

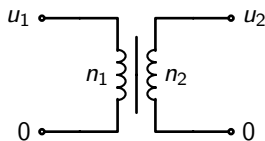
IEL — Transformátory, senzory (přehled)

Petr Peringer
peringer AT fit.vutbr.cz

Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta informačních technologií,
Božetěchova 2,
61266 Brno

(Verze: 23. října 2024)

Transformátor — základní pojmy



- Transformuje střídavé napětí u_1 na u_2 (a *galvanicky odděluje*).
- *Primární* vinutí má n_1 závitů izolovaného drátu.
- *Sekundární* vinutí má n_2 závitů.
- Převod transformátoru:

$$K = \frac{u_2}{u_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

- Jádru transformátoru (magnetický obvod): železo, ferit, vzduch, ...
- Pojmy: vzájemná indukčnost, rozptylová indukčnost, ...

Používá se i obrácená definice $\frac{n_1}{n_2}$ (*turn ratio*). Např. $a = 10$ pro poměr 10:1 ($n_1 = 10n_2$) odpovídá našemu $K = 0.1$.

Různá provedení transformátorů



Základní parametry reálného transformátoru

- Převod transformátoru $K = \frac{u_2}{u_1}$ (při zátěži se zmenší).
- Maximální výkon P přenesený transformátorem.
Poznámka: Přenášený výkon je omezen rozměry a provedením transformátoru, pro vyšší frekvence je transformátor menší.
- Účinnost: $\nu = P_2/P_1$ (typicky až kolem 90..99%).
Nezatížený transformátor prakticky nespotřebovává energii.
- Frekvenční charakteristika (podle provedení: 50Hz až stovky MHz).
- Provedení (podle jádra: toroidní, EI, C, M, ...)
- Elektrická pevnost izolace (důležité pro bezpečnost).
- Odolnost proti zkratu (malé transformátory, svářečky).
- Cena (vyšší pro více sekundárních vinutí).

Poznámka: brum 100Hz u síťových transformátorů na 50Hz

Transformátor a impedance

Pro ideální transformátor s odporovou zátěží platí $P_1 = P_2$ a potom:

$$u_1 i_1 = u_2 i_2$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{u_2}{u_1} = K = \frac{n_2}{n_1}$$

Pro vstupní impedanci Z_1 platí:

$$Z_1 = \frac{u_1}{i_1} = \frac{\frac{u_2}{K}}{K i_2} = \frac{1}{K^2} \frac{u_2}{i_2} = \frac{1}{K^2} * Z_2$$

Transformátor transformuje impedance úměrně čtverci poměru závitů:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = K^2$$

Aplikace: výstupní transformátory elektronkových audio-zesilovačů, ...

Poznámky: *skin effect*, *proximity effect*, vířivé proudy, ...

- Střídavý proud je veden převážně jen povrchem vodiče (*skin effect*), pro 50Hz jde asi o 10mm, pro kmitočet 50MHz jen $10\mu\text{m}$ [Horowitz: 1122]. (Stejnoseměrný proud je veden celým průřezem vodiče.)
- Pokud je těsně vedle sebe více vodičů, ovlivňují se navzájem a proudová hustota je nehomogenní (*proximity effect*).

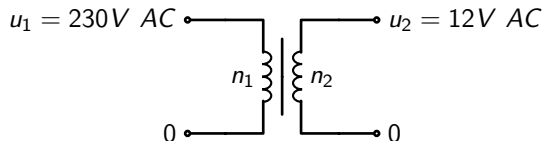
Tyto jevy spolu s kapacitou mezi závity a materiálem jádra omezují frekvenční rozsah transformátoru.

Jádro nesmí tvořit závity nakrátko (vznikají *vířivé proudy*) a proto: VF transformátory používají nevodivá (feritová nebo vzduchová) jádra, NF transformátory používají jádra z tenkých izolovaných železných plechů.

Poznámka: Pokud do některého vinutí teče stejnosměrný proud, hrozí *přesycení* jádra (viz hysterezní smyčka magnetických materiálů).

