

Princip činnosti transformátoru

Transformátor je netočivý elektrický stroj pracující na principu elektromagnetické indukce, přeměňující proud jednoho napětí na jiné při zachování kmitočtu. Každý transformátor se skládá ze vstupního vinutí (**primárního**) a nejméně jednoho výstupního vinutí (**sekundárního**) umístěných na společném magnetickém obvodu s nekonečně velkou magnetickou vodivostí (*ve skutečnosti je permeabilita μ materiálu konečná*).

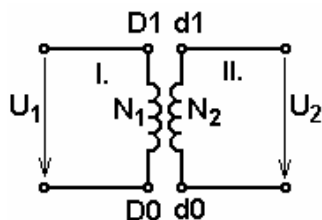
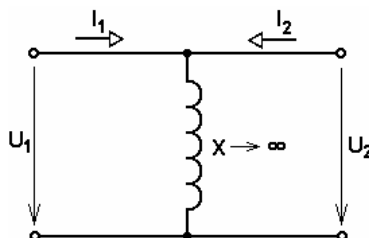
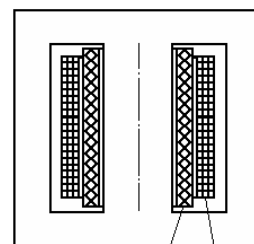


Schéma jednofázového transformátoru



Náhradní schéma ideálního transformátoru

1- vinutí nn, 2- vinutí vn
Jednofázový plášťový transformátor

Při popisu principu činnosti transformátoru vycházíme z jednofázového transformátoru se dvěma vinutími (cívkami)– vstupním (primárním o N_1 závitů) a výstupním (sekundárním o N_2 závitů). U transformátorů pro vysoká napětí se vinutí s nižším napětím umísťuje blíže k jádru a s vyšším pak dále od jádra.

Připojením vstupního vinutí ke zdroji sinusového střídavého napětí U_1 se podle indukčního zákona ve výstupním vinutí indukuje napětí U_2 . Není-li transformátor zatížen neprotéká výstupním vinutím proud, mluvíme o tzv. stavu **naprázdno**. Proud procházející vstupním vinutím se skládá z proudu I_{Fe} kryjícího ztráty v železe ¹⁾ (I_{Fe} je fázi s vstupním napětím) a magnetizačního proudu I_μ sloužícího k vytvoření magnetizačního toku Φ zpožděnému o 90° - za napětím U_1 . Protože je magnetizační proud vybuzen proudem sinusového průběhu je i napětí indukované sinusového průběhu, jeho velikost v jednom závitě je dána indukčním zákonem:

$$u_{i1N} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Velikost výstupního napětí závisí na počtu závitů (zapojených v sérii) a rychlosti změny magnetizačního proudu.

Obecně pro N závitů pak platí :

$$u_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

pro primární vinutí s N_1 závitů platí:

$$u_{i1} = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

sekundární vinutí s N_2 závitů platí:

$$u_{i2} = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Velikost indukovaných napětí v jednotlivých vinutích (primární N_1 , sekundární N_2) je závislá na počtu závitů těchto vinutí:

$$u_{i1} = u_{i1N} N_1$$

$$u_{i2} = u_{i1N} N_2$$

kde: u_{i1N} - napětí indukované v jednom závitě

Indukované napětí primárního vinutí působí proti napětí zdroje. Při stavu naprázdno je indukované napětí U_{i1} téměř rovno napětí napájecímu U_1 . Rozdíl těchto napětí je velmi malý a proto transformátor odebírá velmi malý proud ($I = (U_1 - U_{i1})/Z$, kde Z je impedance transformátoru).

Indukovaná napětí jsou přímo úměrná na počtu závitů!

