

# FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

## Fyzikální praktikum 1

Zpracovala: Šárka Divácká

Naměřeno: 12. 4. 2022

Skupina: Út 8:00

### Úloha č.9: Měření elektrického napětí a proudu

Laboratorní podmínky:

- Teplota 20,6 °C
- Tlak 991,8 hPa
- Vlhkost 24,5%

#### 1. Úvod

Měření elektrických veličin – proudu a napětí, případně odporu a výkonu – patří ke zcela základním experimentálním technikám. Nepoužívají se jen na sledování elektrických jevů, ale v současné době se na ně převádí i jiné, neelektrické, veličiny.

Přístroje pro měření proudu a napětí dělíme na analogové a digitální. Vlastnosti měřícího přístroje určuje hlavně jeho vnitřní odpor, který určíme z Ohmova zákona

$$R = \frac{U}{I}$$

kde  $U$  je napětí na svorkách přístroje a  $I$  je proud protékající přístrojem. Obecně by měli mít voltmetry co největší vnitřní odpor a ampérmetry co nejmenší vnitřní odpor.

##### 1.1. Měření elektrického napětí

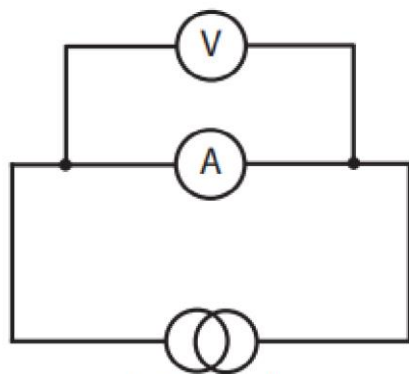
Elektrické napětí mezi dvěma body je definováno jako rozdíl elektrických potenciálů v těchto bodech. Voltmetr zapojujeme paralelně s prvkem, na kterém chceme napětí měřit.

##### 1.2. Měření elektrického proudu

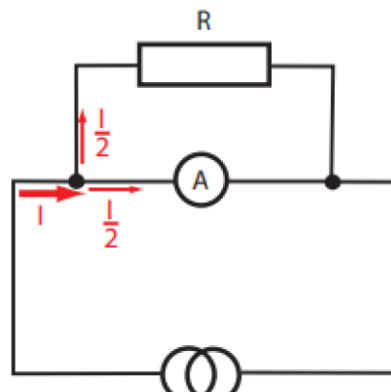
Ampérmetr se na rozdíl od voltmetru zapojuje sériově s měřeným prvkem, protože proud protékající měřeným prvkem musí protékat také ampérmetrem.

##### 1.3. Měření vnitřního odporu

Pro digitální přístroje vnitřní odpor udává přímo výrobce. Pro analogové přístroje můžeme vnitřní odpor zjistit dvěma metodami – z Ohmova zákona a substituční metodou.



Obrázek 2 zdroj proudu



Obrázek 1 zdroj proudu

Z Ohmova zákona: Ampérmetr připojím do obvodu dle obr. 1. Odpor poté určím z naměřených hodnot přímo z Ohmova zákona

$$R = \frac{U}{I}$$

Substituční metoda: Tato metody spočívá v tom, že místo voltmetru připojím odporovou dekádu – obr. 2. Poté na dekádě nastavím takový odpor, aby měřený proud na ampérmetru byl poloviční oproti zapojení bez odporu. Vnitřní odpor ampérmetru se rovná odporu nastavenému na dekádě.

#### 1.4. Změna rozsahu měřících přístrojů

Obecně lze rozsah přístrojů pouze zvětšit.

Při změně rozsahu ampérmetru použiji bočník (odpor připojený paralelně na ampérmetr – obr. 3). Odpor bočníku vypočítám podle vzorce

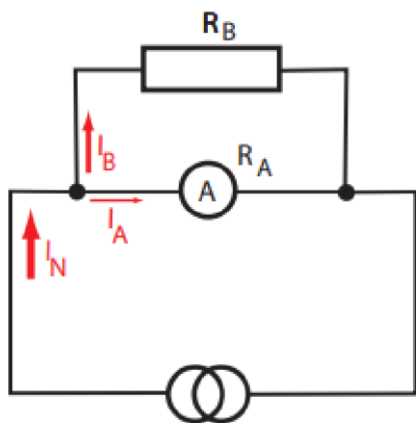
$$R_B = \frac{R_A I_A}{I_B}$$

kde  $I_B$  je proud bočníkem,  $I_A$  je proud ampérmetrem,  $R_B$  je odpor bočníku a  $R_A$  je vnitřní odpor ampérmetru.

