

8. TRANSFORMÁTORY

Určeno pro posluchače bakalářských studijních programů FS

- 8.1 Princip činnosti
 - 8.1.1 Náhradní schéma
 - 8.1.2 Princip činnosti skutečného transformátoru
- 8.2 Transformátor naprázdno
- 8.3 Transformátor nakrátko
- 8.4 Transformátor při zatížení
- 8.5 Konstrukce a provedení transformátorů
- 8.6 Speciální transformátory

Ing. Vítězslav Stýskala
Listopad 1998

TRANSFORMÁTORY

Jsou elektrické netočivé stroje, které umožňují změnu velikosti (transformaci) střídavého napětí při konstantní frekvenci.

Rozdělujeme je především podle počtu fází na

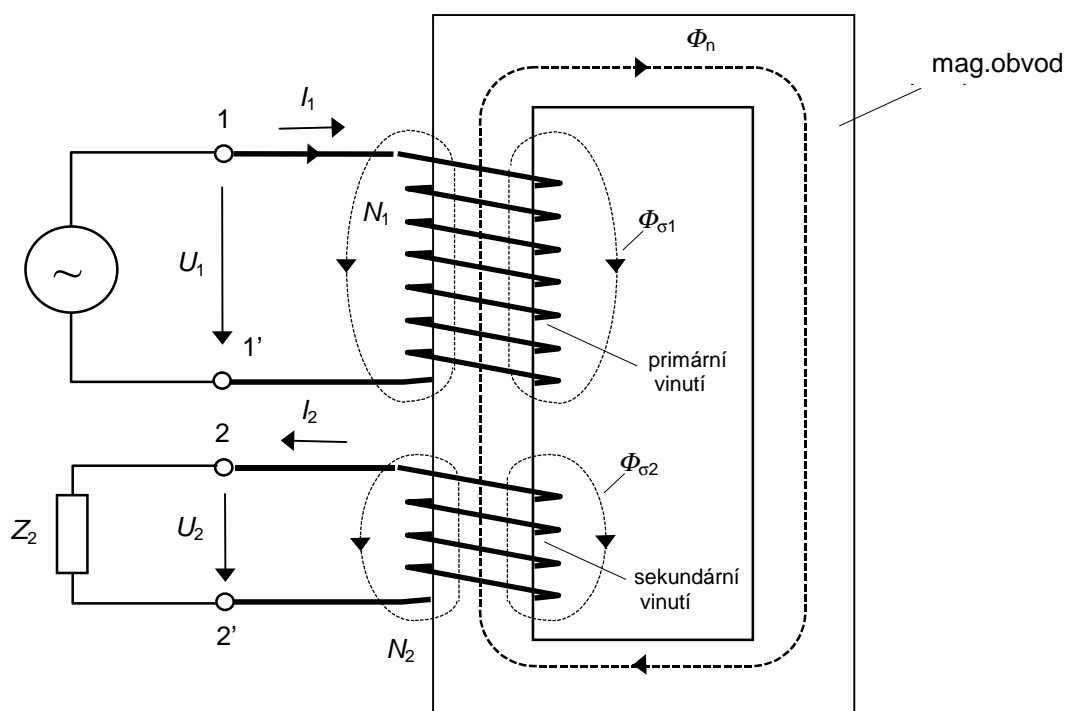
jednofázové

a

trojfázové

8.1 Princip činnosti

Vysvětlíme si ho na nákrese ideálního jednofázového transformátoru.



Obr.1 - Nákras jednofázového transformátoru s železným jádrem

Pro ideální transformátor platí zjednodušení reálného stavu :

1. $\sum \Delta P = 0$, $R_1 = 0$, $R_2 = 0$, tj. celkové ztráty a činné odpory vinutí jsou nulové.
2. Rozptyl je nulový ($\Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2} = 0$).
3. Celý magnetický tok Φ_h prochází všemi závitů primárního a sekundárního vinutí.

Střídavý proud v primárním vinutí I_1 vybudí střídavý magnetický Φ , který svou změnou indukuje ve vinutích transformátoru indukované napětí U_{ind} , závislé na velikosti frekvence primárního proudu f_1 a magnetického toku Φ_m .

$$U_{\text{ind}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \quad (\text{V})$$

a pro jednotlivá vinutí pak $U_{\text{ind1}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \cdot N_1$, $U_{\text{ind2}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \cdot N_2$

Poměr indukovaných napětí je převod transformátoru K .

$$\frac{U_{\text{ind1}}}{U_{\text{ind2}}} = \frac{N_1}{N_2} = K = \frac{U_1}{U_2} \quad (1)$$

Z předchozího vztahu pro ideální transformátor vyplývá, že velikosti indukovaných napětí jsou přímo úměrné počtům závitů jednotlivých vinutí a odpovídají poměru svorkových napětí U_1 a U_2 .

