

TRANSFORMÁTORY

Určeno pro studenty bakalářských studijních programů
na FBI

- 1. Princip činnosti ideálního transformátoru**
- 2. Princip činnosti skutečného transformátoru**
- 3. Pracovní stavy transformátoru**
 - Transformátor naprázdno
 - Transformátor nakrátko
 - Transformátor při zatížení
- 4. Konstrukce a provedení transformátorů**
- 5. Autotransformátory**
- 6. Měřicí transformátory**
- 7. Speciální transformátory**

říjen 2005

doc. ing. Václav Vrána

definice:

Transformátory jsou elektrické netočivé stroje, které umožňují změnu velikosti (transformaci) střídavého napětí při konstantním kmitočtu

Podle počtu fází je rozdělujeme na

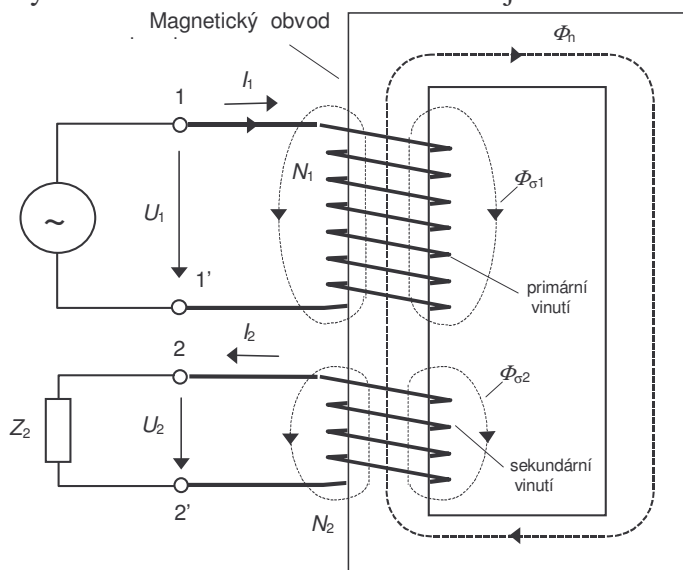
jednofázové

a

trojfázové

1. Princip činnosti ideálního transformátoru

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 obou 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 **indukovaná napětí U_{ind}** , závislé na velikosti kmitočtu primárního napětí f a

magnetického toku Φ_m .

$$U_{ind1} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot N_1,$$

$$U_{ind2} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot N_2$$

kde N_1, N_2 počty závitů primárního (1) a sekundárního (2) vinutí
 Φ_m maximální hodnota střídavého magnetického toku

Poměr indukovaných napětí je převod transformátoru K .

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

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

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

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

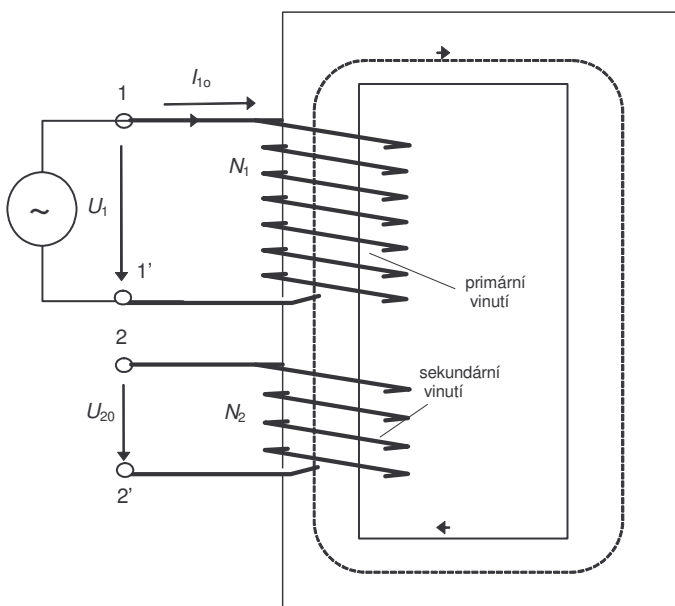
Ideální transformátor je charakterizován jediným parametrem - převodem K .

2. Princip činnosti skutečného transformátoru

Skutečný transformátor 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). Připojením napětí U_1 na primární vinutí jím začne protékat proud I_1 , jehož magnetizační složka 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. Časovou změnou hlavního magnetického toku se indukuje do závitů nutí (primárního i sekundárního) indukované napětí $u_{ind} \approx d\Phi/dt$ a jehož velikost je přímo úměrná počtům závitů N_1, N_2 jednotlivých vinutí, viz. kapitola.1. Připojením zátěžné impedance Z_2 na svorky sekundárního vinutí (2-2') začne sekundárním obvodem protékat proud I_2 a do zátěže je dodáván výkon P_2 . Skutečný transformátor vykazuje při své činnosti činné ztráty ($\Delta P > 0$) a má také rozptyl kolem vinutí ($\Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2} > 0$).

