

11 Transformátory

11.1 Jednofázové transformátory

Jednofázové transformátory¹ přeměňují jednofázový střídavý proud na jednofázový střídavý proud téže frekvence a jiného napětí.

11.1.1 Konstrukce a princip

Transformátor se v principu skládá ze dvou cívek na společném jádře z magnetizovatelného (feromagnetického) materiálu, např. železa (transformátorové plechy) (**obr. 1**). Do vstupního (primárního) vinutí přichází střídavý proud a tím i elektrická energie. Tato energie je prostřednictvím střídavého magnetického toku v magnetickém jádře předávána dále. Protože magnetický tok periodicky mění svou velikost i směr s kmitočtem vstupního proudu, indukuje se v sekundárním vinutí napětí stejného kmitočtu.

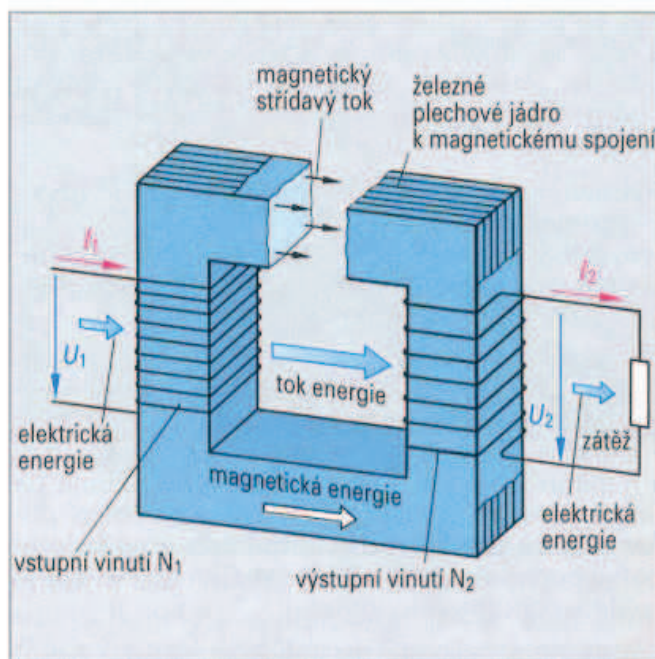
11.1.2 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno je napětí na výstupní straně (sekundárním vinutí) bez zátěže (bez odběru proudu). U transformátorů se jmenovitým výkonem přes 16 kVA je napětí naprázdno udáváno jako jmenovité napětí (**obr. 2**). Indukované napětí na výstupním (sekundárním) vinutí lze vypočíst podle **indukčního zákona** ($u_0 = -N \cdot \Delta\Phi/\Delta t$). Při sinusovém průběhu magnetického toku bude špičková hodnota indukovaného napětí:

$$\hat{u}_0 = \hat{\Phi} \cdot \omega \cdot N = \hat{B} \cdot A \cdot \omega \cdot N = 2\pi \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N$$

$$\Rightarrow U_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N$$

Špičková hodnota $\hat{u}_0$ napětí naprázdno závisí na špičkové hodnotě $\hat{B}$ magnetické indukce, na ploše průřezu A jádra, na kruhovém kmitočtu ω a na počtu závitů N . Z **hlavní rovnice pro transformátor** je vidět, že napětí naprázdno je lineárně závislé na počtu závitů sekundárního vinutí. Kvůli izolaci transformátorových plechů je průřez samotného železa menší než průřez jádra včetně izolace. Tato okolnost je při výpočtech zohledňována tzv. činitelem obsahu železa f_{Fe} , který bývá podle typu plechů v rozpětí 0,8 až 0,95.



