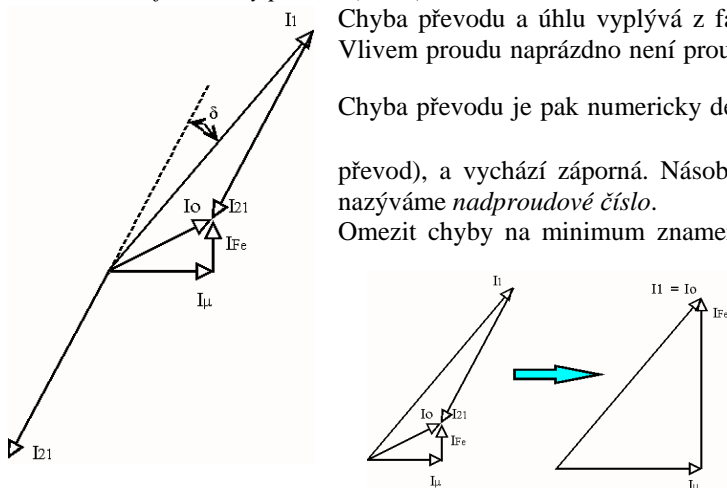
Chyba převodu a úhlu vyplývá z fázorového diagramu kresleného pro přehlednost bez fázorů napětí. Vlivem proudu naprázdno není proud  $I_1$  a  $I_{21}$  přesně v protifázi (chyba úhlu) a  $I_1 \neq I_{21}$  (chyba převodu).

Chyba převodu je pak numericky definována jako  $\varepsilon_I = \frac{p_I \cdot I_1 - I_{21}}{I_1} \cdot 100$ , kde  $p_I = \frac{I_{1N}}{I_{2N}}$  (jmenovitý

převod), a vychází záporná. Násobek jmenovitého proudu MTP, kdy chyba převodu dosáhne -10%, nazýváme *nadproudové číslo*.

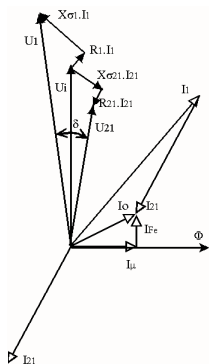
Omezit chyby na minimum znamená zmenšit jejich příčinu - proud naprázdno. Je tedy třeba použít kvalitní plechy a především provozovat MTP při velmi malém sycení.

MTP má v primáru *vnucený* proud, velikost  $I_1$  závisí na měřené zátěži a MTP ho neovlivní. Jestliže bychom přerušili sekundární obvod MTP, stal by se tento proud  $I_1$  proudem naprázdno. Značně by stoupla jak magnetizační složka  $I_\mu$  tak proud  $I_{Fe}$ . Zvýšil by se značně tok a následně indukované napětí transformátoru, což



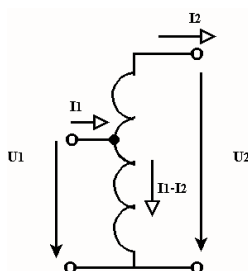
vyvolá nebezpečí průrazu, a také by se značně zvýšily ztráty v železe, které by značně ohřívaly magnetický obvod. *MTP se proto nesmí provozovat naprázdno !*

### Měřicí transformátory napětí (MTN)



Opět zde dochází k systémové chybě úhlu a převodu, tentokrát vlivem úbytků napětí na primární a sekundární větvi trať. V důsledku těchto úbytků nejsou napětí  $U_1$  a  $U_{21}$  přesně ve fázi (chyba úhlu) a  $U_1 \neq U_{21}$ . Chyba převodu je definována obdobně jako  $\varepsilon_U = \frac{p_U \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100$ , kde  $p_U = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$  (jmenovitý převod) I zde zmenšujeme chyby na minimum kvalitním magnetickým obvodem a nízkým sycením. Z MTN se pak stane velmi tvrdý zdroj, který nesmí pracovat nakrátko ! Obvykle se sekundár jistí.

### Autotransformátor



Autotransformátor je stroj s jedním vinutím. Výkon je z primáru na sekundár přenášen dvojí formou : galvanicky a magnetickým tokem.

U autotransformátoru definujeme 2 výkony :

- průchozí výkon  $S_p$ , což je celkový přenesený výkon ( $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$  při zanedbání ztrát)
- typový výkon  $S_t$ , což je výkon přenesený magnetickým polem a odpovídá indukovanému rozdílu napětí  $U_2 - U_1$  [ $(U_2 - U_1) \cdot I_2$ ]. Na tento výkon je třeba dimenzovat magnetický obvod.

Pro poměr těchto výkonů platí 
$$\frac{S_t}{S_p} = \frac{(U_2 - U_1) \cdot I_2}{U_2 \cdot I_2} = \frac{U_2 - U_1}{U_2} = 1 - \frac{U_1}{U_2}$$

Do vzorce vždy dosazujeme tak, aby  $U_2 \geq U_1$ .