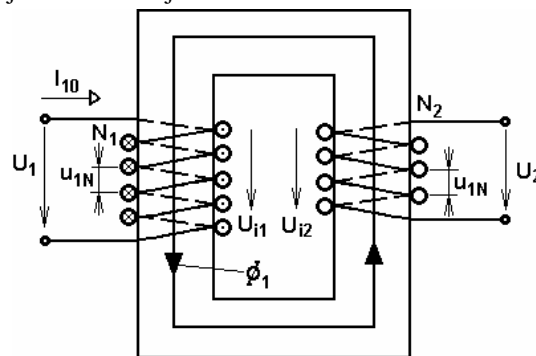
Při chodu naprázdno, kdy výstupním vinutím neprotéká žádný proud platí:

$$U_1 = U_{i1}$$

$$U_2 = U_{i2}$$

Poměr napětí mezi vstupním (primárním) vinutím a výstupním (sekundárním) vinutím je závislý na počtu závitů a nazývá se **převodem transformátoru – transformačním poměrem**:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



Transformátor při chodu naprázdno

¹⁾ Vířivé proudy vznikají změnou magnetického toku procházejícího jádrem magnetického obvodu. V rovině kolmé na směr magnetické indukce se indukuje v důsledku její změny napětí, protože je jádro magnetického obvodu vyrobeno z elektricky dobře vodivého materiálu prochází obvodem poměrně značný proud. Tento proud se mění na jaulovo teplo a zahřívá magnetický obvod. Aby došlo ke zvětšení elektrického odporu je jádro složeno ze značného množství tenkých plechů ($0,35 \div 0,5$ mm silných) legovaných křemíkem – zvyšujícím povrchový odpor plechů. Ztráty vířivými proudy dosahují hodnot $1,2 \div 1,4$ W.kg⁻¹ u plechů válcovaných za tepla a $0,6 \div 0,8$ W.kg⁻¹ u orientovaných plechů válcovaných za studena, oboustranně izolovaných lakem nebo keramickou izolací případně vodním sklem.

Matematickou úpravou $u_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ odvodíme pro okamžitou hodnotu indukovaného napětí:

$$u_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = N \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{\Phi_{\max} \cdot d \sin \omega t}{dt} = \omega \cdot N \cdot \Phi_{\max} \cdot \cos \omega t$$

kde : $\omega = 2\pi \cdot f$ $\cos \alpha = \sin(\alpha + \pi/2) \Rightarrow$ tok je zpožděn za napětím o 90°

Pro efektivní hodnotu indukovaného napětí platí:

$$U = \frac{u_{i\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max}$$

Pro efektivní hodnotu indukovaného napětí platí:

$$U = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max}$$

U ideálního (bez ztrátového) transformátoru se zdánlivý příkon S_1 rovná zdánlivému výkonu S_2 . Z rovnosti zdánlivých výkonů odvodíme vztah mezi napětími a proudy:

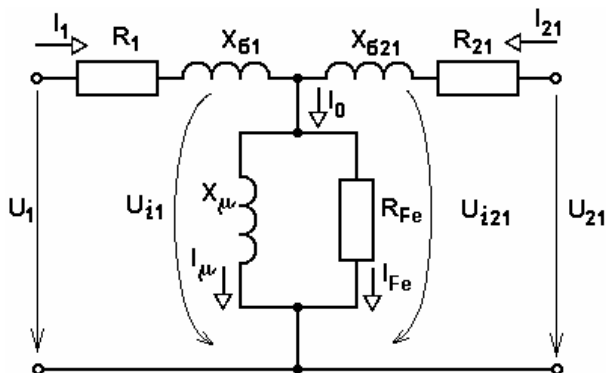
$$S_1 = U_1 \cdot I_1 \quad S_2 = U_2 \cdot I_2$$

$$S_1 = S_2 \quad U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = p$$

potom pro výstupní proud bude platit:

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{U_1}{U_2} = I_1 \cdot p$$

Při důsledném odvození transformačního poměru vycházíme z indukovaných napětí U_{i1} a U_{i2} . Transformátor můžeme nahradit náhradním schématem, pomocí kterého můžeme sledovat chování transformátoru v různých provozních stavech.



Náhradní schéma transformátoru

- R_1 – činný odpor vstupního vinutí;
- $X_{1\sigma}$ – rozptylová reaktance primárního vinutí
– představující rozptylový tok primárního vinutí;
- R_2 – činný odpor výstupního vinutí;
- R_{21} – činný odpor výstupního vinutí – přepočtený na vstupní stranu;
- $X_{2\sigma}$ – rozptylová reaktance sekundárního vinutí – představující rozptylový tok sekundárního vinutí;
- $X_{21\sigma}$ – rozptylová reaktance sekundárního vinutí – přepočtená na vstupní stranu;
- R_{Fe} – představuje odpor kryjící ztráty v železe;
- X_μ – magnetizační reaktance.