Transformátor — příklady

Síťový (50Hz) transformátor $230V \rightarrow 12V/1A$



Převod $K = u_2/u_1 = 12/230 = 0.052$

Pro výstupní proud $i_2 = 1A$ bude vstupní proud $i_1 = Ki_2 = 52mA$.

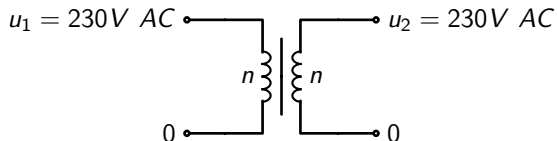
Poznámky:

Proud bude ve skutečnosti vyšší z důvodu ztrát ve vinutí a v magnetickém obvodu jádra.

Pro zátěž usměrňovačem s kondenzátorem je průběh proudu neharmonický a je třeba transformátor předimenzovat (např. pro 2x vyšší proud).

Transformátor — příklady

Oddělovací transformátor $230V \rightarrow 230V$.



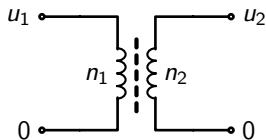
Používá se pro *galvanické oddělení* sekundárního obvodu od sítě.
Musí být dimenzován na maximální přenášený výkon.

Poznámka:

Autotransformátor – jen jedno vinutí s odbočkou, galvanicky neodděluje

Transformátor — příklady

Transformátor pro spínaný zdroj (frekvence 20kHz až 1MHz) musí mít speciální konstrukci vinutí a feritové jádro (zakresluje se čárkovaně).

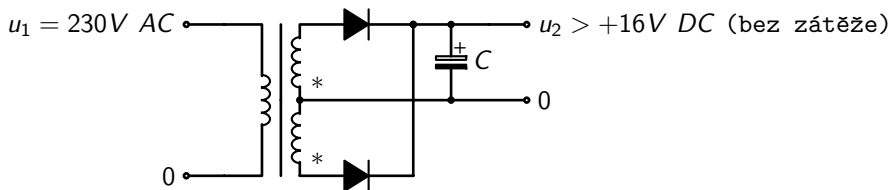


VF transformátory pro vysoké kmitočty ($> 50\text{MHz}$) mají často vzduchová jádra (nezakreslují se) pro minimalizaci ztrát.

Další zajímavé příklady:

- Oddělovací transformátory pro Ethernet (TP)
- Teslův transformátor: vzduchové jádro, rezonance

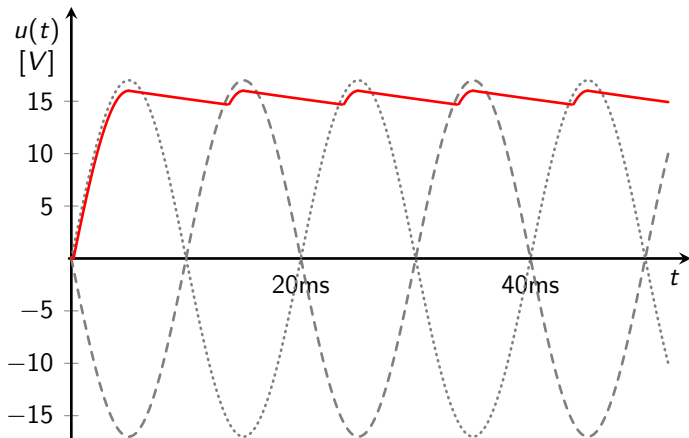
Aplikace: síťový zdroj 230V AC $\rightarrow$ 12V DC / 1A



- Sekundár má vinutí s odbočkou uprostřed (začátek označen *).
- Dvoucestný usměrňovač, zvlnění výstupního napětí podle kapacity C .
- Výstupní napětí: $U_{max} = U_{ef} \sqrt{2} - u_D = 12 * 1.41 - 0.7 \approx 16V$
- Při zátěži se projeví také odpor vinutí transformátoru.
- Sekundární vinutí a diody jsou zatíženy jen polovinu času.

