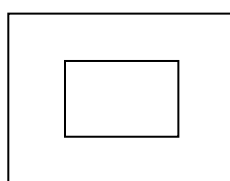
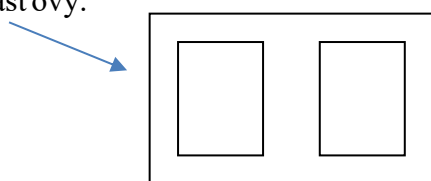


1. TRANSFORMÁTORY

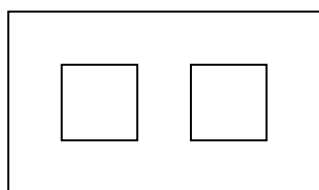
1.1. Konstrukční uspořádání

Základní části transformátoru jsou magnetický obvod tvořený vzájemně izolovanými transformátorovými plechy a vinutí z měděných nebo hliníkových izolovaných vodičů uložených na izolační kostře. Kromě těchto částí mají transformátory různé kryty sloužící jednak k izolaci a jednak k ochraně proti prostředí. Dále mohou mít transformátory různé druhy chlazení, popřípadě mohou mít podvozky či jiné mechanické upevnění.

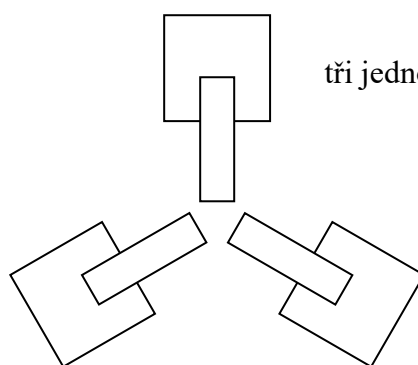
„Aktivní železo“ transformátoru = magnetický obvod - skládá se z izolovaných plechů nejčastěji 0,35 nebo 0,5 mm bez vzduchové mezery (tím bude malý proud naprázdno). Jednofázové transformátory mají dva různé tvary magnetických obvodů a to jádrový nebo plášťový.



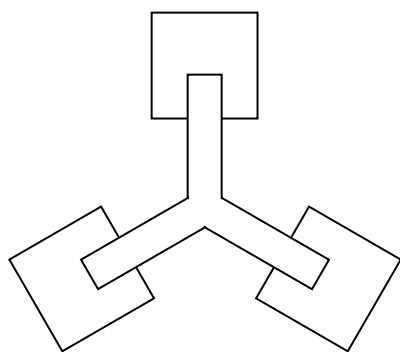
Trojfázové transformátory mají různé druhy obvodů: jádrový, plášťový (používá se výjimečně), popřípadě to může být soustava tří jednofázových obvodů posunutých prostorově o 120° a to buď zvlášť, nebo se společným středním sloupkem.