Obr. 1 Konstrukce transformátoru

Hlavní rovnice pro transformátor:

při sinusovém napětí platí:

$$U_0 = 4,44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N$$

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4,44$$

U_0	napětí naprázdno
$\hat{B}$	magnetická indukce (špičková hodnota)
A	plocha průřezu železa (jádra)
f	kmitočet
N	počet závitů

výrobce					
Typ		výr. č.		rok výroby	2002
jm. výkon	kVA	20	typ	LT	kmitočet Hz
jm. napětí	V	6000	230	provoz	S1
jm. proud	A	3,44	87	připojení	II/O
zkrat. napětí	%	5		zkrat. proud kA	

Obr. 2 Údajový štítek jednofázového transformátoru

¹ z latinského transformare = přeměňovat, přetvářet

11.1.3 Převodní poměry napětí a proudu

Převod napětí a proudu

Pokus: Na U jádro z transformátorových plechů se spojkou instalujte dvě cívky s poměrem závitů 1 : 2, např. 600 a 1200 závitů. Cívku s 1200 závitů připojte na střídavý zdroj $\sim 50 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ a změřte napětí na cívce s 600 závitů.

Výstupní napětí je o něco menší než polovina vstupního napětí.

Protože tentýž magnetický tok prochází oběma cívkami, jsou cívky vzájemně magneticky vázané (**obr.**). V energetice se používají převážně transformátory s těsnou magnetickou vazbou (s jádrem bez vzduchové mezery). Pro ideální transformátor se 100%-ní magnetickou vazbou (bez rozptylového magnetického toku) platí:

$$\Phi_1 = \Phi_2 \Rightarrow B_1 \cdot A = B_2 \cdot A \Rightarrow \frac{U_1}{f \cdot N_1} = \frac{U_2}{f \cdot N_2} \Rightarrow \frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

Na nezatíženém transformátoru jsou napětí ve stejném poměru jako příslušné počty závitů na vinutích. Poměr vstupního napětí k výstupnímu se nazývá převodní poměr transformátoru.

Jsou-li obě vinutí transformátoru navinuta na jedné cívce, umísťuje se vinutí s menším počtem závitů jako vnější. U transformátoru s těsnou vazbou je přenos výkonu téměř beze ztrát, platí tedy:

$$S_1 = S_2 \Rightarrow U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

U zatíženého transformátoru jsou proudy v opačném poměru než počty závitů.

U reálného transformátoru je třeba počítat se ztrátami a výstupní proud je trochu menší než u transformátoru ideálního.

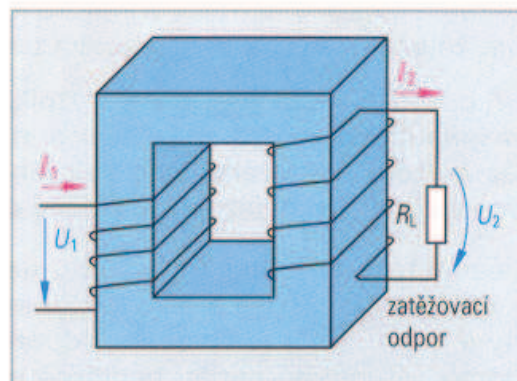
Převod impedance

Ve sdělovací technice a radiotechnice se transformátor často používá k impedancečnímu přizpůsobení (koncového stupně zesilovače k reproduktoru apod.). Ideálního přenosu výkonu je totiž dosaženo, je-li impedance zdroje přizpůsobena impedanci zátěže (činné složky jsou stejně velké a jalové složky se kompenzují). Jsou-li impedance rozdílné, lze výstupní impedanci budiče (zdroje, zesilovače, ...) přizpůsobit pomocí transformátoru.

Pro transformátor platí:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1}, \quad Z_2 = \frac{U_2}{I_2}, \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}$$

Transformátor převádí impedance se čtvercem poměru počtu závitů.



