

# Senzory a Měření - protokol 4 - měření proudu a výkonu

Vypracoval **Vojtěch Michal** 4. dubna 2021, "měření" provedeno dle videí ze dne 24. 3. 2020.

Záznam z měření na Youtube:

<https://www.youtube.com/watch?v=NAdUiWQif6s>, <https://www.youtube.com/watch?v=aRQxRpMoP74>, <https://www.youtube.com/watch?v=zXoaaM-9oQo>, [https://www.youtube.com/watch?v=u6WEiql\\_J5s](https://www.youtube.com/watch?v=u6WEiql_J5s)

## Úkoly měření

Pozn: Hallova sonda měří magnetický tok v uzavřeném magnetickém obvodu jádra ("céčko" z materiálu vysoké permeability a malá vzduchová mezera pro vložení Hallovky), který je indukován proudem procházejícím primárním vinutím. Typicky v opačném směru indukujeme tok od námi generovaného kompenzačního proudu tekoucího kompenzačním vinutím kolem stejného jádra. Hallovka porovnává oba toky a řídí tak zpětnou vazbu. Kompenzační proud umíme měřit snímacím rezistorem, se znalostí kompenzačního proudu a poměru závitů primáru a kompenzačního vinutí lze dopočítat proud primárem. Díky principu založenému na Lorenzově síle měří AC i DC.

Poznámky k jednotlivým přístrojům (číselné hodnoty vychází z videí doktora Petruchy linkovaných výše):

a) Ruční multimetr Summit 45 s interním shuntem - klasický malý rezistor mezi svorkami, multimetr měří napěťový úbytek na shuntu. Při proudu 3.481 A je mezi svorkami napětí 220mV (změřeno paralelním připojením druhého multimetru v režimu měření napětí), tedy vnitřní měřicí odpor cca 63 mOhm. Při takto malém odporu je potřeba vzít v potaz i napěťový úbytek na přívodních vodičích a kontaktech konektorů. Ty mohou být klidně srovnatelné s vnitřním odporem, bočník tak může mít 20 až 40 mOhm. Protože je shunt zabudován dovnitř multimetru, není možné na něm zvenčí provést čtyřsvorkové měření. Multimetr podporuje AC i DC měření, nelze ale typicky měřit obojí najednou kvůli vnitřní konstrukci - pro AC veličiny je použit coupling přes vnitřní kondenzátor.

b) Externí bočník Agilent 34330A = čtyři svorky, dvě silové pro proud a dvě výstupní napěťové pro zapojení do multimetru s převodní konstantou (vnitřním odporem)  $1mV \cdot A^{-1} = 1m\Omega$ . Multimetr pak měří pouze střídavé napětí, zde 3.493 mV. Měří DC a AC až do 1kHz s vysokou přesností (0.3 % chyba), do 5kHz chyba 5%, nepoužitelný pro vyšší frekvence (indukčnosti přívodů). Díky rozlišení multimetru a dobré nejistotě bočníku se toto měření dá považovat za referenční údaj.

c) Proudový transformátor = tlustý drát s měřeným proudem vytváří jeden závit primární vinutí. Kolem něj je toroidní jádro s omotaným sekundárem, zde 2500 závitů. Transformátor převádí proud z primáru na sekundár

v poměru  $\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{2500}$ . Na sekundáru je pro měření proudu umístěn bočník  $10 \Omega$ , pro ideální měření musí být

sekundár zkratován. Na shuntu je měřeno 14.07 mV, proto proud primárem je  $I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{14.07mV}{10\Omega} = 3525 \text{ mA}$ .

Zdrojem chyby jsou rezistory v sekundáru a velká chyba multimetru U3401A na malém rozsahu střídavých napětí. Nejlépe je sekundár zkratovat, pak ale nelze měřit  $I_2$  kontaktně, bylo by nezbytné použít bezkontaktní měření proudu, pro které by transformátor pouze zvyšoval rozsah měřitelného proudu. Sekundár se nesmí rozpojit; jádro se přesytí, mezi svorkami sekundáru by se indukovalo vysoké napětí a hrozil by průraz. Proudový transformátor z principu neměří DC, jádro lze snadno přesytit permanentním magnetem. Alternativou jsou DC

*tolerantní transformátory*, které mají jádro ze dvou materiálů různé permeability, jsou schopny částečně měřit i DC složku a odolávat vnějšímu poli.