Při předpokladu rovnosti příkonu P_1 a výkonu P_2 ($\cos \varphi = 1$, $P_d = 0$) platí:

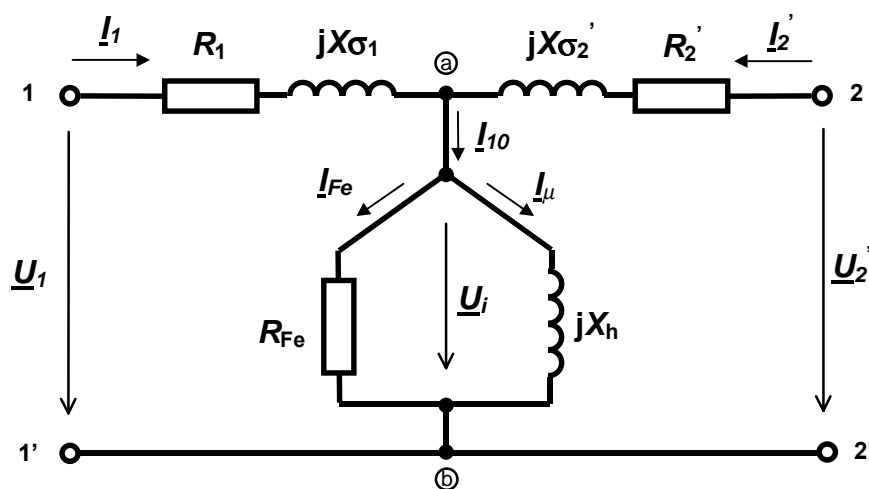
$$P_1 = P_2 \Rightarrow U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = K$$

Ideální transformátor je charakterizován jediným parametrem - převodem K .

8.1.1 Náhradní elektrické schéma skutečného transformátoru

Pro skutečný transformátor neplatí 3 výše uvedené podmínky !

Umožňuje popis elektrickými rovnicemi. Vychází z ideálního transformátoru, doplněného o vedlejší obvodové prvky. Primární napětí U_1 je harmonické a magnetický obvod není nasycen (pracovní oblast v lineární části charakteristiky).



Obr. 2 - Náhradní schéma transformátoru s železným jádrem

Jelikož skutečný transformátor vykazuje při své činnosti **činné ztráty** ($\Delta P > 0$) a má také **rozptyl** kolem vinutí ($\Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2} > 0$), vyjadřujeme v náhradním schématu ztráty v primárním a sekundárním vinutí pomocí nenulových rezistorů R_1 a R_2 a činné ztráty v magnetickém obvodu fiktivním rezistorem R_{Fe} . Rozptylové toky $\Phi_{\sigma 1}$ a $\Phi_{\sigma 2}$ uzavírající se vzduchem, nahrazujeme **rozptylovými reaktancemi** $jX_{\sigma 1}$ a $jX_{\sigma 2}$. **Hlavní (pracovní) magnetický tok** Φ_h vyjádříme **hlavní reaktancí** jX_h tzv. **magnetizační**. R_2 , I_2 , $jX_{\sigma'}$, U_2' jsou veličiny přepočítané pomocí převodu na primární vztaznou stranu z důvodů kvantifikačního srovnání hodnot.

Popisem náhradního schématu skutečného transformátoru pomocí Kirchhoffových zákonů, získáme základní rovnice, které charakterizují transformátor ve všech provozních stavech.

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_{ind} + (R_1 + jX_{\sigma 1}) \cdot \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2' &= \underline{U}_{ind} + (R_2' + jX_{\sigma 2}') \cdot \underline{I}_2' \\ \underline{I}_1 + \underline{I}_2' &= \underline{I}_{10} = \underline{I}_{\mu} + \underline{I}_{Fe} \end{aligned}$$

