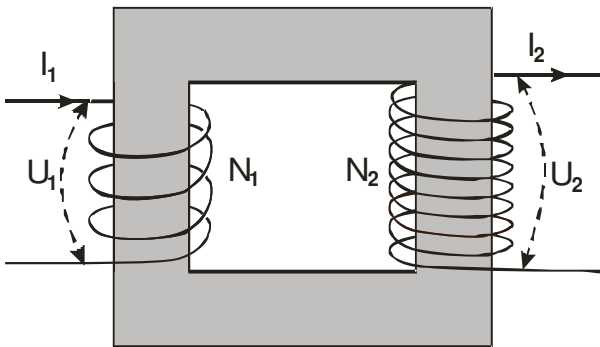


### 4.7.3 Transformátor

**Předpoklady:** 4508, 4701

**Pomůcky:** jádro pro transformátor, cívky 60, 300, 600, 1200, 12000 z, čtyři multimetry, vodiče, žárovka 6 V dvakrát, hřebík, cín, cívka 6 z, tavný závit, žiletka.

Uzavřený kruh z plátkového železa, na které jsou usazeny dvě cívky (mohou mít stejný nebo různý počet závitů). Měříme napětí na obou cívkách, proud, který přes ně prochází, známe počty jejich závitů.



Náš konkrétní případ: levá cívka 300 závitů (primární), pravá cívka 600 závitů (sekundární).

**Př. 1:** Odhadni, jaké napětí naměříme na sekundární cívce, když primární cívku připojíme ke zdroji stejnosměrného napětí 15 V.

Na sekundární cívce nenaměříme žádné napětí.

Stejnosemné napětí na primární cívce  $\Rightarrow$  přes primární cívku teče stejnosměrný proud

$\Rightarrow$  v primární cívce vzniká magnetické pole, se stálou velikostí  $\Rightarrow$  v sekundární cívce se nic neindukuje (nedochází k změně magnetického indukčního toku).

Na sekundární cívce se bude indukovat napětí pouze při zapínání a vypínání primárního obvodu.

**Pedagogická poznámka:** Pokud ukážete studentům transformátor a zadáte příklad 1 naprostá většina z nich bude odhadovat, že se na sekundární cívce objeví napětí 30 V. Všichni mají matné povědomí o tom, že transformátor mění napětí elektrického proudu, o tom, jak by měl celý proces fungovat a že je nutné, aby se napětí měnilo, nepřemýšlejí.

$\Rightarrow$  Pokud chceme, aby se indukovalo napětí na sekundární cívce, musíme zajistit změny magnetického pole:

- neustále zapínat a vypínat primární cívku,
- pustit do primárního obvodu střídavý proud (ten se „zapíná a vypíná“ sám od sebe).

**Př. 2:** Vysvětli, proč se po připojení primární cívky na zdroj střídavého proudu v sekundární cívce indukují střídavé napětí.

Střídavý proud v primární cívce indukují střídavé magnetické pole  $\Rightarrow$  střídavé magnetické pole se šíří železným jádrem do druhé cívky  $\Rightarrow$  uvnitř sekundární cívky se mění magnetické pole  $\Rightarrow$  v sekundární cívce se indukují střídavé napětí.

Zkusíme několik možností, jak zkombinovat cívky s různými počty závitů na primární a sekundární poloze:

$N_1$ (počet závitů primární cívky)	$N_2$ (počet závitů sekundární cívky)	$U_1$ (napětí na primární cívce)	$U_2$ (napětí na sekundární cívce)
300	600	15,1	29,5
600	300	15,1	7,1
1200	300	15,1	3,4
300	1200	15,1	60,4
60	300	13,5	65,6
300	60	15,1	2,9
300	300	15,6	15

**Pedagogická poznámka:** Ztráty v transformátoru se zvětšují s protékajícími proudy (je vidět při využití cívky 60 Z), proto doporučuji demonstrovat transformační poměr na prázdko (na sekundární cívce je zapojený pouze voltmetr) a při vyšším napětí (pokud jako napětí na primární cívce použijete například 5 V, jsou ztráty daleko citelnější).

Ne všechny školní cívky zřejmě mají počet závitů přesně rovný uvedené hodnotě, proto zapojení se stejným počtem závitů doporučuji nejdříve vyzkoušet, aby se Vám nepovedlo transformovat na vyšší napětí než vypočtené.

Měření se urychlí tím, že primární a sekundární cívku budete ve dvojicích prohazovat jenom výměnou napájení.