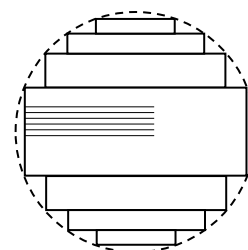
jádrový



tři jednofázové posunuté o 120°

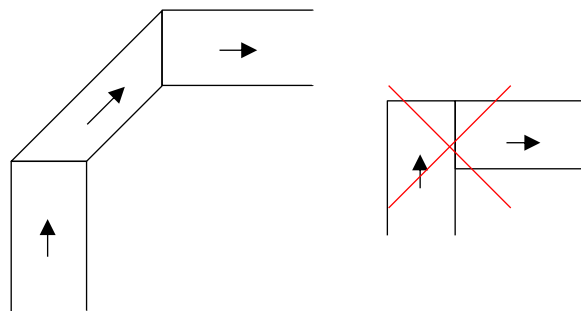


tři jednofázové
se společným sloupkem

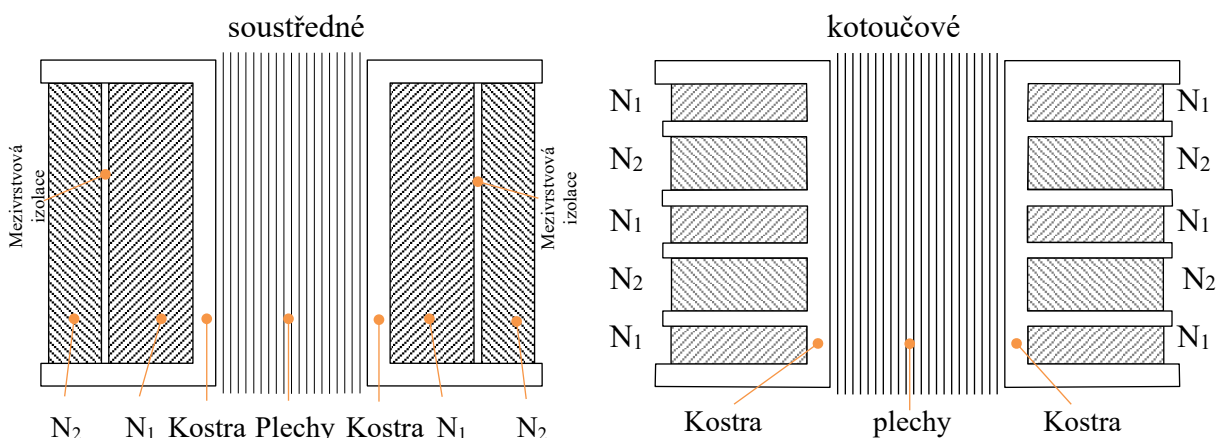


Jelikož u velkých transformátorů je jednodušší navinout cívku na kruhovou kostru (vodiče velkého průřezu se hůře ohýbají), proto se pro využití výkonu dělá magnetické jádro tzv. odstupňováním (výkon transformátoru je přímo úměrný druhé mocnině průřezu magnetického obvodu). U těchto velkých transformátorů se také využívají plechy válcované za studena orientovaně, které mají velice malý magnetický odpor ve směru válcování, ale výrazně větší magnetický odpor ve směru kolmém. Musíme proto skládat plechy tak, aby magnetický tok jimi procházel pouze

ve směru válcování (viz obrázek)



Vinutí transformátorů - Vyrábí se z izolovaných měděných nebo hliníkových (menší hmotnost i při větším průřezu) vodičů navinutých na kostrách z izolačního materiálu. U vinutí procházených velkými proudy se také mezi jednotlivé vrstvy vinutí vkládá papírová izolace. Jednofázové i trojfázové mají různé druhy uspořádání vinutí, které dělíme podle uspořádání cívek na soustředné (jednodušší na výrobu) a kotoučové (lepší chlazení) a podle uspořádání závitů na cívkové a polohové.



Chlazení transformátorů

Do 30 kVA výkonů transformátoru se transformátory vyrábějí jako vzduchové tedy chlazené jen okolním vzduchem.

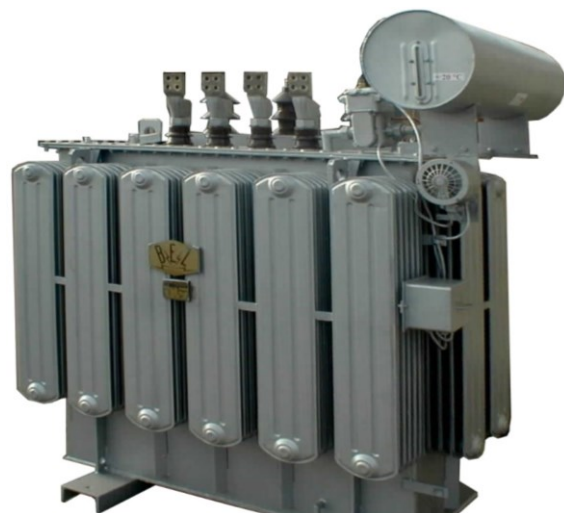
Do 20 MVA se transformátory chladí přirozeným chlazením v oleji. Nádoby jsou hladké.

Do 25 MVA se chladicí plocha zvětšuje zvlněním.

Do 30 MVA se chladicí plocha zvětšuje trubkami nebo radiátory přivařenými na nádobě s transformátorem.

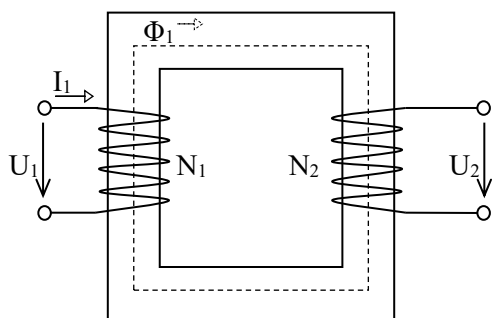
Do 60 MVA se zvyšuje chlazení ofukováním trubek nebo radiátorů.