Pozor: Zdroj není odolný proti zkratu na výstupu, chybí blokování diod, ...

Aplikace: zdroj 230V $\rightarrow$ 12V/1A — průběh napětí



Průběhy proudu viz např. [Horowitz:635] nebo simulace

Použití transformátorů v praxi

- Rozvodná síť (frekvence: 50Hz nebo 60Hz)
- Zdroje pro zařízení připojená do rozvodné sítě.
(Důležité je především galvanické oddělení.)
- Převod napětí akumulátoru na 230V AC: UPS, PowerWall, ...
- Spínané zdroje s velkým rozdílem U_{in} a U_{out}
- Vysokofrekvenční technika: impedanční přizpůsobení, balun
- Měření: proudový transformátor
- Audio: výstupní transformátor pro elektronkový zesilovač, oddělovací transformátor (zruší brum), ...
- Ethernet: oddělovací transformátory (viz [Horowitz:868])
- Transformátorová páječka.

Senzory

Senzory jsou elektronické součástky pro měření různých fyzikálních veličin (Například senzory teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu v meteostatnici.)

- Jsou citlivé na měřenou veličinu a maximálně nezávislé na ostatních parametrech prostředí.
- Výstup (analogový nebo digitální) je úměrný měřené veličině.
 - Analogové: $X \rightarrow \text{napětí (nebo proud)}$
 - Číslicové: $X \rightarrow \text{číslo}$
- Senzory jsou použitelné pro:
detekci událostí, řízení systémů, diagnostiku, měření, ...
- Vždy se používají s dalšími součástkami (např. MCU, displej).
- Nesmí příliš ovlivňovat okolí.

Základní vlastnosti senzorů

- Rozsah: jaké hodnoty měřené veličiny zvládne
- Počet vzorků za 1s (*sample-rate*) a šířka pásma (*bandwidth*).
- Chyba (*error*), její změna v čase (*drift*) a závislost na teplotě okolí.
Např. chyba linearity převodu.
(Systematické chyby lze odstranit kalibrací.)
- Rozlišení (*resolution*): změna veličiny na 1 bit výstupu
- Šum (*noise*): náhodné fluktuace výstupu senzoru
- Citlivost (*sensitivity*) $\approx \max(\text{rozlišení}, \text{šum})$

Analogové a digitální senzory

Každý elektronický digitální senzor obsahuje:

- ① snímací prvek: převod fyzikální veličiny na napětí/proud
- ② zesilovač signálu: zesílení signálu na použitelnou úroveň
- ③ filtr: omezení amplitudy signálu, frekvenční filtr, ...
- ④ A/D převod: digitalizace analogového signálu
- ⑤ číslicové zpracování: omezení signálu, kódování, ...
- ⑥ komunikační rozhraní: přenos dat k dalšímu zpracování

Analogové senzory obsahují jen první max 3 položky.

Základní typy senzorů a principy snímání

- teplota: rezistor, termistor, PN přechod, termočlánek, ...
- síla: rezistivní (tenzometr: digitální váha), piezo, ...
- pozice: potenciometr, kapacitní, induktivní, optický, ultrazvukový
- otočení: gyroskop (MEMS = kmitající mřížka + Coriolisova síla)
- zrychlení: akcelerometr (kapacitní/MEMS, piezoelektrický)
- vibrace: piezoelektrický, kapacitní, elektromagnetický, optický,
zvuk: MEMS mikrofon, ...
- tlak: kapacitní, piezo, rezistivní
- světlo: CdS fotorezistor, PIN fotodioda, fototranzistor,
fotonásobič, CCD snímač
- radiace: G-M trubice, PN přechod, scintilační detektor

Základní typy senzorů a principy snímání — pokračování

- vlhkost: polovodič (SnO_2) a změna odporu (nebo kapacity)
- plyn, alkohol: polovodič (SnO_2) a změna odporu
- kouř/prach: optický (rozptyl IR), ionizační (radioaktivní)
- tok tekutiny: mechanický, tepelný, tlakový, Doppler
- magnetické pole: Hallova sonda, reed-switch, magnetorezistivní jev (GMR), SQUID
- otáčky: snímač optický, magnetický
- rychlost: Dopplerův jev, Pitotova trubice
- kyselost: elektrochemické reakce
- ...