3. Pracovní stavy transformátoru

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 ($P_2 = 0$).

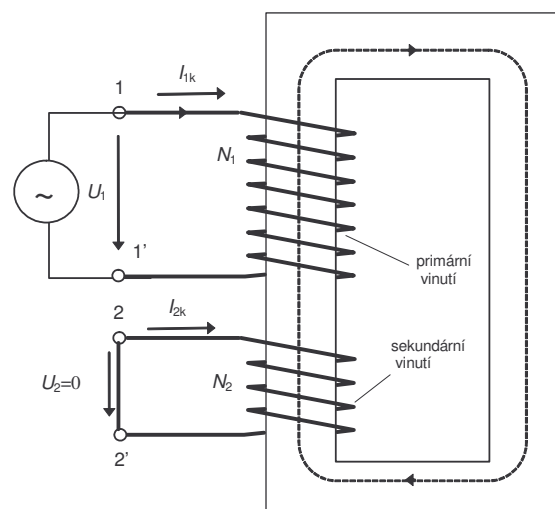
$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10}$$

Příkon, který transformátor odebírá ze sítě, slouží ke krytí ztrát naprázdno, které jsou v železném jádře a ve vinutí.

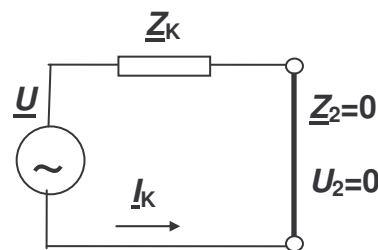
Měřením napětí při stavu naprázdno se určuje převod transformátoru

$$K = \frac{U_1}{U_{20}}$$

Transformátor nakrátko



Sekundární vinutí je spojeno nakrátko bezimpedanční spojkou ($Z_2 = 0 \Rightarrow U_2 = 0$). Zkratový proud je omezen pouze impedancí obvodu - *impedancí nakrátko*.



Obr, Náhradní schéma

Velikost impedance nakrátko Z_K „:

$$Z_K = Z_N \cdot u_K = \frac{U_N}{I_N} \cdot u_K \quad (\Omega)$$

a je tvořena: $Z_K = \sum R + j \cdot \sum X_o = R_1 + R_2 \cdot K^2 + j(X_{o1} + X_{o2} \cdot K^2)$

Poznámka: Parametry sekundárního vinutí se musí přepočítat na primární stranu (na stejný počet závitů), což se provádí pomocí napěťového převodu transformátoru K .

Hodnota impedance nakrátko Z_K je malá, neboť je tvořena malými hodnotami parametrů vinutí R_1, R_2, X_{o1} a X_{o2} . Proud I_K je mnohonásobně větší než I_{IN} (7 až 35 krát) a je pro transformátor velice nebezpečný.

Celý odebíraný příkon nakrátko P_{1K} , se mění v činné ztráty ΔP (Jouleovy ztráty ve vinutí), přičemž ztráty v železe jsou zanedbatelné.

Je to nejnepríznivější stav transformátoru !!

Poměrné napětí nakrátko $u_K, u_{K\%}$

Při jeho zjišťování měřením se postupuje tak, že při stavu transformátoru nakrátko se sníží primární napětí U na hodnotu U_K , při níž proud odebíraný ze sítě má hodnotu $I_K = I_N$ (transformátor se nepoškodí).

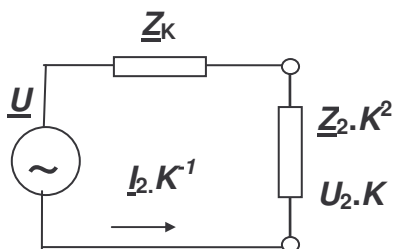
$$u_K = \frac{U_K}{U_N} = \frac{Z_K \cdot I_N}{Z_N \cdot I_N} = \frac{Z_K}{Z_N} \quad (-); \quad u_{K\%} = \frac{U_K}{U_N} \cdot 100 = \frac{Z_K}{Z_N} \cdot 100 \quad (\%)$$

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

$$I_K = \frac{I_N}{u_{K\%}} \cdot 100 \quad (A)$$

Jouleovy ztráty rostou s druhou mocninou proudu, proto trvalý zkratový proud působí na transformátor *destruktivními účinky*, kterým zabraňujeme *rychlým odpojením* transformátoru od sítě.