Obr. Napětí a proudy v transformátoru

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

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

- U_1 vstupní napětí (primární napětí)
- U_2 výstupní napětí (sekundární napětí)
- N_1 počet závitů vstupního vinutí
- N_2 počet závitů výstupního vinutí
- p převodní poměr transformátoru

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1}$$

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

- I_1 intenzita proudu ve vstupním vinutí
- I_2 intenzita proudu ve výstupním vinutí
- N_1 počet závitů vstupní cívky
- N_2 počet závitů výstupní cívky
- p převodní poměr transformátoru

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$$

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_2}{I_1}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} \approx \frac{N_1^2}{N_2^2} \Rightarrow$$

$$\frac{N_1}{N_2} \approx \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

$$p = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

- Z_1 vstupní impedance
- Z_2 výstupní impedance
- N_1 počet závitů primárního (vstupního) vinutí
- N_2 počet závitů sekundárního (výstupního) vinutí
- p převodní poměr transformátoru

11.1.4 Činnost naprázdno a zatížení

Činnost naprázdno transformátoru je činnost s buzením vstupu bez zátěže na výstupu. Pro budicí zdroj je induktivní zátěž.

Při buzení sinusovým napětím vzniká o 90° zpožděný sinusový **magnetizační proud** a ve fázi s ním **indukční tok** (obr. 1). Důsledkem střídavého magnetického toku je sinusové napětí ve výstupní cívce, fázově zpožděné o 90° za indukčním tokem.

Reálný transformátor odebírá i v nezatíženém stavu nepatrný výkon, který ohřívá jádro hysterezními ztrátami a vířivými proudy a vinutí úměrně činnému odporu. Proud I_0 naprázdno má oproti vstupnímu napětí nepatrně menší fázové posunutí než magnetizační proud I_m , neboť přemagnetizace železného jádra ztrátovým proudem I_v představuje ztrátový výkon (obr. 2). Účinník při běhu naprázdno je asi 0,2.

Nezatížený transformátor se chová jako cívka s velkou indukčností.

Transformátor může být zničen přivedením vyššího napětí poměrně rychle, protože vzhledem k téměř nasycenému jádru za běžného pracovního režimu začne při přesycení klesat impedance a proud velmi rychle narůstá, což vede k přehřátí vinutí a zničení izolace.

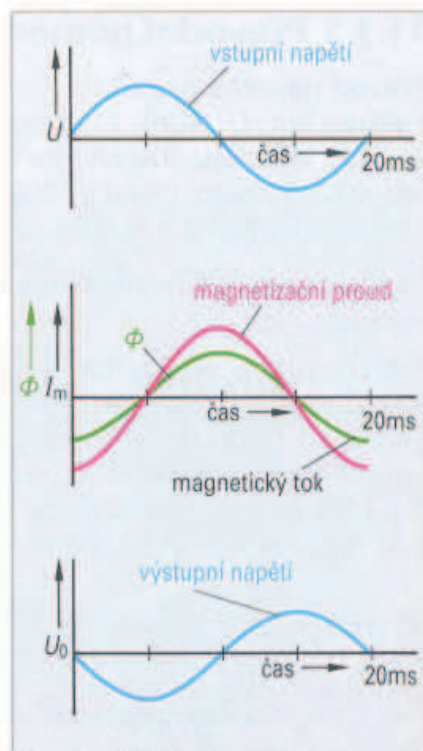
Pokus 1: Připojte jednofázový transformátor s odnímatelnou spojkou U-jádra přes ampérmetr na síťové napětí. Měřte proud naprázdno. Po odpojení zvětšete mezeru mezi spojkou a rameny U-jádra vložím tvrdého papíru v síle asi 0,5 mm a opakujte měření.

Při zvětšení vzduchové mezery (mezery v železe vyplněné izolantem) vzroste proud naprázdno.