Od 60 MVA chladíme nuceným oběhem oleje, tedy horký olej odvádíme do chladiče a studený přivádíme zpět do nádoby.

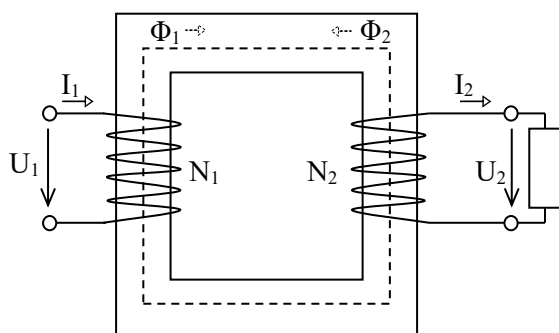


1.2. Princip činnosti

Transformátor má na magnetickém obvodu navinuty minimálně dvě cívky, primární cívka se



připojuje na síť a odebírá z ní střídavý příkon. Cívkou začne procházet proud I_1 a tím vybudí střídavý magnetický tok Φ_1 v magnetickém obvodě. Tento magnetický tok prochází oběma cívkami a indukuje do nich napětí. Napětí indukované do primární cívky je úbytkem napětí v primárním obvodě a napětí indukované do sekundární cívky je zdrojem napětí v sekundárním obvodě.



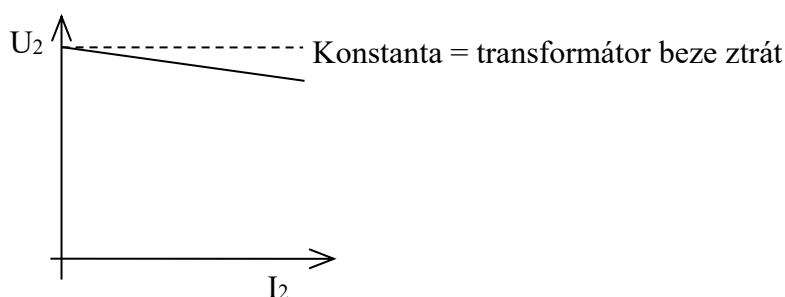
Po připojení spotřebiče začne sekundárním obvodem procházet proud I_2 a transformátor dodává do spotřebiče výkon. Proud I_2 , ale budí magnetický tok Φ_2 , který dle Lenzova zákona působí proti toku Φ_1 . Výsledný tok Φ ($\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$) musí však být vždy natolik velký, aby do primární cívky indukoval stále stejné napětí, které

je v rovnováze s napětím zdroje U_1 ($U_1 = U_i + R_1 \cdot I_1 + X_{1\sigma} \cdot I_1$ viz kapitola náhradní schéma - rovnice R 2.4.1).

Začne-li procházet nebo obecně zvětší-li se proud I_2 v sekundárním obvodě, zvětší se tím i tok Φ_2 , tím se zmenší výsledný tok Φ a zmenší se též indukované napětí. Došlo by k rozvážení rovnice R 2.4.1, což nelze, a proto se musí zvětšit primární proud I_1 . Zvýšením proudu I_1 se zvýší i tok Φ_1 jím buzený a výsledný tok Φ se vrátí na původní hodnotu. Platí tedy $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = \text{konstanta}$, tzn., že prostřednictvím magnetického toku se přenesl požadovaný větší výkon ze strany sekundární na stranu primární. Obdobně to platí i při zmenšení proudu I_2 . Zmenší-li se proud I_2 , zmenší se i magnetický tok Φ_2 , čímž se zvětší výsledný tok Φ . Indukované napětí se též zvětší (opět by došlo k rozvážení rovnice R 2.4.1) a proto se musí proud I_1 zmenšit, čímž se zmenší i tok Φ_1 a výsledný tok Φ se opět vrátí na původní hodnotu.

Zatěžovací charakteristika transformátoru

Sekundární napětí se se zatížením zmenšuje, protože část indukovaného napětí ubývá na vnitřní impedanci transformátoru.