8.1.2 Princip činnosti skutečného transformátoru

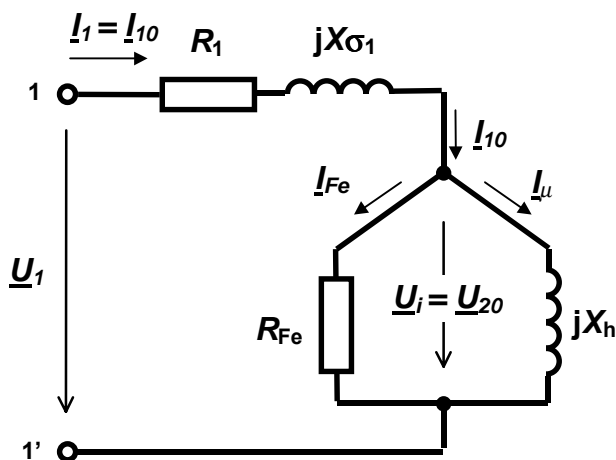
Připojením zdroje harmonického napětí U_1 na primární vinutí (vinutí napájené ze zdroje napětí), jím začne protékat harmonický proud I_1 . Ten vytvoří střídavý hlavní magnetický tok Φ_h , který se uzavírá jádrem a rozptylové toky $\Phi_{\sigma 1}$ a $\Phi_{\sigma 2}$, které se uzavírají vzduchem.

Střídavou změnou hlavního magnetického toku $d\Phi/dt$ se indukuje do jednoho závitů vinutí (primárního i sekundárního) indukované napětí u_{ind} a v jednotlivých vinutích pak indukovaná napětí o velikostech úměrných počtům závitů N_1, N_2 jednotlivých vinutí, viz. kapitola 1.1.

Připojením zátěžné impedance Z_2 na svorky sekundárního vinutí (z tohoto vinutí odebírán výkon do zátěže), začne jí a jím procházet sekundární proud I_2 a do zátěže je dodáván výkon P_2 .

8.2. Transformátor naprázdno

Je to takový provozní stav, kdy primární vinutí je připojeno k jmenovitému napětí U_{1N} a svorky sekundárního vinutí jsou rozpojeny ($Z_2 = \infty \Rightarrow I_2 = 0$), transformátor nedodává výkon ($P_2 = 0$).



Obr. 3 - náhradní schéma stavu naprázdno

Rovnice mají tvar

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{\text{ind}} + (R_1 + jX_{\sigma 1}) \cdot \underline{I}_{10}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_{\text{ind}} = \underline{U}_{20}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} = \underline{I}_{\mu} + \underline{I}_{\text{Fe}}$$

Příkon, který transformátor odebírá ze sítě, slouží ke krytí ztrát naprázdno.

$$\Delta P_{10} = \Delta P_{\text{Fe}} + R_1 \cdot I_{10}^2 \quad (\text{W})$$

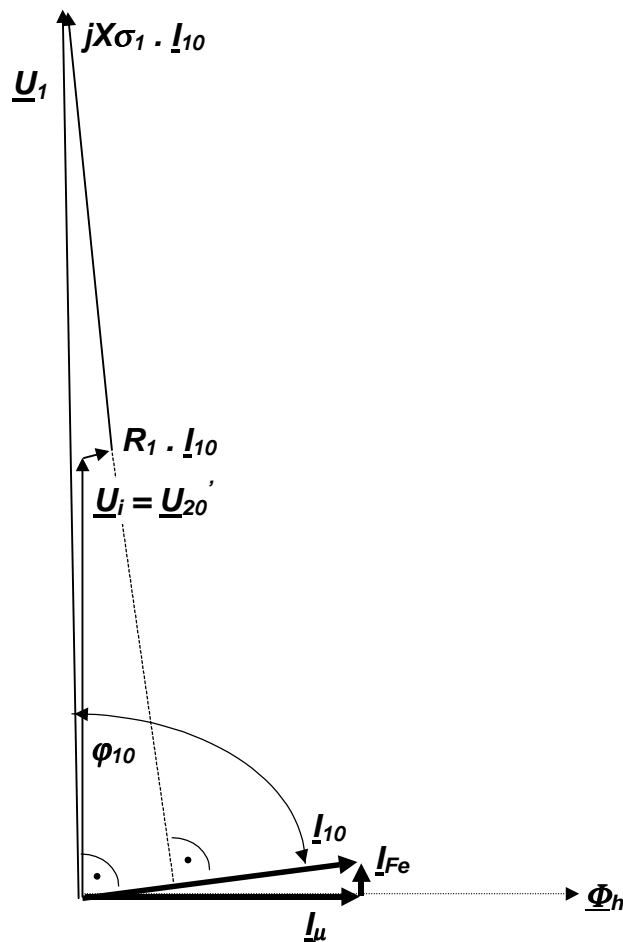
Ztráty v primárním vinutí jsou díky malé velikosti proudu naprázdno I_{10} malé (cca 2 až 10 % I_{1N}) a v praktických výpočtech je zanedbáváme a uvažujeme, že

$$\Delta P_{10} = \Delta P_{\text{Fe}} \quad (\text{W})$$

Měřením napětí při stavu naprázdno se určuje převod.

$$K = \frac{U_1}{U_{20}} \quad (1)$$

Fázor proudu naprázdno \underline{I}_{10} tvoří *činný* proud $\underline{I}_{\text{Fe}}$ (přes fiktivní R_{Fe}) a *jalový* magnetizační proud \underline{I}_{μ} (přes jX_h).