Vnitřní odpor proudového transformátoru: odpor primáru je zanedbatelný, je to prostě měděný drát a dva konektory. *Insertion impedance* (vložená impedance) modeluje vliv omotání jádra a sekundáru kolem primáru. Zátěž na sekundáru (snímací rezistor) se na primár transformuje se čtvercem poměru závitů. Na primáru se tak projevuje zdánlivá zátěž  $\frac{10\Omega}{2500^2} = 1.6\mu\Omega$ .

d) Klešťový ampérmetr je schopen měřit AC i DC. Kolem vodiče protékaného proudem obemkneme měřicí kleště. Tím se uzavře magnetický obvod (s jedním závitem primáru) se zařazenou Hallovkou. Velký rozsah až jeden kA. Pro dosažení vyššího rozlišení je vhodné omotat vodič kolem kleští vodič s proudem vícekrát a následně vydělit reading. Pro pět závitů měří 17.4 A, to odpovídá proudu 3.48 A. Je schopen souběžně měřit i napětí na zátěži a dopočítat zdánlivý/činný/jalový výkon a účinník. Hovořit o vnitřním odporu pro měření proudu nemá smysl - měření je bezkontaktní. Lze uvažovat jen vloženou impedanci kvůli obepnutí vodiče magnetickým obvodem. Vnitřní odpor pro napěťové vstupy  $1M\Omega$ .

e) Proudové kleště pro osciloskop měří DC i AC pomocí Hallovky sondy v magnetickém obvodu uzavřeném kolem vodiče protékaného měřeným proudem (stejný princip jako (d)). Na kleštích nastavitelný měřicí rozsah, směr kladného proudu. Směr obecně není pro AC důležitý, má ale význam při měření potenciálně fázově posunutých signálů (třeba u a i pro měření činného a jalového výkonu). Napětí předbíhá proud, lze tak usuzovat na indukční zátěž. Vnitřní odpor je stejný jako v případě (d) - bezkontaktní měření ovlivňuje měřený obvod jen vloženou impedancí, která je pod měřitelnými hodnotami.

f) Výkonový analyzátor měří 3.515 A, spolu s tím napětí, účinník, činný, jalový, zdánlivý výkon, frekvence nebo rozklad na vyšší harmonické.

## 1) Porovnejte proud tekoucí jednofázovou zátěží pro různé úhly triakové regulace

```
rows = {'Handheld'; 'Agilent milivoltmetr + externí shunt'; 'proudový transformátor'; 'klešťový ampérmetr (3 závit)'};

deg0 = {'3.20'; '3.303'; '0.013124/10 * 2500 = 3.281'; '9.82/3 = 3.273'; '3.187'};
deg45 = {'2.58'; '2.2842'; '0.011316/10 * 2500 = 2.829'; '8.43/3 = 2.81'; '2.764'};
deg90 = {'0.99'; '1.434'; '0.005759/10 * 2500 = 1.439'; '4.33/3 = 1.443'; '1.399'};
```

%Zde je vhodné si roztáhnout sloupcečky tabulky, aby byly vidět řádky celé.

```
table(deg0, deg45, deg90, 'RowNames', rows, 'VariableNames',{'RMS pro 0 deg [A]', 'RMS pro 45 deg [A]', 'RMS pro 90 deg [A]'})
```

```
ans = 5x3 table
```

...