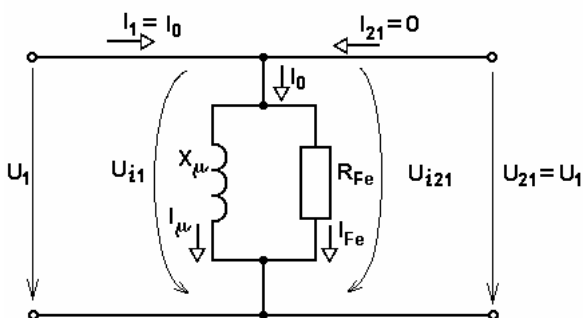
Při kreslení náhradních schémat a fázorových diagramů vycházíme důsledně z tzv. spotřebičové soustavy. Vstupní strana transformátoru je spotřebičem, naopak výstupní strana je pak pro spotřebiče zdrojem. Proto je vektor výstupního proudu v opačném směru než je vektor vstupního proudu.

Primární část transformátoru představuje z hlediska sítě spotřebič a sekundární (výstupní) část představuje zdroj.

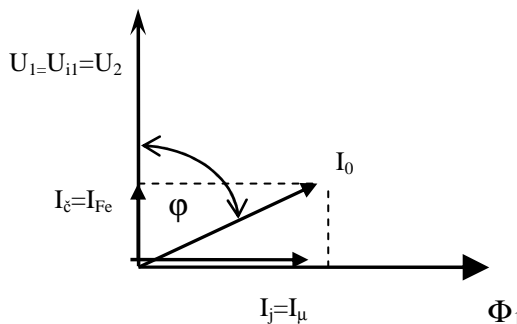
Při provozu na naprázdno prochází primárním vinutím pouze proud I_0 . Vzhledem k omezení ztrát v železe, při použití tenkých plechů s malými ztrátami, převažuje magnetizační složka (jalová) nad činnou a proto má transformátor malý účinník $\cos\phi$.

V okamžiku připojení nezátíženého transformátoru vznikne velký proudový náraz až 15 x větší než je jmenovitý proud a to v důsledku malé impedance transformátoru. Po několika periodách dojde k ustálení proudu na 3 – 10 % I_n .

U skutečných transformátorů (distribučních) je převod veliký, např. pro transformaci 22 000kV na 400 V $p = \frac{22000}{400} = 55$



Náhradní schéma transformátoru naprázdno



Fázorový diagram transformátoru naprázdno

Aby bylo možné kreslit fázory ve stejných rozměrech (pro velké převody je kreslení neproveditelné) používáme přepočet výstupního vinutí na vstup, proto zavádíme U'_{i2} :

$$U'_{i2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_{i2} = p \cdot U_{i2} = U_{i21}$$

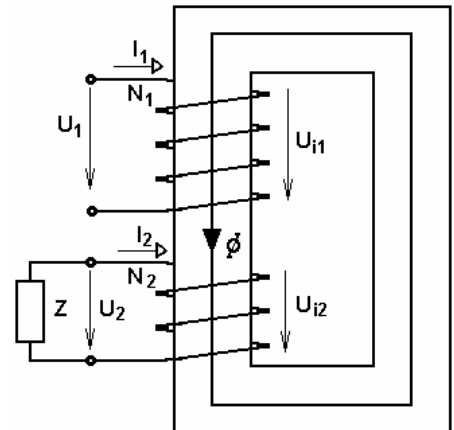
Stejným způsobem přepočteme ostatní parametry výstupu na vstup:

$$\begin{aligned} \text{přepočtený výstupní proud:} & I_{21} = \frac{I_2}{p} \\ \text{přepočtený výstupní odpor:} & R_{21} = R_2 \cdot p^2 \\ \text{přepočtená výstupní rozptylová reaktance:} & X_{21\sigma} = X_{2\sigma} \cdot p^2 \\ \text{přepočtená zátěž:} & Z_{21} = Z_2 \cdot p^2 \end{aligned}$$

Toto přepočtení značně zjednoduší řešení provozních stavů transformátoru pomocí fázorového diagramu.