Magnetický obvod tedy vychází vždy menší než u klasického transformátoru, na nižší proud lze též dimenzovat společnou část vinutí. Pro tuto výhodu se používá pro transformaci nejvyšších výkonů v nadřazené síti. Dalším běžným použitím je kladičkový laboratorní zdroj. Pro nebezpečí zavlčení vyššího napětí na nižší stranu při přerušení společné části vinutí ho nelze používat v případech, kdy tato porucha může ohrozit bezpečnost (transformace na nn, bezpečné napětí ap.).

## 1.14. Regulace napětí

Z provozních důvodů je třeba u transformátorů regulovat výstupní napětí. Tato regulace je prováděna přepínáním závitových odboček na primáru nebo na sekundáru. Obvyklé řízení je  $\pm 10\%$ , ale někdy se požaduje větší rozsah řízení ve více krocích.

Regulace na straně vyššího napětí může být jemnější. Minimální změna počtu závitů o 1 závit způsobí menší změnu napětí než obdobná změna počtu závitů na straně nižšího napětí.

Změna počtu závitů při konstantním napětí způsobí změnu magnetického toku (viz vztah pro indukované napětí). Doporučuje se tedy přepínat odbočky na té straně, kde napětí kolísá.

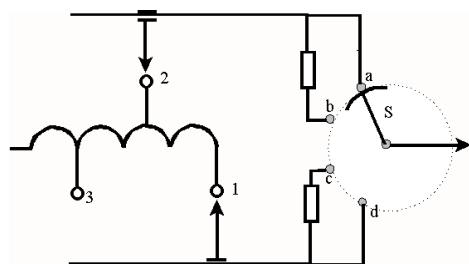
Odbočky se zařazují buď do uzlu transformátoru nebo doprostřed cívek. Odbočky v uzlu jsou technicky snazší, ale cívka je po přepnutí na nižší odbočku umístěna nesymetricky na sloupku (část závitů na konci cívky je vyřazena z provozu), což může způsobit problémy při zkratu a jeho dynamických účincích. Umístění odboček uprostřed cívky zachovává symetrii umístění, je však náročnější na technické provedení.

Techniku přepínání odboček lze zásadně rozdělit na 2 způsoby, které se liší tím, zda přepínáme odbočky bez zátěže (ve stavu naprázdno) nebo pod zátěží. Zatímco první případ nepřináší žádné komplikace, při přepínání pod zátěží vyžaduje splnit 2 protichůdné požadavky :

- nesmí se přerušit proud do zátěže
- nesmí se zkratovat odbočka

Tyto požadavky lze splnit pouze kompromisem : do výstupu se krátce zařadí odpor nebo tlumivka a tentýž prvek na krátký čas přemostí odbočku.

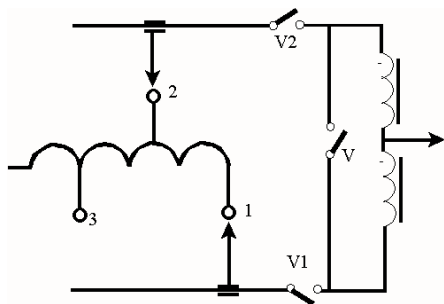
### Oporový (Jansenův) přepínač odboček



Výkon je vyveden z odbočky 2 přes kontakt a. Při přepnutí na odbočku 1 spínač S nejprve spojí kontakty a a b a pak opustí kontakt a. V této chvíli je výkon vyveden přes zařazený odpor. Poté spojí spínač kontakty b a c, odbočka 1-2 bude zkratována přes oba odpory. Po přesunutí na kontakt c bude vyveden výkon z odbočky 1 přes odpor a nakonec se spínač dostane do druhé krajní polohy na kontakt d.

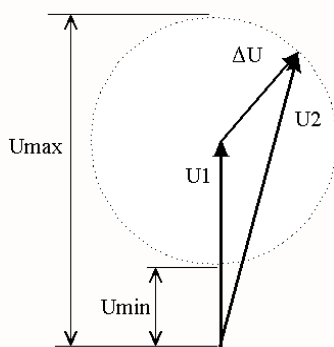
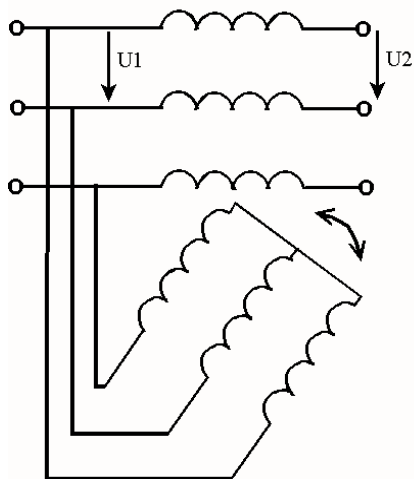


## Přepínač s tlumivkami



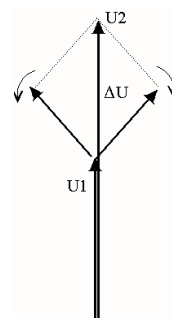
Předpokládejme, že je vyvedena odbočka 1 přes vypínač V1, V2 je vypnut a vypínač V je sepnut. Obě tlumivky tvoří paralelní cestu vyváděnému výkonu, a protože jsou vinuty proti sobě, jejich toky se ruší a výsledná reaktance tlumivek je nulová (činný odpor lze u tlumivek zanedbat). Při přepínání na odbočku 2 se nejprve vypne vypínač V a výkon je vyváděn přes příslušnou tlumivku, druhá je na chvíli vyřazena z provozu. Pak se sepnou V2 a tlumivky překlenou odbočku 1-2. Vypne se V1 a sepnou V.