	0 deg [A]	45 deg [A]
1 Handheld	'3.20'	'2.58'
2 Agilent milivoltmetr + extern...	'3.303'	'2.2842'
3 proudový transformátor	'0.013124/10 * 2...	'0.011316/10 * 250...
4 klešťový ampérmetr (3 závit)	'9.82/3 = 3.273'	'8.43/3 = 2.81'
5 proudové kleště + osciloskop	'3.187'	'2.764'

Schopnost přístrojů měřit AC či DC je rozebrána výše. Analýza vnitřního odporu přístrojů je provedena v poznámkách výše. Užitečná zkratka je, že významný vnitřní odpor mají kontaktní senzory proudu (interní i externí shunt), potenciálně zanedbatelný je i odpor u proudového transformátoru. Senzory založené na magnetickém obvodu a Hallovi senzoru (tedy ty bezkontaktní) mají vnitřní odpor zanedbatelný.

## 2) Pro úhel sepnutí 0° stanovte nejistotu měření proudu danou sestavou (a-d tj. mimo bodu e).

a) Ruční multimetr Mastech MY-64 nastaven na rozsah 10 A, měří 3.20 A. Podle <https://eshop.micronix.cz/data/cz/att/001/466-188.pdf> je přesnost  $\pm 3\%$  z měření  $\pm 7$  digitů. Protože je DMM 3,5 místný, je na rozsahu 10A jeden digit roven 10 mA.

Proto je nejistota měření 
$$u_b = \frac{\frac{3}{100} \cdot 3.20 + 7 \cdot 0.01}{\sqrt{3}} = 95.8 \text{ mA}.$$

b) Multimetr HP 34401A měří AC napětí na rozsahu 100 mV a frekvenci 50 Hz (síťové napětí) hodnotu  $U = 3.303 \text{ mV}$ . Podle datasheetu <https://eshop.micronix.cz/data/cz/att/002/860-1573.pdf> má na tomto rozsahu  $\pm 0.04\%$  čtení  $\pm 0.03\%$  rozsahu. Samotný shunt má převodní konstantu  $R = 1 \text{ mV} \cdot \text{A}^{-1} = 1 \text{ m}\Omega$ , tolerance  $\pm 0.3\%$ .

Nepřímě měřený proud tak je  $I = \frac{U}{R}$ . Nejistota bočníku  $u_R = 0.001 \cdot 0.003 = 3 \mu\Omega$ , nejistota měření

napětí 
$$u_U = \frac{\frac{0.04}{100} \cdot 3.303 + \frac{0.03}{100} \cdot 100}{\sqrt{3}} = 18 \mu\text{V}.$$
 Pomocí zákona šíření nejistot určíme nejistotu proudu 
$$u_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial U} \cdot u_U\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R} \cdot u_R\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R} \cdot u_U\right)^2 + \left(\frac{-U}{R^2} \cdot u_R\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{10^{-3}\Omega} \cdot 18 \cdot 10^{-6}\text{V}\right)^2 + \left(\frac{-18 \cdot 10^{-6}\text{V}}{10^{-6}\Omega^2} \cdot 3 \cdot 10^{-6}\Omega\right)^2} = \sqrt{(18 \cdot 10^{-3})^2 + (3)^2} = \sqrt{324 + 9} = \sqrt{333} \approx 18.25 \text{ mA}.$$

c) Proudový transformátor (datasheet v dokumentu *06\_prilohy-pristroje.pdf*) má  $\pm 25$  závitů na sekundáru, měřicí odpor je  $10\Omega \pm 1\%$ , měření provádí DMM Agilent 34401A měřicí AC napětí na rozsahu 100 mV na 50 Hz hodnotu  $13.124 \text{ mV}$ , tedy  $\pm 0.04\%$  čtení  $\pm 0.03\%$  rozsahu.