1.3. Indukované napětí a převod transformátoru

Okamžitá hodnota indukovaného napětí je dána indukčním zákonem $u_i = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$, kde $\frac{d\Phi}{dt}$ znamená změnu toku za element času (nekonečně krátký časový úsek). Mění-li se magnetický tok sinusově tedy $\Phi = \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t$ pak po dosazení a vyřešení diferenciální rovnice dostaneme vztah pro okamžitou hodnotu indukovaného napětí $u_i = \omega \cdot N \cdot \Phi_{\max} \cdot \cos \omega t$. Maximální hodnota indukovaného napětí ($\cos \omega t = 1$) je $U_{i\max} = \omega \cdot N \cdot \Phi_{\max}$ a jelikož $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ a $U_{i\max} = \sqrt{2} \cdot U_i$, dostáváme vztah pro efektivní hodnotu indukovaného napětí:

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

U ideálního (bezeztrátového) transformátoru můžeme říct, že $U_1 = U_{i1} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_1$ a $U_2 = U_{i2} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_2$.

Dělením obou rovnic dostáváme vztah pro převod transformátoru: $p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$. Využijeme-li vztahů pro výpočet příkonu a výkonu transformátoru $S_1 = U_1 \cdot I_1$ a $S_2 = U_2 \cdot I_2$ a jelikož u bezeztrátového transformátoru je $S_1 = S_2$ můžeme vztah pro převod transformátoru upravit na tvar:

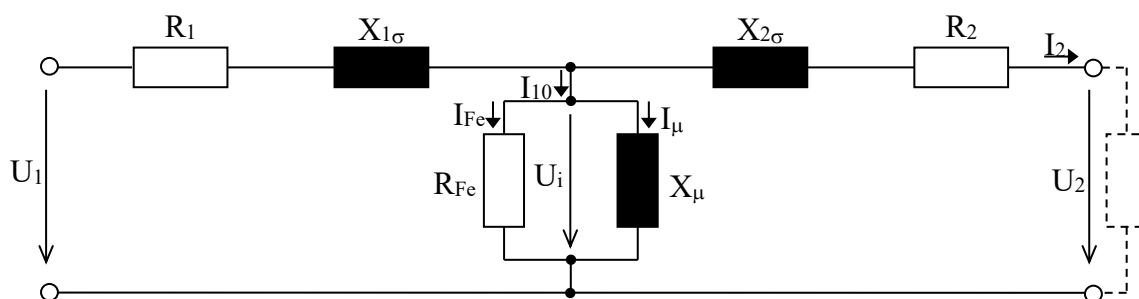
$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Nebo pro reálné transformátory na tvar:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \doteq \frac{I_2}{I_1}.$$

1.4. Náhradní schéma a fázorový diagram transformátoru

Náhradní schéma transformátoru je poskládáno z podélné větve složené z činných odporů primárního a sekundárního vinutí (R_1 a R_2) a induktivních reaktancí obou cívek procházených rozptylovým tokem ($X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$) a z příčné větve složené z magnetického odporu magnetického obvodu (R_{Fe}) a reaktance magnetického obvodu (X_μ).



$X_{1\sigma}$ - rozptylová reaktance primární cívky dané rozptylovým magnetickým tokem $\Phi_{1\sigma}$

$X_{2\sigma}$ - rozptylová reaktance sekundární cívky dané rozptylovým magnetickým tokem $\Phi_{2\sigma}$

R_1 , R_2 - činné odpory cívek

R_{Fe} - odpor magnetického obvodu je dán tepelnými ztrátami

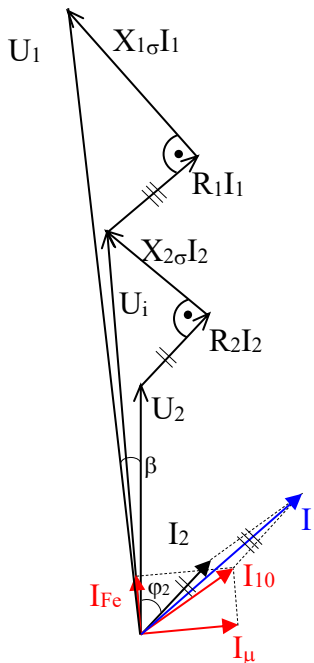
X_μ - reaktance magnetického obvodu

Pro náhradní schéma můžeme napsat rovnice dle I. a II. Kirchhoffova zákona:

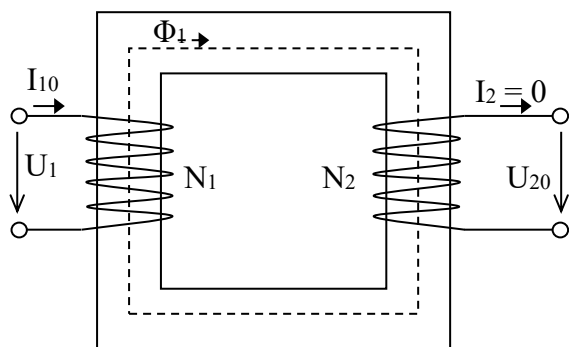
$$R_1 \cdot I_1 + X_{1\sigma} \cdot I_1 + U_i = U_1 \quad R\ 2.4.1 \qquad R_2 \cdot I_2 + X_{2\sigma} \cdot I_2 + U_i = U_2 \quad R\ 2.4.2$$

$$I_{10} = I_{Fe} + I_{\mu} \quad R\ 2.4.3 \qquad I_1 = I_{10} + I_2 \quad R\ 2.4.4$$

Při konstrukci fázového diagramu vycházíme z hodnot naměřených na sekundární straně (U_2 , I_2 a φ_2). K napětí U_2 přičteme obrácené hodnoty vektorů odpovídajících úbytků na odporu R_2 (je ve fázi s proudem I_2) a na rozptylové reaktanci $X_{2\sigma}$ (je o 90° posunut před proud I_2). Koncový bod spojíme s počátkem, čímž získáme vektor indukovaného napětí U_i . Dále musíme nakreslit činnou a jalovou složku magnetizačního proudu I_{10} , kde činná složka I_{Fe} je ve fázi s indukovaným napětím U_i a jalová složka I_{μ} se za ním zpožďuje o 90° . Vektorový součet těchto složek je proud na prázdno I_{10} . Sečteme-li vektorově proud I_{10} s proudem I_2 získáme proud I_1 . Nyní můžeme k fázoru indukovaného napětí přičíst úbytek na odporu R_1 (ve fázi s I_1) a úbytek na rozptylové reaktanci $X_{1\sigma}$ (předbíhá proud I_1 o 90°). Spojením počátku a konce úbytku na $X_{1\sigma}$ dostáváme napětí U_1 . Úhel β představuje fázový posun sekundárního napětí vůči primárnímu síťovému napětí.



1.5. Transformátor naprázdno

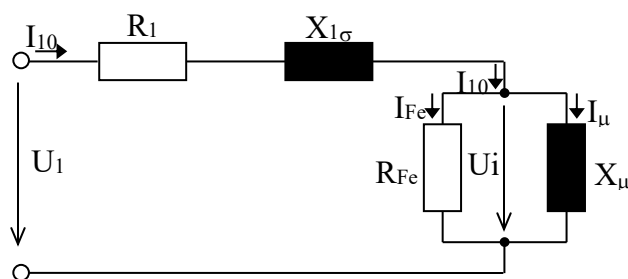


Transformátor ve stavu naprázdno má rozpojené sekundární svorky a sekundárním vinutím tedy neprochází žádný proud. Vstupním vinutím prochází proud I_{10} , který je velice malý a slouží k vytvoření magnetického toku v jádře a ke krytí ztrát v magnetickém obvodu. Skládá se tedy ze dvou částí: z proudu magnetizačního I_{μ} (fázově

posunutého o 90° za U_i), který vytváří magnetické pole a z proudu na krytí tepelných ztrát v železe I_{Fe} (ve fázi s napětím U_i).

Voltampérová charakteristika transformátoru naprázdno odpovídá magnetizační charakteristice. Ztráty v primárním vinutí jsou díky malému proudu velice malé, a proto je zanedbáváme, veškeré ztráty ve stavu naprázdno tedy považujeme za ztráty v železe.

Měřením naprázdno (měříme napětí U_{10} , proud I_{10} a výkon P_{10} na primární straně) a výpočtem



z naměřených hodnot určíme parametry dvou prvků náhradního schéma R_{Fe} a

$$X_{\mu} \text{ ze vztahů: } R_{Fe} = \frac{U_{10}}{I_{10}} \cdot \cos \varphi_{10},$$

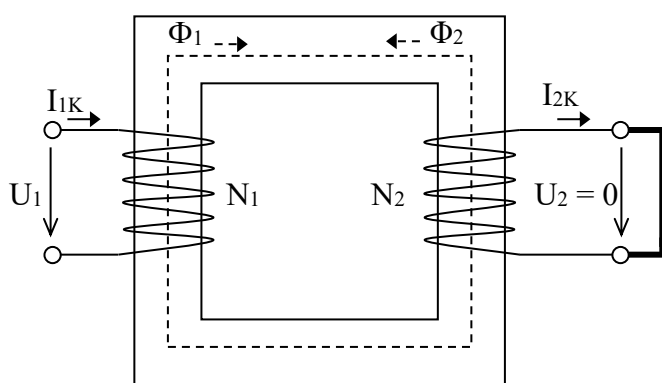
$$X_{\mu} = \frac{U_{10}}{I_{10}} \cdot \sin \varphi_{10} \text{ (úbytek napětí na } R_1$$

a $X_{1\sigma}$ můžeme díky malému proudu I_{10}

zanedbat).