Pokud většina studentů transformační vztah pro napětí zná, není třeba zkoušet všechny dvojice a je možné ihned přejít k následujícím příkladům.

**Př. 3:** Na základě naměřených hodnot odhadni vztah mezi počty závitů a napětími u cívek transformátoru. Ztráty zanedbávej.

Pokud si uvědomíme, že v transformátoru dochází ke ztrátám, zřejmě platí: Poměr závitů je

stejný jako poměr napětí. 
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1}$$

Pro transformátor platí  $\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = k$ . Tento poměr označovaný jako  $k$  nazýváme **transformační poměr**.

- Je-li  $k > 1$ , je sekundární napětí vyšší než primární, mluvíme o transformaci nahoru,
- Je-li  $k < 1$ , je sekundární napětí nižší než primární, mluvíme o transformaci dolů.

**Př. 4:** Primární vinutí transformátoru má 60 závitů, sekundární 1200. Urči napětí na sekundární cívce, pokud transformátor připojíme ke střídavému napětí 15 V. Výsledek ověř.

$$N_1 = 60, \quad N_2 = 1200, \quad U_1 = 15 \text{ V}, \quad U_2 = ?$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1 = \frac{1200}{60} \cdot 15 \text{ V} = 300 \text{ V}$$

Na sekundární cívce bychom měli naměřit 300 V.

Experimentální hodnota 295 V.

**Př. 5:** Primární vinutí transformátoru má 300 závitů. Urči počet závitů sekundární cívky, pokud chceme 230 V transformovat na 12 V.

$$N_1=300 \quad U_1=230 \text{ V} \quad U_2=12 \text{ V} \quad N_2=?$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow N_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot N_1 = \frac{12}{230} \cdot 300 = 16$$

Sekundární cívka musí mít 16 závitů.

**Př. 6:** Máme k dispozici cívky o těchto počtech závitů: 60, 300, 600, 1200, 12000. Navrhni transformátor, který by transformoval síťové napětí 230 V tak, abychom mohli k sekundárnímu vinutí připojit žárovku o jmenovité hodnotě 6 V.

$$U_1=230 \text{ V} \quad , \quad U_2=6 \text{ V} \quad , \quad N_1=? \quad , \quad N_2=?$$

- snižujeme napětí  $\Rightarrow$  primární cívka má více závitů,
- poměr primárního a sekundárního napětí (obrácený transformační poměr

$$\text{transformátoru): } k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230}{6} = 38,3 \quad ,$$

$\Rightarrow$  zkusíme násobit počty závitů cívek (s nejmenším počtem závitů) transformačním poměrem a kontrolujeme, zda nedostáváme číslo blízké počtu závitů některé z cívek.

- 60 závitů:  $N_1 = k \cdot N_2 = 38,3 \cdot 60 = 2300$  (takovou cívku k dispozici nemáme),
- 300 závitů:  $N_1 = k \cdot N_2 = 38,3 \cdot 300 = 11500$  (počet závitů, který se blíží hodnotě 12000).

Síťové napětí 230 V můžeme transformovat na přibližně na napětí 6 V pomocí transformátoru s primární cívkou o 12000 závitech a sekundární cívkou o 300 závitech.

Transformátor sestavíme a kromě napětí změříme i proud, který prochází žárovkou. Naměřené hodnoty:  $U_1=231 \text{ V}$  ,  $U_2=4,5 \text{ V}$  ,  $I_2=86 \text{ mA}$  .

**Př. 7:** Vysvětli značný pokles napětí (více než 25%) oproti očekávané hodnotě v předchozím pokusu.

Primární cívka má velký počet závitů poměrně tenkého drátu  $\Rightarrow$  má značný odpor  $\Rightarrow$  vznikají na velké ztráty.

**Př. 8:** Urči, jaký proud transformátor při předchozím pokusu odebíral ze sítě. Ztráty v transformátoru zanedbej.

Nevíme, jak transformátor mění elektrický proud  $\Rightarrow$  zkusíme stejný vztah jako pro napětí.

$$\text{Podle transformačního poměru } I_1 = k \cdot I_2 = 38,3 \cdot 0,086 \text{ A} = 3,3 \text{ A} \quad .$$

$$\text{Podle poměru napětí: } I_1 = \frac{U_1}{U_2} \cdot I_2 = \frac{231}{4,5} \cdot 0,086 \text{ A} = 4,4 \text{ A} \quad .$$

**Pedagogická poznámka:** I žáci, kteří si pamatují transformátor ze základní školy, spontánně transformují proud stejným způsobem jako napětí. Nechávám je spočítat příklad špatně, pak diskutujeme o jejich výsledcích a nakonec necháme rozhodnout pokus. Teprve poté odvodíme vztah pro transformaci proudu.