Obr.4 - Fázorový diagram stavu naprázdno

Úhel φ_{10} , který svírající fázory \underline{I}_{10} a \underline{U}_1 je **velký**, tzn. že,

$$\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_1 \cdot I_{10}} = \frac{I_{Fe}}{I_{10}} = 0,1 \text{ je nízký}$$

U skutečných transformátorů jsou velikosti $R_1, R_2', X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}'$ poměrně malé, naproti tomu hodnoty X_h a R_{Fe} jsou velké - fázorový diagram (obr.4) není v měřítku (ve skutečnosti $\underline{U}_1 \approx \underline{U}_{20}'$)

Pozn.

Nízký $\cos\varphi_{10}$ (cos úhlu mezi fázory \underline{U}_1 a \underline{I}_{10}) má *nepříznivý vliv* na napájecí síť. Transformátor odebírá většinu jalové energie k magnetování jádra. Proto je tento stav nežádoucí i přesto, že celkové ztráty jsou velmi malé. Transformátor se musí *odpojit* od sítě.

8.3. Transformátor nakrátko

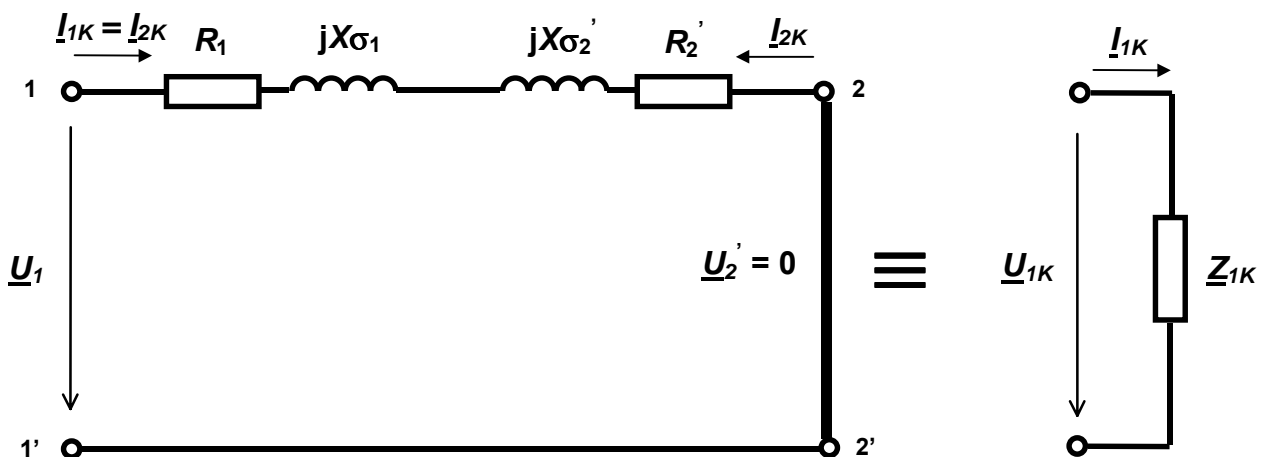
Je nejnepříznivější stav transformátoru.

Sekundární vinutí je spojeno nakrátko bezimpedanční spojkou ($Z_2 = 0 \Rightarrow U_2' = 0, P_2 = 0$).

X_h a R_{Fe} se vzhledem ke své podstatné velikosti oproti Z_2 neuplatní, viz. zjednodušené schéma pro stav nakrátko. Zkratový proud je omezen pouze impedancí obvodu - *impedancí nakrátko*.

Velikost impedance nakrátko Z_{1K} se určuje: $Z_{1K} = Z_{1N} \cdot u_{K\%} = (U_{1N} / I_{1N}) \cdot u_{K\%}$ (Ω)

a je tvořena: $Z_{1K} = R_{1K} + jX_{1K}$, kde $R_{1K} = R_1 + R_2'$ a $X_{1K} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}'$



Obr. 5 - Náhradní schéma při stavu nakrátko

Celková impedance nakrátko Z_{1K} je malá, neboť je tvořena malými hodnotami $R_1, R_2', X_{\sigma 1}$ a $X_{\sigma 2}'$, proto je proud I_{1K} mnohonásobně větší než I_{1N} (7 až 35 krát) a je pro transformátor velice nebezpečný.