Transformátor při zatížení



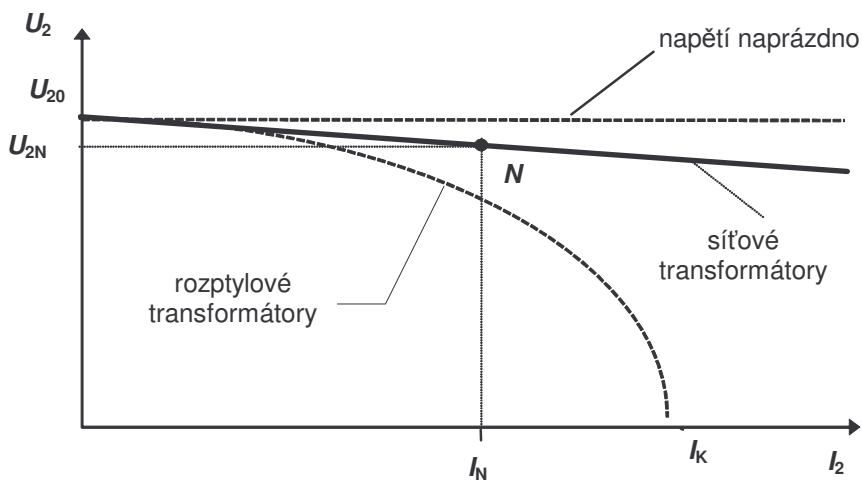
Obr, Zjednodušené náhradní schéma

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

Vzájemné fázové poměry napětí a proudů lze zobrazit v tzv. fázorových diagramech a přibližně závisí na *charakteru* a *velikosti* zatěžovací impedance Z_2 , ($0 < Z_2 < \infty$) a parametrech R a X obou vinutí.

Zatěžovací charakteristika transformátoru

Je grafická závislost $U_2 = f(I_2)$ při $\cos \varphi = \text{konst}$, a je velmi důležitá a udává velikost vnitřního úbytku napětí na transformátoru a velikost zkratového proudu na sekundární straně.



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

Tvrdost (sklon) charakteristiky závisí na velikosti napětí (impedance) nakrátko $u_{K\%}$ a účinníku $\cos \varphi_2$.

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

Účinnost transformátorů

Udává se vztahem

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

kde $\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}$ (W) ztráty v transformátoru

$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ (W) činný příkon transformátoru

$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$ (W) činný výkon transformátoru

V technické praxi se dosahuje u běžných transformátorů účinnosti 85 až 99 % (transformátory větších výkonů mají vyšší účinnost). Účinnost je závislá na velikosti zatížení a klesá úměrně s velikostí zatížení.

4. Konstrukce a provedení transformátorů

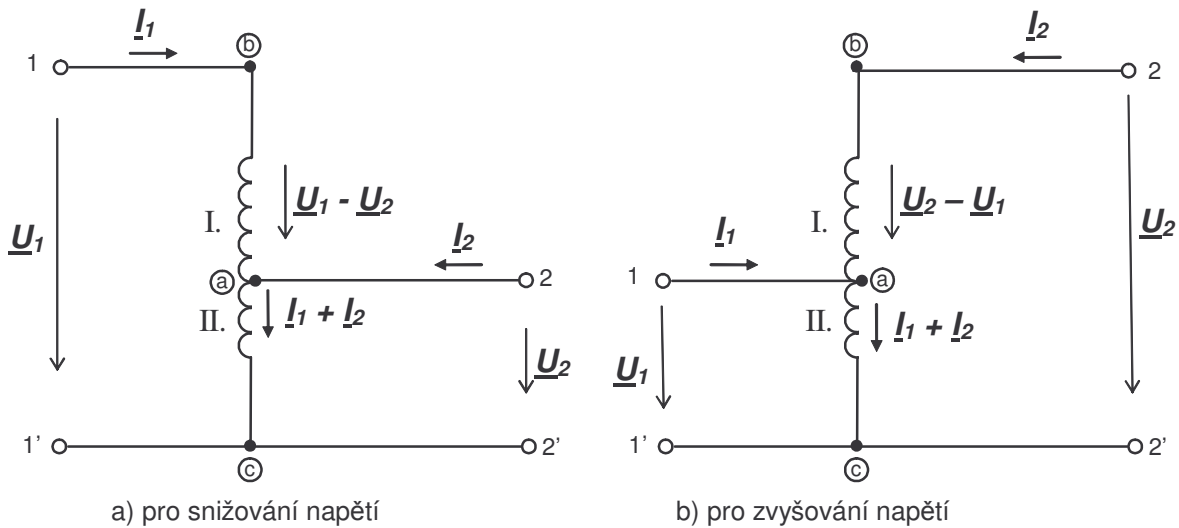
Základními funkčními částmi jsou **magnetický obvod (jádro)**, **vinutí** a **systém chlazení**.