Oba předchozí výsledky jsou divné:

- primární cívka má vyznačený maximální proud 0,1 A a přesto jsme ji nechali zapojenou

- poměrně dlouhou dobu bez viditelných následků,
- transformátor odebírá se sítě značný výkon (760 W v menším případě, třetina výkonu rychlovarné konvice), ale na výstupu poskytuje pouze 0,4 W, přesto ani po minutě nehoří,
- je vůbec únosné používat přístroj s účinností  $\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{0,4}{760} = 0,0005$  (0,05%)?

Rozhodne experiment:

Rozpojíme obvod se žárovkou  $\Rightarrow$  sekundárním obvodem prochází nulový proud:  $U_1 = 232 \text{ V}$ ,  $I_1 = 419 \text{ mA}$ ,  $U_2 = 5 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0 \text{ mA}$ .

Odpor cívky  $R = 367 \Omega \Rightarrow$  tepelné ztráty:  $P = U I = R I^2 = 367 \cdot 0,419^2 \text{ W} = 64 \text{ W}$  cívka se zahřívá.

Celková impedance:  $Z = \frac{U}{I} = \frac{232}{0,419} \Omega = 554 \Omega \Rightarrow$  indukčnost cívky, hraje značnou roli  $\Rightarrow$  existuje velký fázový posun mezi napětím a proudem v primárním obvodu.

- Zapojíme obvod se žárovkou:  $\Rightarrow$  sekundárním obvodem prochází proud:  $U_1 = 232 \text{ V}$ ,  $I_1 = 422 \text{ mA}$ ,  $U_2 = 4,7 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0,088 \text{ mA}$ .
  - K obvodu se žárovkou zapojíme paralelně další žárovkou:  $\Rightarrow$  proud sekundárním se zvětší:  $U_1 = 231 \text{ V}$ ,  $I_1 = 428 \text{ mA}$ ,  $U_2 = 3,5 \text{ V}$ ,  $I_2 = 0,248 \text{ mA}$ .
- $\Rightarrow$  v obou případech změny proudu v sekundární cívce řádově o stovky miliampér, způsobily změny proudu v primární cívce řádově o jednotky miliampér (přesnější výpočty by kvůli fázovému posunu proudu byly obtížnější)  $\Rightarrow$  transformátor, který zmenšuje napětí, zvětšuje proud.

Ideální transformátor (funguje beze ztrát): příkon (výkon na primární cívce) se musí rovnat výkonu (výkon na sekundární cívce):

$P_1 = P_2 \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$  (proud se transformuje v obráceném poměru než napětí).

**Př. 9:** Sekundárním vinutím transformátoru ( $N_1 = 12000$ ,  $N_2 = 300$ ) prochází proud:

- a) 88 mA                      b) 248 mA. Urči proud v primární cívce. Ztráty zanedbej.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

a)  $I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{300}{12000} \cdot 0,088 \text{ A} = 0,0022 \text{ A}$

b)  $I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{300}{12000} \cdot 0,248 \text{ A} = 0,0068 \text{ A}$

Oba výsledky řádově odpovídají naměřeným hodnotám.

Účinnost transformátoru je v porovnání s jinými dosud probranými stroji veliká a závisí na výkonu:

- výkon 1-2 W  $\Rightarrow$  účinnost 70%
- ...
- výkon větší než 1500 W  $\Rightarrow$  93%

**Dodatek:** Výpočet účinnosti transformátoru není jednoduchou záležitostí, zejména kvůli fázovým posunům mezi proudem a napětím, které minimálně u primárního vinutí nelze realisticky zanedbat.

**Př. 10:** Najdi důvody, které vedou ke ztrátám v transformátorech..

Odpor vodičů v cívkách,  
přemagnetování jádra,  
vířivé proudy v jádře,  
únik magnetického pole mimo jádro (indukční čáry pak neprocházejí druhou cívkou a neindukují napětí).

Konstrukce opravdových transformátorů se od našeho liší: obě cívky jsou navinuty na stejný kus železa.

### Přenos elektrické energie z elektráren ke spotřebitelům

Elektrárna: výroba elektrického proudu, napětí typicky 2000 V.

Napětí se transformuje nahoru na napětí 220 kV nebo 400 kV a v této formě se převádí na velké vzdálenosti.

U spotřebitele se transformuje dolů: 110 kV, 22kV až 0,4 kV (sdružené napětí normální sítě).