1.6. Transformátor nakrátko

Transformátor ve stavu nakrátko má sekundární svorky propojeny bezodporovou propojkou



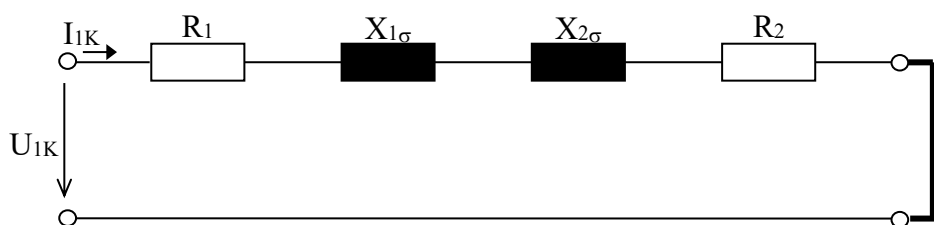
(tedy napětí $U_2 = 0$) a sekundárním obvodem prochází obrovský proud, který natolik zahřívá transformátor, že by mohlo dojít k jeho zničení. Musí tedy dojít k reakci ochrany a transformátor musí být odpojen.

Při měření stavu nakrátko jsou výstupní svorky také spojeny do krátku a proto musíme snížit napětí na primární cínce

tak, aby sekundárním vinutím procházel právě jmenovitý proud, který nezpůsobí zničení transformátoru. Sníženému primárnímu napětí říkáme napětí nakrátko a často jej vyjadřujeme

v procentech jmenovitého napětí. $u_{1K} = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \cdot 100\%$. Procentní napětí nakrátko bývá 4 až 10%.

Náhradní schéma transformátoru ve stavu nakrátko kreslíme bez paralelní větve R_{Fe} , X_{μ} ,



neboť impedance zkratu je mnohonásobně menší a tedy téměř celý proud bude procházet zkratem.

Měřením nakrátko (měříme napětí U_{1K} , proud I_{1K} a výkon P_{1K} na primární straně) jsme zjistili parametry R_1 , R_2 , $X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$

$$(R_1 = R_2' = \frac{1}{2} \frac{U_{1K}}{I_{1K}} \cdot \cos \varphi_{1K}, X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{1}{2} \frac{U_{1K}}{I_{1K}} \cdot \sin \varphi_{1K} - \text{hodnoty s čarou jsou přepočteny na}$$

primární stranu).

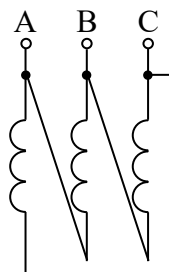
1.7. Trojfázové transformátory

1.7.1. Zapojení trojfázových transformátorů

Vinutí trojfázových transformátorů můžeme spojit do trojúhelníku, hvězdy nebo lomené hvězdy. Svorky transformátoru popisujeme na straně vyššího napětí velkými písmeny na straně nižšího napětí pak písmeny malými.

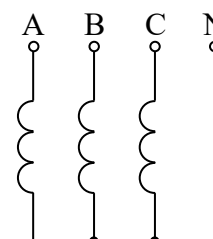
Zapojení transformátoru do trojúhelníku (D, d, Δ)

Zapojení do trojúhelníku dostaneme tak, že konec (začátek) cívky na jednom sloupku spojíme se začátkem (koncem) cívky na následujícím (předchozím) sloupku.



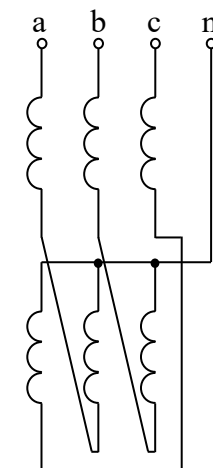
Zapojení transformátoru do hvězdy (Y, y, $\star$)

Zapojení do hvězdy znamená, že začátky nebo konce vinutí spojíme do uzlu a druhé vývody vinutí připojíme ke svorkám (často se ke svorce N vyvede i spojený uzel).