Z výsledků měření naprázdno lze určit:

$$\begin{aligned} \text{odpor kryjící ztráty v železe } R_{Fe}: & R_{Fe} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} \\ \text{účinnost } \cos \varphi_0: & \cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_{10}} \\ \text{fázový posuv } \varphi_0: & \varphi_0 = \arccos \varphi_0 \\ \text{magnetizační proud } I_\mu: & I_\mu = I_{10} \cdot \sin \varphi_0 \\ \text{magnetizační reaktanci } X_\mu: & X_\mu = \frac{U_{10}}{I_\mu} \end{aligned}$$



Transformátor při zatížení

Zatížený transformátor

Zatížením výstupu transformátoru začne výstupním vinutím protékat proud I_2 , je velikost je dána zatěžovací impedancí Z . Proud I_2 vytvoří při průchodu sekundárním vinutím magnetický tok Φ_2 , který podle Lenzova pravidla působí proti toku Φ_1 vybuzenému primárním vinutím. Oba toky se vektorově sčítají a výsledkem jejich součtu je výsledný tok Φ . Při odlehčení transformátoru se zmenší výstupní proud I_2 , následkem je vyšší tok $\Phi_1 = \Phi_2 - \Phi$, který indukuje vyšší napětí U_{i1} . Zvýšení U_{i1} způsobí snížení proudu I_1 a tím dojde ke snížení výsledného toku Φ na původní hodnotu. Podle II. Kirchhoffova zákona působí napětí U_{i1} (napětí na magnetizační reaktanci) proti svorkovému napětí zdroje U_1 , kterým je transformátor napájen, zvýšení U_{i1} způsobí snížení proudu $I_1 \Rightarrow$ při každé změně zatížení se vstupní proud přizpůsobí změně zátěže a to tak, aby zvýšil magnetizační účinek výstupního proudu. Zjednodušeně lze říci, že velikost toku Φ je za normálního provozního stavu transformátoru vncena vstupním napětím U_1 – proudem protékajícím magnetizačním vinutím.

Pro stejnou hustotu proudu ve primárním i sekundárním vinutí platí:

$$J = \frac{I_1}{Sv_1} = \frac{I_2}{Sv_2} \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{Sv_2}{Sv_1} = p$$

Proudy a průřezy vinutí jsou v obráceném poměru k počtu závitů a napětí.

Jsou-li vinutí na jádru navinutá v souhlasném směru jsou i indukovaná napětí ve stejném směru. Jsou-li navinuta obráceně je U_{i1} ve směru opačném k U_{i2} .

U reálného transformátoru se část magnetického toku uzavírá mimo jádro a tím i mimo vinutí cívek, vzduchem nebo přes nádobu olejového transformátoru. Tento tok nazýváme **rozptylový** a pro účely popisu chování transformátoru uvažujeme, že je vytvořen rozptylovou reaktancí vinutí X_σ .

Současně mají vinutí transformátoru určitý odpor R , na němž dochází k úbytku napětí $\Delta U_R = R \cdot I$ a k tepelným ztrátám $P = R \cdot I^2$.

K úbytkům napětí dochází také na rozptylových reaktancích vinutí. Při přepočtu všech výstupních parametrů na vstup (U , I , R , X_σ) prochází oběma vinutími přibližně stejný proud a poměr $R_1 : R_{21} = 1 : 1$, stejně tak $X_{1\sigma} : X_{21\sigma} = 1 : 1$.

Celkový úbytek napětí na primárním vinutí je dán součtem fázorů

$$\overline{\Delta U_1} = \overline{U_{R1}} + \overline{U_{X1\sigma}}$$

a pro sekundární vinutí pak platí

$$\overline{\Delta U_{21}} = \overline{U_{R21}} + \overline{U_{X21\sigma}}$$

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta U_{21}}{p}$$

Vlivem magnetizačního proudu vytvářejícího magnetizační tok Φ je fázový posuv φ_2 na výstupu jiný než φ_1 na vstupu.

Při kreslení fázorových diagramů je nutné dodržet podmínku, že fázor proudu je za fázorem napětí zpožděn o úhel $\pi/2 = 90^\circ$ proti směru hodinových ručiček.