## Boostrý



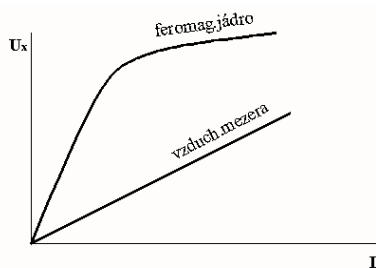
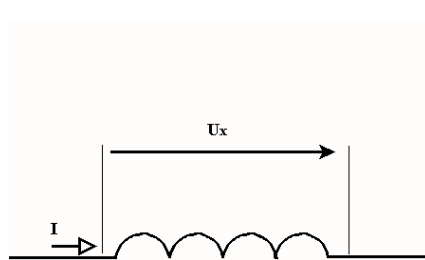
Boostrý neboli *natáčivé transformátory* jsou konstruovány jako asynchronní motory se zabrzděným rotorem. Stator je průchozí a rotorové vinutí a rotorové vinutí do něho indukuje přídavné napětí. Na výstupu je pak fázorový součet těchto napětí, jehož velikost je závislá na natočení napětí  $\Delta U$ .

Mírnou nevýhodou tohoto zapojení je fázové natáčení výstupního napětí vůči vstupnímu. Tento nedostatek lze odstranit dvojitým boostrem, kde výstupní napětí je dáno součtem vstupního napětí a dvou indukovaných stejně velkých napětí  $\Delta U$ , které se natáčí proti sobě (v podstatě 2 jednoduché boostrý zapojené za sebou v jedné konstrukci, změna točení druhého boostrý je zajištěna elektricky záměnou 2 fází).



## 1.15. Tlumivky

Tlumivky jsou cívky, které zařazujeme do obvodu za účelem zvýšení indukční reaktance obvodu. Mívají feromagnetické jádro. Základním parametrem je jejich reaktance, popř. velikost úbytku napětí na tlumivce  $U_x$ .



Budeme-li měřit charakteristiku tlumivky  $U_x = f(I)$ , projeví se v případě tlumivky s jádrem sycení mag.obvodu a charakteristika se zakříví. Znamená to, že se při vyšších proudech reaktance snižuje ( $X_L = \frac{U_x}{I}$ ). Změna reaktance však může

být z různých důvodů nepříjemná, proto charakteristiku *linearizujeme* vzduchovou mezerou. Vzduchová mezera (lze realizovat vložením listu papíru) má velký magnetický odpor

a částečně sníží magnetický tok v obvodu. Obvod se tak tak nedostane do oblasti sycení.

Změnou vzduchové mezery lze i regulovat velikost reaktance tlumivky (zhášecí tlumivky v sítích vn).

*Reaktory* jsou mohutné tlumivky bez železného jádra, které slouží v sítích vn a vvn k omezení zkratových proudů. Musí mít konstrukci dostatečně odolnou vůči dynamickým účinkům zkratových proudů, někdy se i zalévají do betonu.

*Kontrolní otázky :*

1. *Základní zapojení 3f transformátorů (Y, D, Z), fázorové diagramy. Porovnání z hlediska počtu závitů.*
2. *Definice hodinového úhlu.*
3. *Nakreslit schema předepsaného zapojení (např. Dy1, Yz11 atd.).*
4. *Citlivost zapojení na nesymetrii zátěže (Yy, Dy, Yz).*
5. *Podmínky paralelního chodu transformátorů, jejich zdůvodnění*
6. *Výpočet maximálního zatížení skupiny ze zadaných jm.výkonů a napětí nakrátko.*
7. *Rozptylové transformátory - konstrukce, zatěžovací charakteristika, její zdůvodnění pomocí náhr.schematu.*
8. *Důvody použití měřicích transformátorů. Schema zapojení do obvodu.*
9. *Chyby měřicích transformátorů. Nadproudové číslo.*
10. *Specifika MTP - vnucený proud, důsledky rozpojení sekundáru.*
11. *Autotransformátor - výhody a nevýhody. Výkon průchozí a typový.*
12. *Regulace napětí - umístění odboček. Problematika přepínání pod zátěží.*
13. *Jansenův přepínač, přepínač s tlumivkami.*
14. *Boostrý - princip činnosti.*
15. *Tlumivky, reaktory.*