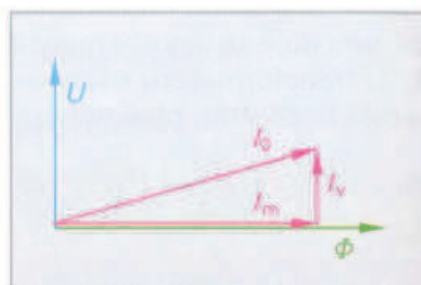
Pro dosažení určité magnetické indukce v magnetickém obvodu je pak zapotřebí větší magnetomotorická síla, protože při rozptýlu magnetického pole v oblasti vzduchové mezery se zmenší indukčnost cívky L , tedy i magnetický odpor X_L , vzroste tedy při stejném napětí proud. Proud naprázdno je závislý i na vlastnostech jádra transformátoru.

Proud naprázdno je způsoben jenom ztrátami. Kvůli chybějící zátěži je malý účinník (poměr činného a celkového zdánlivého výkonu). Aby byl proud naprázdno malý, zabraňuje se vzniku vzduchové mezery v jádru tak, že klademe E plechy střídavě proti sobě tak, aby střídavě překrývaly mezeru. E plechy nasouváme do kostry s navinutou cívkou po vyhnutí středu E plechu střídavě z jedné a druhé strany a doplňujeme je spojkou (obr. 3).

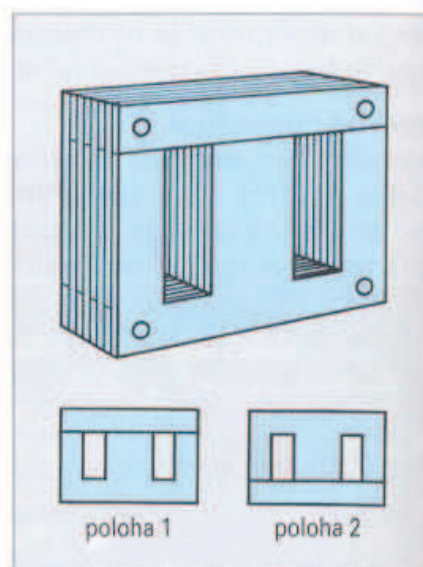
Činnost při zatížení je činnost při odběru proudu ze sekundárního (výstupního) vinutí transformátoru. Zatěžovací proud protékající vinutím sekundární cívky zeslabuje podle Lenzova pravidla příčinu svého vzniku, tj. střídavé magnetické pole. Vstupní proud proto narůstá, zatímco magnetický tok zůstává přibližně konstantní.



Obr. 1 Průběhy napětí a proudu na ideálním transformátoru



Obr. 2 Napětí a proudy nezatíženého transformátoru



Obr. 3 Střídavě kladené E-plechy pro eliminaci vzduchové mezery

Pokus 2: Připojte na síť transformátor. Připojte na vstup zesilovače s reproduktorem cívku s 300 závitů a držte ji v blízkosti transformátoru. Z reproduktoru je slyšet slabý síťový brum. Připojte na výstup transformátoru zátěž.

Brum z reproduktoru zesílí. Při nárůstu proudu v transformátoru zesílí celkový, tedy rozptýlený magnetický tok (obr. 1), který indukuje v blízké cívce napětí a toto střídavé napětí se síťovým kmitočtem způsobí po zesílení brumu v reproduktoru.

V nezatíženém transformátoru prochází téměř veškerý magnetický tok železným jádrem. Při zatížení vytváří proud ve výstupu (sekundární) vinutí opačně orientovaný (sekundární) magnetický tok, který oslabí primární magnetický tok vstupního vinutí. Vstupní proud pak stoupne tak, že magnetický tok se opět zvýší. Část magnetického toku neprochází jádrem, ale okolím a nazývá se **rozptylový magnetický tok** (obr. 1) a vytváří se kolem každé cívky s jádrem.

Část magnetického toku transformátoru, která prochází jen vstupní nebo jen výstupní cívkou transformátoru, se nazývá rozptylový tok.