Proč se to dělá tak složitě a utrácí se za transformátory?

Přenos elektrické energie pomocí vysokého napětí snižuje ztráty.

**Př. 11:** Urči ztráty, které by vznikly při přenosu 1 MW na elektrickém vedení z Temelína do Prahy,

- kdyby byl proud přenášen normálním napětím 230 V,
- kdyby byl proud přenášen velmi vysokým napětím 400 000 V.

Nejdříve určíme odpor vedení z Temelína do Prahy:

vzdálenost 100 km  $\Rightarrow l = 100\,000$  m ,

průměr drátu 6 cm  $\Rightarrow r = 0,03$  m ,

materiál hliník  $\Rightarrow \rho = 0,027 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$  .

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi r^2} = 0,027 \cdot 10^{-6} \frac{100000}{\pi 0,03^2} \Omega = 0,95 \Omega$$

a) ztráty při  $U = 230$  V

Potřebný proud tekoucí do Prahy:  $P = U \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{1000000}{230} \text{ A} = 4350 \text{ A}$  .

Ztráty při přenosu:  $P = R \cdot I^2 = 0,95 \cdot 4350^2 \text{ W} = 18\,000\,000 \text{ W}$  .

$\Rightarrow$  Při přenesení 1 MW ztratíme po cestě 18 MW.

b) ztráty při  $U = 400000$  V

Potřebný proud tekoucí do Prahy:  $P = U \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{1000000}{400000} \text{ A} = 2,5 \text{ A}$  .

Ztráty při přenosu:  $P = R \cdot I^2 = 0,95 \cdot 2,5^2 \text{ W} = 6 \text{ W}$  .

$\Rightarrow$  Při přenesení 1 MW ztratíme po cestě 6 W.

Ztráty jsou při použití velmi vysokého napětí více než milionkrát menší. Není pochyb, že se transformátory vyplatí.

**Pedagogická poznámka:** Postup výpočtu není pro žáky úplně jednoduchý, zejména způsob výpočtu proudu vyžaduje většinou další komentář..

Právě možnost snadné transformace je největší výhodou střídavého proudu.

Další využití transformátorů:

- transformace síťového napětí na menší pro domácí spotřebiče (počítače, přehrávače, zesilovače, nabíječky...),
- zvětšování proudu (indukční pec, transformátorová pájka).

**Dodatek:** Pro dnešní domácí spotřebiče, které nevyužívají přímo síťové napětí, se transformace síťového napětí neprovádí samotným transformátorem, ale takzvaným spínaným zdrojem, ve kterém je (značně zmenšený) transformátor pouze jednou součástí složitějšího zapojení.

**Př. 12:** (BONUS) Při zapojení dvou žárovek jsme na transformátoru 12000z /300 z naměřili tyto hodnoty  $U_1=231\text{ V}$  ,  $I_1=428\text{ mA}$  ,  $U_2=3,5\text{ V}$  ,  $I_2=0,248\text{ mA}$  . Urči z poměru činných výkonů na primárním a sekundárním vinutí účinnost transformátoru. Fázový posun na primárním vedení zohledni, na sekundárním považuj za nulový. Odpor cívky je  $367\ \Omega$  .

$$U_1=231\text{ V} , I_1=428\text{ mA} , U_2=3,5\text{ V} , I_2=0,248\text{ mA} , \eta=?$$

Určení fázového posunu na primární cívce.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R} \Rightarrow \text{Musíme určit indukanci cívky.}$$

$$\text{Víme: } Z = \frac{U}{I} \text{ a zároveň } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \Rightarrow$$

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2} = \sqrt{\left(\frac{231}{0,428}\right)^2 - 367^2} \Omega = 396\ \Omega$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{X_L}{R} = \frac{396}{367} \Rightarrow \varphi_1 = 47^\circ 40'$$

$$\text{Nyní určíme účinnost transformátoru: } \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} = \frac{3,5 \cdot 0,248 \cos 0^\circ}{231 \cdot 0,428 \cos 47^\circ} = 0,013$$

Při našem zapojení pracuje transformátor s účinností 1,3%.

**Dodatek:** Hodnoty použité v předchozím příkladu jsou skutečné hodnoty naměřené na školním transformátoru. Jeho účinnost není podstatně vyšší ani při použití jiných cívek (například 600z/6z).

**Shrnutí:** Střídavý proud v primární cívce vytváří střídavé magnetické pole, které indukuje napětí v sekundární cívce. Velikosti napětí závisí na počtech závitů cívek. Tak můžeme měnit střídavé napětí a šetřit elektrickou energii při přenosu.