Celý příkon nakrátko P_{1K} , se mění opět v činné ztráty ΔP , přičemž ztráty ΔP_{Fe} jsou zanedbatelné. Ztráty jsou hlavně dány Jouleovými ztrátami ve vinutí ΔP_{Cu} a přídavnými ztrátami ΔP_d .

Procentní napětí nakrátko $u_{K\%}$

Důležitý parametr, udávající zkratovou odolnost transformátorů.

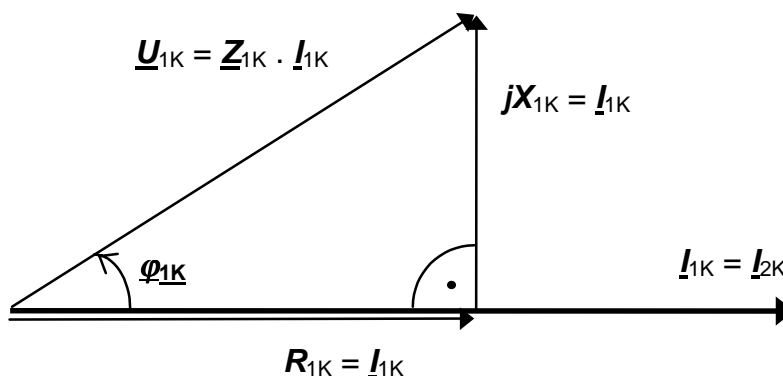
Při jeho zjišťování měřením se postupuje tak, že se sníží primární napětí U_1 na hodnotu U_{1K} , při níž proud je $I_{1K} = I_{1N}$ (transformátor se nepoškodí).

$$u_{K\%} = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \cdot 100 = \frac{Z_{1K}}{Z_{1N}} \cdot 100 \quad (\%)$$

Pomocí $u_{K\%}$ určíme velikost *skutečného ustáleného zkratového proudu*.

$$I_{1K} = \frac{I_{1N}}{u_{K\%}} \cdot 100 \quad (A)$$

Jouleovy ztráty rostou s druhou mocninou proudu I_{1K} , proto trvalý zkratový proud působí na transformátor *destruktivními účinky*, kterým zabráňujeme *rychlým odpojením* transformátoru od sítě.

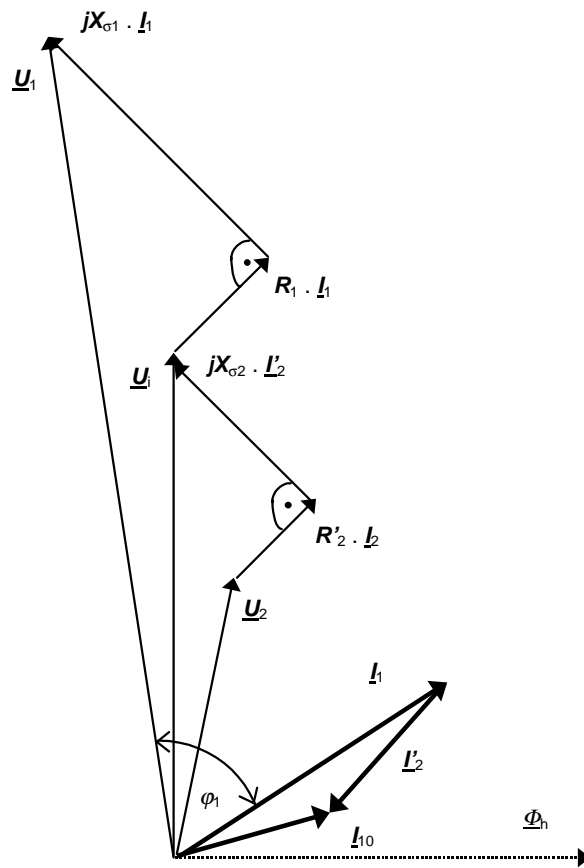


Obr. 6 Fázorový diagram stavu nakrátko

8.4. Transformátor při zatížení

Jsou teoreticky všechny ostatní stavy, vyjma stavu naprázdno a nakrátko.