T-1-Princip činnosti transformátoru

Výsledný proud \mathbf{I}_1 je dán součtem proudů:

$$\bar{\mathbf{I}}_1 = \bar{\mathbf{I}}_2 + \bar{\mathbf{I}}_\mu + \bar{\mathbf{I}}_{Fe}$$

$$\bar{\mathbf{I}}_1 = \bar{\mathbf{I}}_2 + \bar{\mathbf{I}}_0$$

Pro konstantní napájecí napětí jsou i hodnoty proudů $\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_\mu + \mathbf{I}_{Fe}$ stálé.

Vnitřní indukované napětí U_{i1} je ovlivněno úbytkem na činném odporu R_1 a rozptylové reaktanci $X_{\sigma 1}$ primárního vinutí:

$$\bar{U}_{i1} = \bar{U}_1 - R_1 \cdot \bar{\mathbf{I}}_1 - X_{\sigma 1} \cdot \bar{\mathbf{I}}_1$$

Výstupní napětí U_{21} je ovlivněno úbytkem na činném odporu R_{21} a rozptylové reaktanci $X_{\sigma 21}$:

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_{i2} - R_{21} \cdot \bar{\mathbf{I}}_{21} - X_{\sigma 21} \cdot \bar{\mathbf{I}}_{21}$$

Pro úbytek napětí platí:

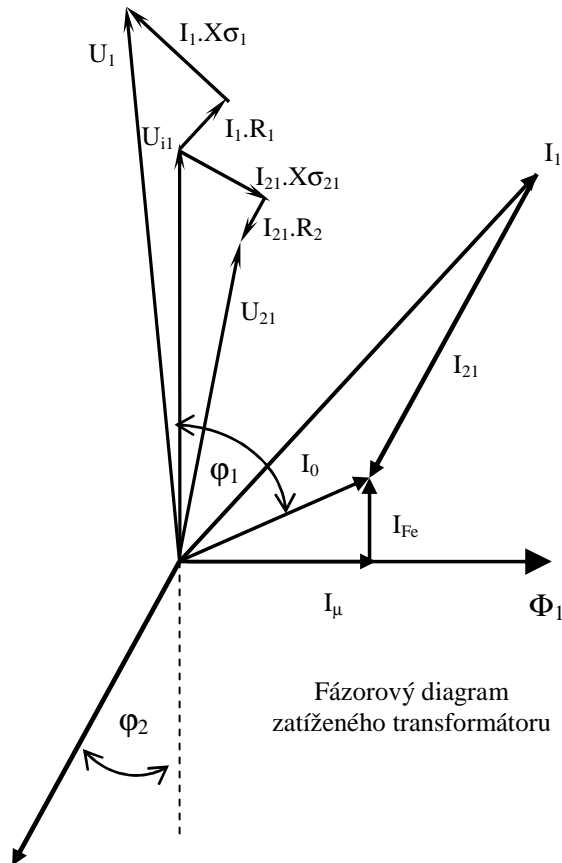
$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100$$

kde: U_{20} je napětí naprázdno

U_2 je napětí při zatížení

Výstupní napětí se u transformátorů do 5 kVA udává při jmenovité zátěži a pro větší výkon pak naprázdno.

Úbytek napětí dosahuje u běžných distribučních transformátorů (vn/nn) 4 až 5 % U_N , u menších transformátorů pro napájení zařízení malého napětí dosahuje hodnoty až 10% U_N .



Transformátor nakrátko

Na rozdíl od stavu naprázdno a při zatížení není stav nakrátko běžným provozním stavem transformátoru. Stav nakrátko se užívá pro určení vlastností transformátoru při zkratu a pro výpočet velikostí rozptylové reaktance. Pozn. Odporů vinutí skutečného transformátoru lze na rozdíl od rozptylové a reaktance dostupnými metodami poměrně přesně změřit.

Při stavu nakrátko jsou výstupní svorky zkratovány. Aby nedošlo hlavně k teplotnímu přetížení transformátoru je při měření vstupní proud omezen na hodnotu jmenovitého proudu I_{1N} . Pro napájení je použit regulovatelný zdroj střídavého napětí, kterým se nastaví napětí U_{1k} tak, aby proud nakrátko $I_k = I_{1N}$. Celé vstupní napětí se spotřebuje na krytí úbytků napětí na odporech a rozptylových reaktancích obou vinutí.