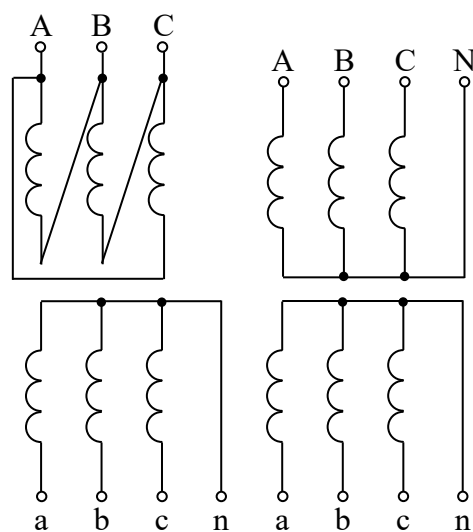


Zapojení transformátoru do lomené hvězdy (z, $\Re$)

Pro zapojení transformátoru do lomené hvězdy (jen na sekundární straně) je potřeba více mědi $\times$ hliníku (cca o jednu třetinu), neboť každá fáze se skládá ze dvou cívek navinutých na sousedních sloupcích. Zapojení do lomené hvězdy vznikne tak, že začátky (konce) druhých polovin cívek spojíme do uzlu a konce (začátky) spojíme se začátky (konci) prvních polovin cívek umístěných na předchozích (následujících) sloupcích. Konce (začátky) pak vyvedeme na svorkovnici. Toto zapojení se používá tam, kde je velmi nesouměrný odběr, protože se nesouměrný odběr v jedné fázi sekundární strany přenesse na dvě fáze primární strany.



Kompletní zapojení transformátoru se pak skládá ze zapojení primárních cívek a ze zapojení cívek sekundárních. Kompletní zapojení transformátorů se poté označuje kombinací písmen zapojení (velké písmeno na straně vyššího napětí, malé na straně nižšího napětí) a čísla vyjadřujícího hodinový úhel (viz dále)

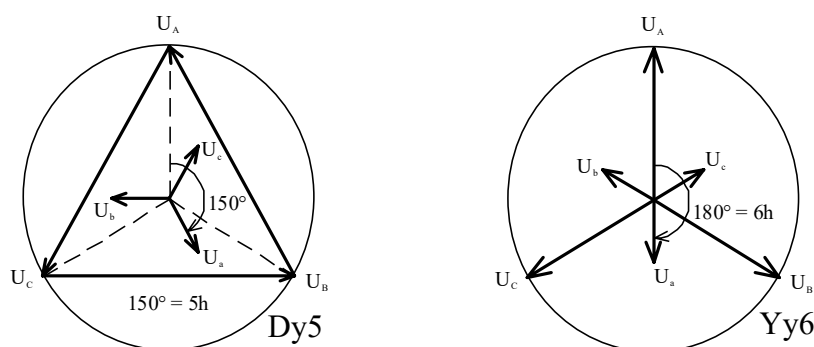


Zapojení Dy5

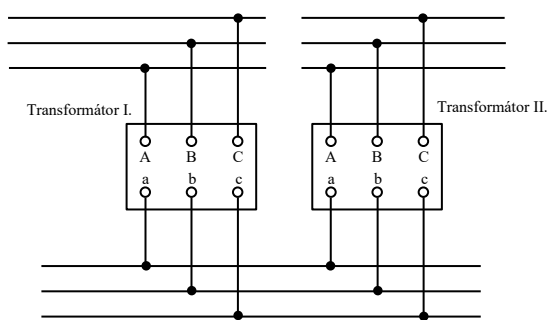
Zapojení Yy6

1.7.2. Hodinový úhel

Je to fázový posun mezi primárním a sekundárním fázorem napětí téže fáze měřený ve směru hodinových ručiček od primárního k sekundárnímu vyjádřený v hodinách (1 hodina = 30°).



1.7.3. Paralelní spolupráce transformátorů



Nestačí-li dodávat výkon jeden transformátor, připojujeme k němu další transformátor paralelně. Transformátory pracují paralelně, jsou-li navzájem propojeny odpovídající svorky (alespoň na sekundární straně – primární strany mohou být napájeny z jiných zdrojů).