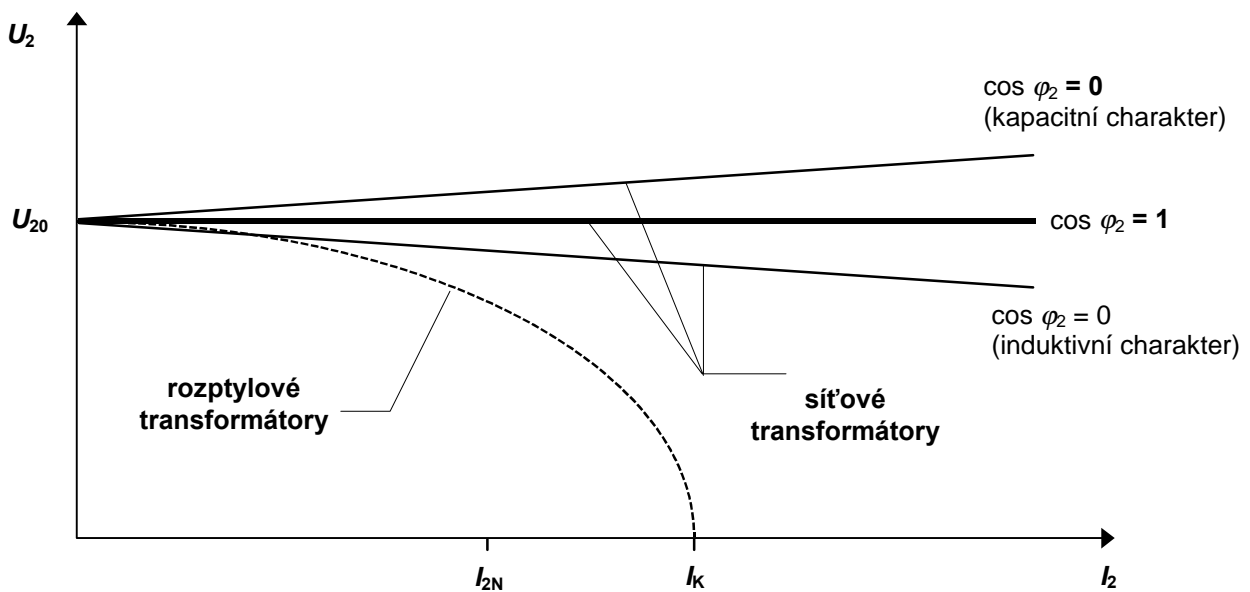
Vzájemné fázové poměry napětí a proudů ve fázorových diagramech závisí na *charakteru a velikosti* zatěžovací impedance Z_2 , ($0 < Z_2 < \infty$).



Obr. 7 - Fázorový diagram stavu při zatížení

Zatěžovací charakteristika

Je grafická závislost $U_2 = f(I_2)$ při $\cos\varphi = \text{konst}$, a je velmi důležitá.



Obr.8 - Srovnání zatěžovacích charakteristik rozptylových a síťových transformátorů.

Tvrdoost charakteristiky závisí na $u_K\%$ a $\cos\varphi_K$.

Čárkovaně je zakreslena zatěžovací charakteristika rozptylového transformátoru, jako zdroje konstantního proudu, používaného pro obloukové svařování nebo k napájení výbojek. Proud I_K je pouze nepatrně vyšší než I_{2N} .

Účinnost transformátorů

Je jedním z nejdůležitějších parametrů elektrických strojů.

Udává se vztahem

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100 \quad (1, \text{ resp. } \%)$$

kde $\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}$ (W), $P_1 = U_{IN} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ (W)

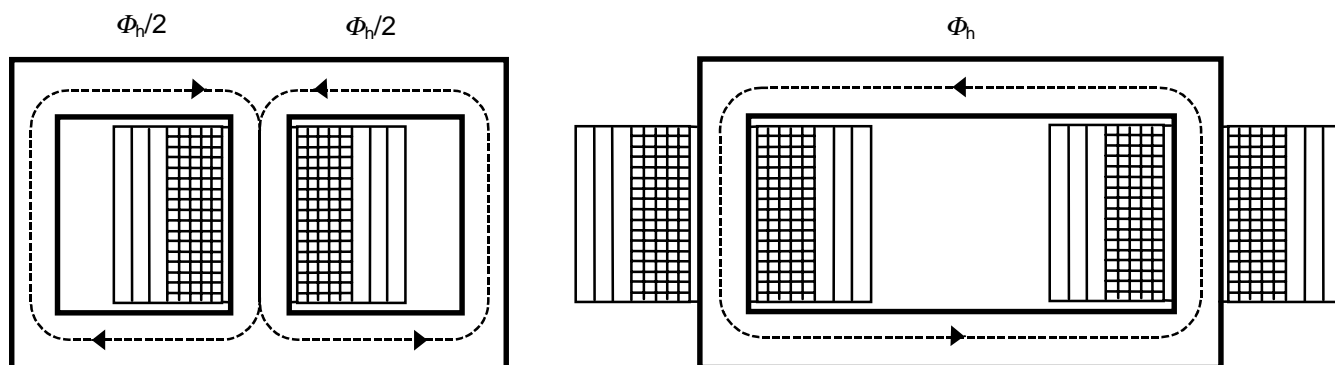
V technické praxi se dosahuje účinnosti **85 až 99 %** (transformátory větších výkonů mají i vyšší účinnost). Účinnost ale rychle klesá, blíží-li se zatížení stavu naprázdno.