Z takto provedeného měření lze určit **napětí nakrátko** U_k [V]. Častěji se však udává tato hodnota v procentech napájecího napětí u_k :

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1N}} \cdot 100 \quad [\%, \text{ V, V}]$$

Ze změřených hodnot P_k, U_{1k}, I_{1k} lze vypočítat další důležité parametry transformátoru:

účinník: $\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k \cdot I_{1k}}$

činný odpor: $R = \frac{P_k}{I_{1k}^2}$

celkovou impedanci: $Z = \frac{U_k}{I_{1k}}$

rozptylovou reaktanci: $X_\sigma = Z_k \cdot \sin \varphi_k$
 $X_\sigma = \sqrt{Z_k^2 - R^2}$

Pro skučné transformátory přibližně platí:

$$R_1 \cong R_{21} = R / 2$$

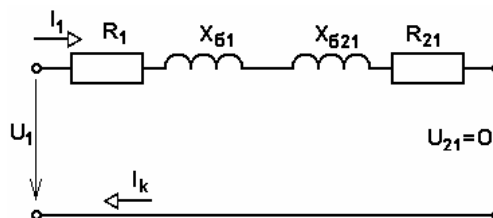
$$X_{1\sigma} \cong X_{21\sigma} = X / 2$$

$$R_1 : R_{21} : X_{1\sigma} : X_{21\sigma} : X_\mu : R_{Fe} = 1 : 1 : 2 : 2 : 1\ 000 : 10\ 000$$

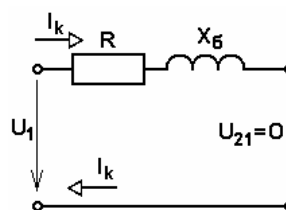
Z výsledků měření nakrátko lze určit **zkratový proud**:

$$I_{1k} = \frac{U_N}{Z} = \frac{u_k \cdot 100}{\frac{U_k}{I_N}} = \frac{100}{u_k} \cdot I_N$$

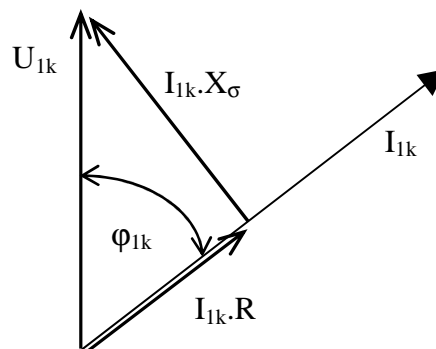
$$I_{1k} = \frac{100}{u_k} \cdot I_N$$



Náhradní schéma transformátoru nakrátko



Zjednodušené náhradní schéma transformátoru nakrátko






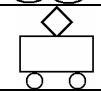
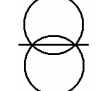
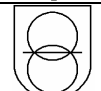
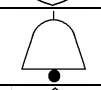

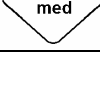
Fázorový diagram transformátoru nakrátko

Napětí nakrátko udává úbytek napětí při jmenovitém (štitkovém) zatížení transformátoru.

Typické hodnoty napětí nakrátko:

distribuční transformátory (vn/nn)	4 až 5 %	omezení kolísání výstupního napětí se změnou zátěže
malé transformátory nn/mn	až 10 %	omezení zkratových proudů
svářecí a pecové transformátory	10 až 15 %	omezení zkratových proudů
transformátory pro napájení vedení vvn a zvn	až 18 %	omezení zkratových proudů
zvonkové a zkratu odolné transformátory malých výkonů (4 až 12 VA)	20 až 35 %	omezení zkratových proudů

Značky pro běžně používané transformátory

Značka	Význam
	transformátor – všeobecná značka
	transformátor citlivý na zkrat
	transformátor odolný proti zkratu
	transformátor pro hračky
	oddělovací transformátor
	ochranný transformátor (bezpečnostní oddělovací)
	zvonkový transformátor
	autotransformátor
	lékařský transformátor