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.

Chlazení transformátorů se zpravidla provádí *vzduchem* nebo *olejem*, u větších a velkých výkonů s nucenou cirkulací.

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 často zapojovány *paralelně*, což je podmíněno stejnými parametry (napěťový převod, napětí nakrátko, výkon).

5. Autotransformátory



Obr.9 - Zapojení autotransformátoru

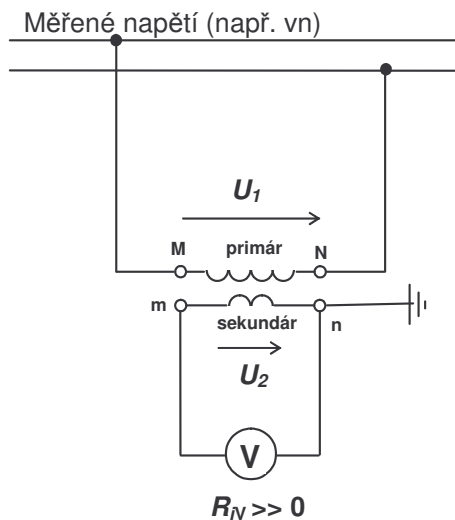
Mají pouze jedno vinutí, jehož část je společná pro primární i sekundární obvod. Oba obvody, na rozdíl od běžných transformátorů, jsou spojeny nejen magnetickou, ale i elektrickou vazbou. Proto se autotransformátor nesmí použít k oddělení obvodu mezi vysokým a nízkým napětím, nebo nízkým a malým napětím (při přerušení vinutí na sekundární straně je na výstupu primární napětí)

Používají se často jako regulační (svorka 2 je připojena pomocí kluzného kontaktu na obnažené vinutí) k řízení velikosti napětí a to obvykle jako snižovací (obr. 9a) nebo i zvyšovací (obr. 9b) v jednofázovém i trojfázovém provedení.

6. Měřicí (přístrojové) 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 obvodu měřícího přístroje od měřeného obvodu. Měřicí přístroje se do obvodu nezapojují přímo, ale přes měřicí transformátory

- **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 :

$$U_1 = K \cdot U_2$$

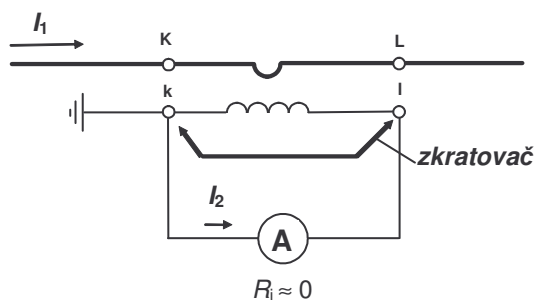
$$K = \frac{N_1}{N_2}$$

$$N_1 > N_2$$

Jmenovité sekundární napětí transformátoru (na straně voltmetru) U_2 bývá obvykle 100 V.

Obr. 10 - MTN

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



Obr.11 Zapojení MTP

$$I_2 = K \cdot I_1$$

$$I_1 = \frac{I_2}{K}$$

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

$$N_2 > N_1$$

Jmenovitý sekundární proud transformátoru (na straně ampérmetru) 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 pro měření činného výkonu wattmetrem, MTN v napěťovém a MTP v proudovém obvodu wattmetru. Změřený činný výkon se pak určí :

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

7. Speciální transformátory

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

Pecní transformátory slouží k vytápění tavících, žíhacích, kalčích, smaltovacích a sušících pecí.

Dělíme je na a) **odporové** - topné odporové články jsou připojeny na řízené napětí sekundárního vinutí,

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 kmitočty $2 \div 10$ kHz

Svařovací transformátory jsou určeny ke svařování kovů. Pro **obloukové svařování** se používá tzv. **rozptylový transformátor** s uměle zvětšeným rozptylem pomocí jader vložených do rozptylových drah, nebo vzduchových mezer v magnetickém obvodu. K zapálení oblouku je třeba sekundární napětí 80 V až 100 V a pro hoření jen 20 V až 30 V. Transformátor se tomu musí rychle přizpůsobit, přičemž se nesmí příliš měnit svařovací proud. Zvětšeným rozptylem 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 1 kA až 100 kA. K dosažení těchto vysokých proudů (i když krátkodobých) je nutná co nejmenší reaktance transformátoru i přívodů. Na sekundární straně bývá zpravidla pouze jeden závit . Velikost svařovacího proudu se mění přepínáním odboček na primární straně.

Použitá literatura:

Stýskala V.: Transformátory - učební texty pro inženýrské studium , Ostrava 1998