Paralelně spolupracující transformátory musí

splňovat tyto podmínky:

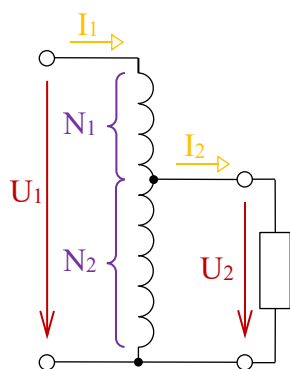
- 1) jmenovitá napětí propojených vinutí obou transformátorů musí být stejná (při nestejném napětí by vznikaly velké vyrovnávací proudy),
- 2) musí mít stejné procentní napětí nakrátko (při zátěži by napětí na výstupu transformátoru s vyšším procentním napětím nakrátko kleslo více než u transformátoru s nižším procentním napětím nakrátko a při nestejném napětí by opět vznikaly velké vyrovnávací proudy),
- 3) musí mít stejný hodinový úhel (můžou mít různé zapojení), aby výstupní napětí transformátorů bylo ve fázi (sinusoidy okamžitých hodnot napětí musí splývat, jinak by opět vznikaly velké vyrovnávací proudy),
- 4) měli by mít přibližně stejný výkon.

1.8. Speciální transformátory

Mezi tyto transformátory patří například autotransformátor, nebo měřicí transformátory proudu a napětí.

1.8.1. Autotransfómátor

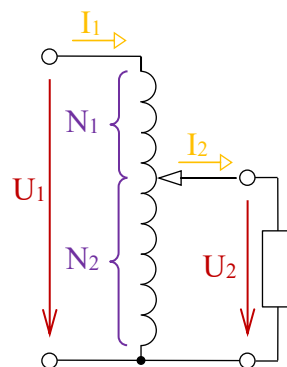
Jedná se o transformátor s pouze jedním vinutím rozděleným na dvě části spojené do série.



Přičemž část s N_2 závitů je společná pro primární i sekundární stranu a prochází jí proud odpovídající rozdílu $I_1 - I_2$. Převod transformátoru

$$\text{je pak dán vztahem: } p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}.$$

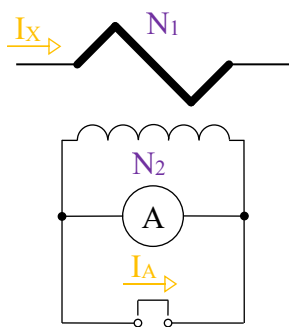
Tyto transformátory se často konstruují jako regulační tedy s proměnnou hodnotou výstupního napětí. Regulace napětí je umožněna vodivým jezdcem pohybujícím se po odizolované části vinutí. Napětí se mění skokově vždy o hodnotu odpovídající jednomu závitů cívky autotransfómátoru.



Výhoda autotransfómátoru spočívá v menší spotřebě mědi na vinutí, jeho nevýhodou je pak galvanické neoddělení vstupního a výstupního obvodu. Mohlo by se tedy stát, že při přerušení vinutí ve společné části (N_2) se objeví na výstupní straně plné vstupní napětí.

1.8.2. Měřicí transformátory proudu a napětí

Slouží ke změně rozsahu ampérmetru nebo voltmetru. Měřicí transformátor proudu převádí měřený proud na proud maximálně 5 A (popř. 1 A). Primární cívka má často jen jeden závit



nebo dokonce jen magnetickým obvodem prochází vodič tyčového průřezu (má tedy jen $\frac{1}{2}$ závitů). Sekundární cívka je doplněna zkratovačem svorek, který se rozpojí až po připojení ampérmetru (jelikož napěťový převod a převod proudový jsou obrácené bylo by při nezátíženém transformátoru na výstupu obrovské napětí - $\frac{U_1}{U_2} \doteq$

$$\frac{I_2}{I_1} \Rightarrow U_2 = \frac{U_1 \cdot I_1}{I_2} - \text{máme-li například transformátor } 100/5 \text{ A na } 12,7 \text{ kV (22 kV síť), bude } U_2 = 254\,000 \text{ V}.$$

Měřicí transformátor napětí převádí měřené napětí na napětí maximálně 100 V (popřípadě $100/\sqrt{3}$ V). Primární strana má být uzemněna.

Hodnoty naměřené měřicími přístroji se pro zjištění velikosti měřené veličiny musí vynásobit převodem měřicího transformátoru ($I_X = I_A \cdot p_A$; $U_X = U_V \cdot p_V$).