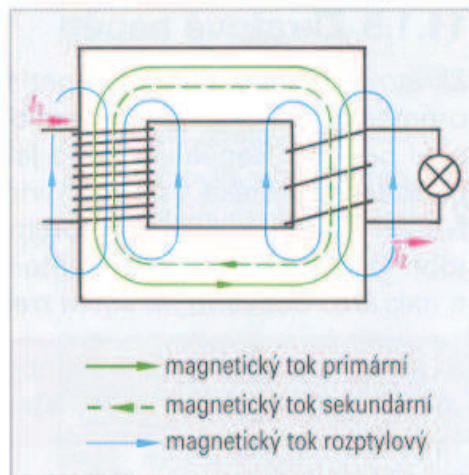
Kvůli rozptylovému toku transformátoru je nutné ve sdělovací technice jejich odstínění. Cívka, kterou prochází rozptylový tok, působí jako tlumivka. Transformátor se z pohledu svého výstupu chová jako zdroj střídavého napětí, jehož vnitřní odpor (impedance) je tvořen činným odporem a indukčností (obr. 2).

Pokus 3: Připojte jednofázový transformátor na síť a měřte výstupní napětí nejprve naprázdno a pak při narůstajícím zatěžovacím proudu a sice při zátěži činným odporem, indukčností a kapacitou.

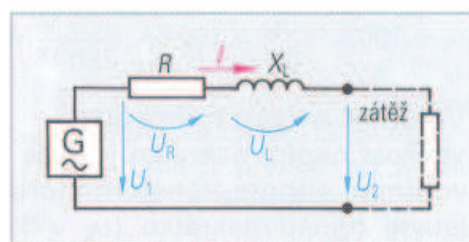
Výstupní napětí klesá při činné a při indukční zátěži, ale narůstá při kapacitní zátěži (obr. 3).

V náhradním zapojení (obr. 2) je transformátor zdrojem napětí naprázdno U_1 . Na vnitřním činném odporu R a na vnitřním jalovém indukčním odporu X_L vznikají při zatěžovacím proudu I úbytky napětí. Fázový posun mezi napětím naprázdno a zatěžovacím proudem je dán typem zátěže (obr. 2). Při indukční zátěži je pokles výstupního napětí U_2 větší než při činné zátěži. Při kapacitní zátěži výstupní napětí naroste (obr. 4), neboť výstupní indukčnost a zatěžovací kapacita spolu vytvoří sériový kmitavý obvod. Proto nesmějí být velké kondenzátory zapojovány samotné do sítě.

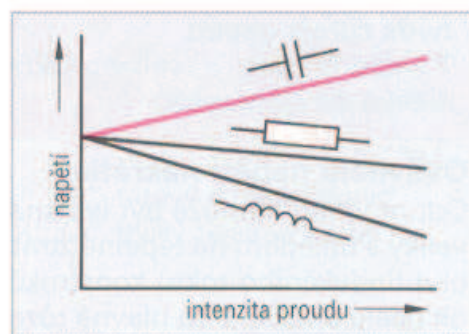
Výstupní napětí transformátoru je závislé na velikosti zatěžovacího proudu a na typu zátěže.



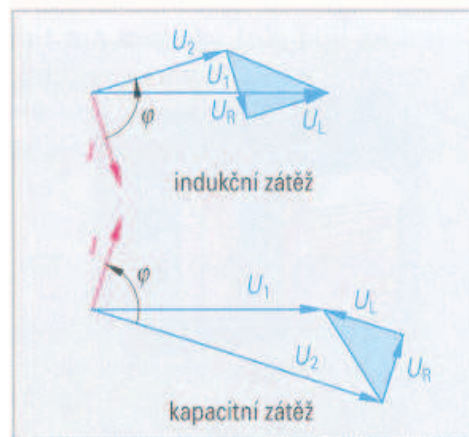
Obr. 1 Magnetické indukční čáry zatíženého transformátoru



Obr. 2 Zjednodušené náhradní zapojení transformátoru



Obr. 3 Průběh výstupního napětí v závislosti na typu zátěže



Obr. 4 Vektorové diagramy napětí při různých typech zátěží transformátoru