8.5. Konstrukce a provedení transformátorů

Základními funkčními částmi jsou **magnetický obvod, vinutí a systém chlazení**.

Typ **jádrový** - vinutí obklopuje jádro.

Typ **plášťový** - jádro obklopuje vinutí.



Obr. 9 - Plášťové a jádrové magnetické uspořádání transformátoru

Jádro bývá složeno z *transformátorových plechů*, tloušťky 0,5 a 0,35 mm (pro $f = 50$ Hz), k zamezení ztrát vířivými proudy jsou plechy navzájem izolovány lakem nebo nevodivou oxidační vrstvou.

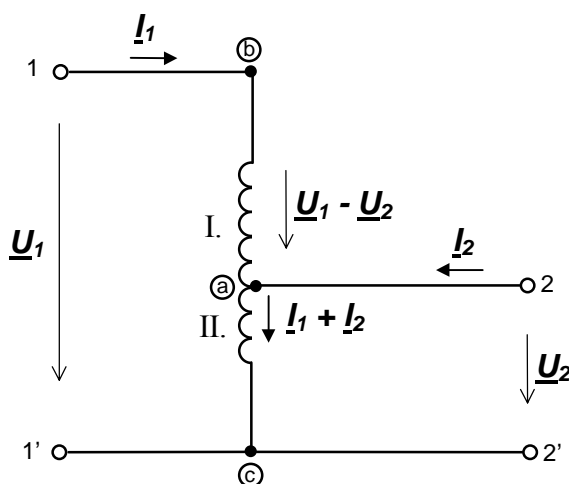
Ke snížení hysterezních ztrát se používají ocelové plechy s přídavkem 3,5 - 4,5% křemíku, válcované za studena.

Veškeré ztráty vznikající v transformátoru se mění v teplo, které je třeba odvádět - chladit. Chlazení se zpravidla provádí *vzduchem* nebo *olejem*, u větších a velkých výkonů s nucenou cirkulací. U nejnáročnějších aplikací pak elektronegativním plynem SF_6 (fluorid sírový), který má vynikající izolační a antioxidační účinky. K jeho použití je však nutné hermeticky zapouzdit chladicí systém.

V energetických soustavách se pro rozvod elektrické energie používají **trojfázové transformátory**, které bývají často z hlediska konstrukčního, bezpečnostního a ekonomického rozděleny do několik výkonových jednotek (např. místo jednoho transformátoru se použijí dva s polovičním výkonem, a při poruše jednoho z nich, druhý zajišťuje provoz). Transformátorové jednotky jsou zapojovány *paralelně*.

Autotransformátory

Mají pouze jedno vinutí, jehož část je společná pro primární i sekundární obvod. Oba obvody, na rozdíl od běžných transformátorů, jsou spojeny nejen magnetickou, ale i elektrickou vazbou. Proto se autotransformátor nesmí použít mezi vysokým a nízkým napětím, nebo nízkým a malým napětím. Používají se k řízení napětí jako snižovací nebo zvyšovací v jednofázovém i trojfázovém provedení. Účinky zkratových proudů jsou větší než u normálního transformátoru.



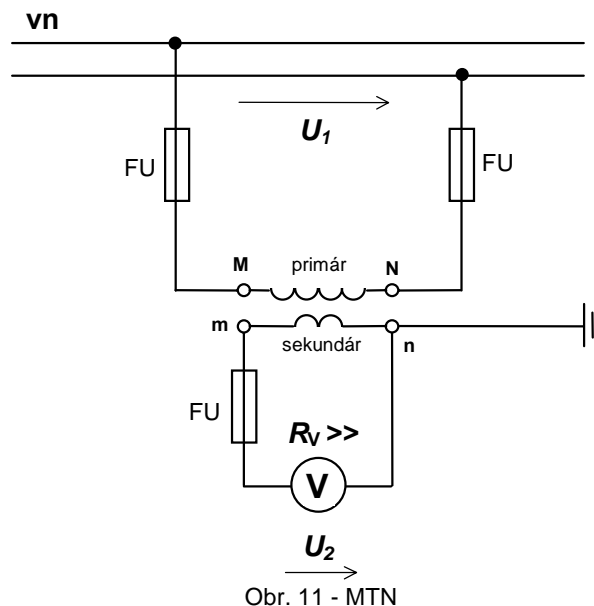
Obr.10 - Princip autotransformátoru

Řiditelné transformátory - tímto pojmem se označují ty transformátory, které jsou schopny měnit napětí po stupních nebo plynule, při zatížení.