Senzory pro měření teploty — přehled

- dioda: změna U_f při konstantním proudu ($-2.1\text{mV}/^\circ\text{C}$ pro Si)
- *bandgap*: rozdíl ΔU_{BE} dvou tranzistorů
- termočlánek: generuje malé napětí kolem 20 až $40\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- speciální rezistor: změna odporu (Pt100: 100Ω pro 0°C , $+0.385\%/^\circ\text{C}$, lineární, rozsah -50 až 150°C)
- termistor: velmi nelineární a velká změna odporu (kolem $-4\%/^\circ\text{C}$)
- pyrometr: měření intenzity dopadajícího IR záření (IR kamera)
- ...

Liší se možným rozsahem teplot, přesností, časovou stabilitou, rychlostí reakce, velikostí a cenou. Používají se malé proudy, aby nedocházelo k zahřívání senzoru.

Senzory pro měření vzdálenosti — přehled

- kapacitní: změna kapacity přiblížením vodivého objektu
- induktivní: změna f (rezonanční frekvence LC obvodu)
 - přiblížení feromagnetického materiálu sníží f
 - přiblížení vodivého objektu (závit nakrátko) zvýší f , případně oscilace úplně zaniknou
- optické: měření
 - intenzity IR světla odraženého od objektu nebo
 - času od vyslání impulsu do přijetí jeho odrazu (lidar)
- akustické: odraz ultrazvukových vln od objektu (sonar)
- radiové: odraz radiových vln (radar)
- ...

Příklad: Analogový senzor teploty — LM35

Integrovaný obvod LM35:

- Analogový výstup: napětí $+10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, nelinearita typicky $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$
- Rozsah teplot 0 až $+150^{\circ}\text{C}$
- Přesnost $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (při $+25^{\circ}\text{C}$)
- Snímací prvek: přechod B-E tranzistoru (Bandgap)
- Zesilovač signálu: OZ, výstupní odpor 0.1Ω (při 1mA zátěži).
- Pouzdro se 3 vývody.
- Napájení 4V až 30V.
- Spotřeba $60\mu\text{A}$ (zahřívání max o $+0.08^{\circ}\text{C}$).

Příklad: Digitální senzor teploty — DS18B20

Integrovaný obvod DS18B20:

- Digitální výstup: 16 bitů číslo se znaménkem, fixed point, dolní 4 bity jsou desetinná část teploty ve stupních Celsia.
- Rozsah teplot max -55 až $+125^{\circ}\text{C}$
- Přesnost $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (pro -10 až $+85^{\circ}\text{C}$)
- Snímací prvek: přechod B-E tranzistoru (Bandgap)
- Zesilovač signálu: OZ
- A/D převodník: 12 bitů, doba převodu max 750ms
- Komunikační rozhraní: 1Wire
- Pouzdro se 3 vývody.
- Napájení 3.0V až 5.5V.

Možnost napájení z datového signálu (*parasite power*) — pak stačí jen dva vodiče (a speciální *pull-up* obvod).

Typické aplikace vybraných senzorů

teploměr — meteostanice, termostat, ...

vlhkoměr — meteostanice, klimatizace

tlakoměr — meteostanice, výškoměr, pneumatiky

akcelerometr — mobil, kvadrokoptéra, raketa

gyroskop — mobil, kvadrokoptéra, raketa, navigace

fotodiody — komunikace, luxmetr, expozimetr, spektroskopie

Hallova sonda — motor (BLDC), kompas?, magnetometr

PH-sonda — měření kyselosti (PH-metr)

plyn — detektory CO , CH_4 ; alkohol tester, elektronický nos

... — další viz WWW