Nepřímě měřený proud je  $I_1 = N \cdot \frac{U}{R}$ . Dílčí nejistoty:  $u_N = 25$  závitů;  $u_R = \frac{1}{100} \cdot 10\Omega = 100 \text{ m}\Omega$ ;

$$u_U = \frac{\frac{0.04}{100} \cdot 13.124 + \frac{0.03}{100} \cdot 100}{\sqrt{3}} = 20 \mu\text{V}$$

Podle zákona šíření nejistot potom má nepřímě měřený proud nejistotu

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial U} \cdot u_U\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R} \cdot u_R\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial N} \cdot u_N\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{N}{R} \cdot u_U\right)^2 + \left(\frac{N \cdot U}{-R^2} \cdot u_R\right)^2 + \left(\frac{U}{R} \cdot u_N\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2500}{10\Omega} \cdot 20 \cdot 10^{-6}\text{V}\right)^2 + \left(\frac{2500 \cdot 13.124 \cdot 10^{-6}\text{V}}{100\Omega^2} \cdot 100 \text{ m}\Omega\right)^2 + \left(\frac{13.124 \cdot 10^{-6}\text{V}}{10\Omega} \cdot 25\right)^2} = \sqrt{(0.5)^2 + (0.316)^2 + (0.328)^2} = \sqrt{0.25 + 0.1 + 0.108} = \sqrt{0.458} \approx 0.677 \text{ mA}.$$

Toto měření má potenciál být extrémně přesné, protože  $N$  by teoreticky mělo jít udělat ideálně (je to vždy přirozené číslo), ale  $1\%$  chyby transformátoru i měřicího odporu celkovou nejistotu kazí.

d) Klešťový měřák PK 430.1 (datasheet v dokumentu *06\_prilohy-pristroje.pdf*) měří střídavý proud; na rozsahu 39,99 A hodnotu 9.82 A (protože má primár 3 závity, měří se vlastně proud 3.27 A), proto je chyba 1% rozsahu. Jeden digit je 0.01 A, ale v dokumentaci není uvedena chyba v digitech.

Nejistota měření je  $u_b = \frac{1}{100} \cdot 39,99 = 77\text{mA}$ , kde trojka ve jmenovateli odráží skutečnost, že nejistota měření je efektivně třetinová díky trojnásobnému počtu závitů.

e) Osciloskop a sonda jsou v režimu 10:1 (100 mV/A), přesnost  $\pm 3\%$  čtení  $\pm 50\text{mA}$ , zobrazuje se hodnota 3.1069 A.

Nejistota měření je  $u_b = \frac{3}{100} \cdot 3.1069 + 0.05 = 86\text{mA}$ .

### 3) Pomocí analyzátoru výkonu změřte příkon jednofázové zátěže pro různé úhly triakové regulace

Příkon zátěže ... 86.67 W pro triakovou regulaci  $0^\circ$ , 66.44 W pro  $45^\circ$ , 20.25 W pro regulaci  $90^\circ$ .

Pro triakovou regulaci na  $90^\circ$  je potřeba měřit alespoň 13 harmonických a stejně to nebude stačit, aby jejich amplituda poklesla pod 5% amplitudy první harmonické. Vyšší liché harmonické jsou relativně silnější než vyšší sudé harmonické, ovšem ani 13. harmonická není pod 5% amplitudy první harmonické.

Stejného výsledku by nebylo možné dosáhnout prostým násobením readingů z multimetrů kvůli deformaci vlny triakovou regulací. Pouze pro harmonické průběhy si lze pomoci vztahem  $P = UI$  pro efektivní hodnoty; pro neharmonický průběh jsou nezbytné nějaké výpočty podle definice (tepelný vliv) a nebo numerická integrace.

### 4) Ověřte funkci třífázového elektronického elektroměru

Elektroměr je tvořen ze tří symetrických měření pro každou fázi - obsahují proudový transformátor pro levné a robustní měření tekoucího proudu (výhodou je galvanické oddělení). Jeho výrazně jednodušší alternativnou je čistě analogový jednofázový elektroměr se shuntem, podle odebíraného výkonu se mechanicky otáčí číslíčka na čítači.

Při měření výkonu měřením napětí na transformátoru místo zátěže vzniká chyba, protože bod měření vůbec nebere v potaz triakovou regulaci a tak počítá výkon, který se ve skutečnosti na zátěž vůbec nedostává. Další potenciálně nezanedbatelný vliv přináší odpor přívodních vodičů.