Měřicí transformátory

Patří k příslušenství k měřicím přístrojům. Převádějí velká střídavá napětí a velké střídavé proudy na hodnoty, vhodné pro měřicí přístroje, při současném galvanickém oddělení měřicího přístroje od měřeného obvodu. Měřicí přístroje se do obvodu nezapojují přímo, ale přes MTN a MTP.

- **měřicí transformátor napětí MTN** - u něj je primární vinutí (velký počet závitů) paralelně připojeno k měřenému obvodu s vysokým napětím (nebo i jiným) a sekundární vinutí (malý počet závitů) k voltmetru s velkým vnitřním odporem R_V , aby MTN pracoval jako při stavu naprázdno.



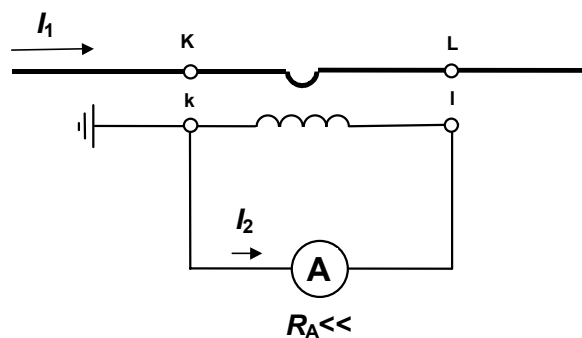
Pomocí MTN měřené napětí určíme :

$$U_1 = K_U \cdot U_2, \text{ kde}$$

$$K_U = \frac{N_1}{N_2}$$

Napětí na straně voltmetru U_2 bývá max. 100 V.

- **měřicí transformátor proudu MTP** - primární vinutí (malý počet závitů, zpravidla jeden) je zapojeno do série s měřeným vysokoproudovým obvodem a sekundární vinutí (velký počet závitů) je připojeno k ampérmetru s co nejmenším vnitřním odporem R_A , aby MTP pracoval ve stavu nakrátko.



$$I_2 = K_I \cdot I_1, \text{ kde } K = \frac{N_2}{N_1}$$

Proud ampérmetrem I_2 je 5, resp. 1A.

MTP mohou mít několik výstupů i pro jistící přístroje.

MTP bývá doplněn zkratovačem, neboť se výstupní svorky nesmí nikdy rozpojit !

MTN a MTP lze použít i při měření velého činného výkonu wattmetrem, MTN v napěťovém a MTP v proudovém obvodu wattmetru. Změřený činný výkon se pak určí :

$$P_1 = K_U \cdot K_I \cdot P_2 \quad (\text{W})$$

8.6. Speciální transformátory

Kromě transformátorů s popsanými vlastnostmi se konstruuji i takové transformátory, které mají odlišné vlastnosti.

Pecní

Slouží k vytápění tavicích, žihacích, kalicích, smaltovacích a sušících pecí.

- Dělíme je na
- a) *odporové* - topné odporové články jsou připojeny na napětí sekundárního vinutí, které se dá řídit
 - b) *obloukové* - transformují vysoké napětí na nízké o velikosti desítek voltů, potřebné k zapálení a k hoření elektrického oblouku. Na straně nízkého napětí jsou proudy až statisíců ampér, proto se řízení napětí provádí na primární straně
 - c) *indukční* - sekundárním vinutím je tekutý prstenec zahříváné látky - kovu. Primární vinutí je podobné jako u běžného transformátoru. Pro menší ohříváné předměty se používají frevence 2 - 10 kHz

Svařovací transformátory

Pro *obloukové svařování* se používá tzv. *rozptylový transformátor* s uměle zvětšeným rozptylem pomocí jader vložených do rozptylových drah. K zapálení oblouku je třeba sekundární napětí 80V až 100V a pro hoření jen 20V až 30V. Transformátor se tomu musí rychle přizpůsobit, přičemž se nesmí příliš měnit svařovací proud. Zvětšeným rozptylen vzroste reaktanční úbytek, výstupní napětí klesne a proud se jen málo změní viz.obr.8.

Odporové svařování na tupo, bodové nebo švové spočívá v tom, že na svařované místo působíme krátkodobě zkratovým proudem 1kA až 100kA. K dosažení těchto vysokých proudů (i když krátkodobých) je nutná co nejmenší reaktance transformátoru i přívodů. Na sekundární straně bývá zpravidla pouze jeden závit z mědi. Velikost svařovacího proudu se mění přepínáním odboček na primární straně.