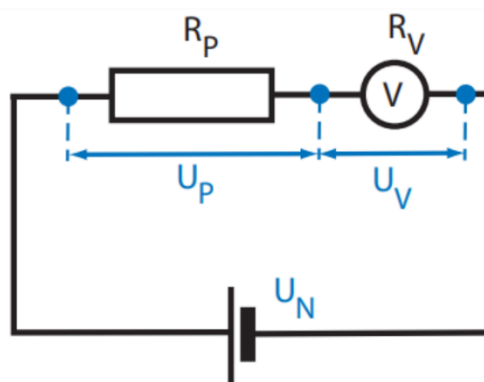
Dále budu chtít změnit ampérmetr na voltmetr, čehož dosáhnu použitím předřadníku (odpor připojený sériově na ampérmetr – obr. 4). Odpor předřadníku spočtu podle vzorce

$$R_P = \left( \frac{U_Z}{U_A} - 1 \right) \cdot R_A$$

kde  $U_A$  je napětí na ampérmetru,  $U_Z$  je napětí na zdroji,  $R_A$  je odpor ampérmetru a  $R_P$  je odpor předřadníku.



Obrázek 4 zdroj proudu



Obrázek 3

#### 1.5. D/A převodník

Digitálně-analogový převodník převádí číslo na analogovou veličinu. Vstupem jsou hodnoty bitů a výstupem napětí. Důležitým parametrem těchto převodníků je reálný kvantizační krok, který vypočtu jako

$$U_q = \frac{U_c}{2^n - 1}$$

kde  $U_c$  je reálný napěťový rozsah převodníku a  $n$  počet bitů. Dále budu počítat chybu offsetu (nuly)

$$\delta_0 = \frac{\Delta U_0}{U_r}$$

kde  $U_0$  je minimální hodnota napětí reálně nastavitelná na převodníku a  $\Delta U_0$  je odchylka od nominální hodnoty. A také spočtu chybu měřítka (zesílení)

$$\delta_m = \frac{\Delta U_m - \Delta U_0}{U_r}$$

kde  $U_m$  je maximální hodnota napětí reálně nastavitelná na převodníku a  $\Delta U_m$  je odchylka od nominální hodnoty.

## 1.6. A/D převodník

Analogově-digitální převodník naopak převádí analogové veličiny na jejich číselné vyjádření.

## 2. Naměřené hodnoty a jejich zpracování

Tato úloha má dvě části: analogovou a digitální.

### 2.1. Analogová část

#### 2.1.1. Odpor ampérmetru

Nejprve budu měřit odpor ampérmetru o rozsahu  $100 \mu A$ . Odpor budu zjišťovat jak z Ohmova zákona, tak i substituční metodou.

Z Ohmova zákona: Ampérmetr připojím ke zdroji proudu, který je nastavený na hodnotu  $100 \mu A$ . Poté pomocí přístroje Keysight U3401A budu měřit napětí na zdroji. Pro hodnoty napětí a proudu dostanu tedy hodnoty (třída přesnosti ampérmetru je 1,5; voltmetr má rozsah 500 mV, rozlišovací dílek  $10 \mu A$ , vnitřní odpor  $10,0 M\Omega$  a  $U_B = \pm (0,02\% + 4)$ ):

$$I = 100 \mu A$$

$$U(I) = 3 \cdot 1,5 = 4,5 \mu A$$

$$I = (100 \pm 5) \mu A \quad (p = 99,73\%)$$

$$U = 179,71 mV$$

$$U(U) = 0,02 \cdot 10^{-2} \cdot 179,71 + 4 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0,0759 mV$$

$$U = (179,71 \pm 0,08) mV \quad (p = 99,73\%)$$

Odpor je tedy z Ohmova zákona:

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} = \frac{179,71}{100 \cdot 10^{-3} - \frac{179,71}{10 \cdot 10^9}} = 1797,1 \Omega$$

$$U(R) = \sqrt{\left(\frac{1}{I}\right)^2 \cdot U(U)^2 + \left(-\frac{U}{I^2}\right)^2 \cdot U(I)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,1}\right)^2 \cdot 0,0759^2 + \left(-\frac{179,71}{0,1^2}\right)^2 \cdot (4,5 \cdot 10^{-3})^2}$$

$$= 80,87 \Omega$$

$$R = (1800 \pm 80) \Omega \quad (p = 99,73\%)$$

Substituční metoda: Ampérmetr opět připojím na zdroj proudu, který opět nastavím na hodnotu  $100 \mu A$ . Poté připojím odporovou dekádu a nastavím na ní takový odpor, aby ampérmetr ukazoval  $50 \mu A$ . Odpor ampérmetru je poté roven odporu dekády. Naměřená hodnota odporu je tedy:

$$R = 1775,7 \Omega$$

$$U(R) = 79,9065 \Omega$$

$$R = (1800 \pm 80) \Omega$$

#### 2.1.2. Bočníky

V této části úlohy chci zvětšit rozsah ampérmetru z předchozí úlohy  $5\times$  (na  $0,5 mA$ ),  $10\times$  (na  $1 mA$ ) a  $20\times$  (na  $2 mA$ ). Odpor bočníku spočtu ze vztahu

$$R_B = \frac{R_A I_A}{I_B}$$

kam za odpor ampérmetru dosadím výsledek z předchozí části úlohy  $R_A = (1800 \pm 80)\Omega$ . Získám tak hodnoty:

$$0,5 \text{ mA}: R_B = 450 \Omega$$

$$1 \text{ mA}: R_B = 200 \Omega$$

$$2 \text{ mA}: 94,7 \Omega$$

Tyto výsledky si ověřím tak, že bočníky realizuji pomocí odporové dekády. Z toho zjistím, že tyto výsledky jsou správné.

### 2.1.3. Předřadníky

Nyní chci ampérmetr z předchozích úloh pomocí předřadníku vytvořit voltmetr o rozsahu 5 V a 10 V. Odpor předřadníku spočtu ze vztahu

$$R_P = \left( \frac{U_Z}{U_A} - 1 \right) \cdot R_A$$

kam za odpor ampérmetru dosadím opět  $R_A = (1800 \pm 80)\Omega$  a za napětí na ampérmetru hodnotu naměřenou v první části úlohy  $U_A = (179,71 \pm 0,08)mV$ . Získám hodnoty:

$$5 \text{ V}: R_P = 48280 \Omega$$

$$10 \text{ V}: R_P = 98361 \Omega$$

Tyto výsledky si opět ověřím tak, že předřadníky realizuji pomocí odporové dekády. Z toho zjistím, že tyto výsledky jsou nadhodnocené. Správné výsledky jsou:

$$5 \text{ V}: R_P = 47630 \Omega$$

$$10 \text{ V}: R_P = 97220 \Omega$$

## 2.2. Digitální část

### 2.2.1. Číselný rozsah osmibitového a šestnáctibitového D/A převodníku

Číselný rozsah n-bitového D/A převodníku spočtu pomocí vztahu  $2^n - 1$ . Pro osmibitový D/A převodník je rozsah tedy 0 – 255 a pro šestnáctibitový D/A převodník 0 – 65535.

### 2.2.2. Vlastnosti převodníků

U předchozích převodníků budu v této části úlohy určovat reálný napěťový rozsah, kvantizační krok, rozlišovací schopnost, chybu offsetu a chybu zesílení.

Osmibitový D/A převodník s nominálním rozsahem 0 až 10 V:

- Reálný napěťový rozsah  $U_C$ :

$$U_0 = 0,001290 \text{ V}$$

$$U_{255} = 9,878575 \text{ V}$$

$$U_C = U_{255} - U_0 = 9,878575 - 0,001290 = 9,877285 \text{ V}$$

- Kvantizační krok  $U_q$ :

$$U_q = \frac{U_C}{2^n - 1} = \frac{9,877285}{2^8 - 1} = 0,038734 \text{ V}$$

- Chyba offsetu  $\delta_0$ :

$$\delta_0 = \frac{\Delta U_0}{U_r} = \frac{0,001290}{10} = 1,29 \cdot 10^{-4}$$

- Chyba měřítka  $\delta_{255}$ :

$$\delta_{255} = \frac{\Delta U_{255} - \Delta U_0}{U_r} = \frac{10 - 9,878575 - 0,001290}{10} = 0,012014$$

Šestnáctibitový D/A převodník s nominálním rozsahem -10,7 V až 10,7 V:

- Reálný napěťový rozsah  $U_C$ :

$$U_0 = -10,674395 \text{ V}$$

$$U_{65535} = 10,696869 \text{ V}$$

$$U_C = U_{65535} - U_0 = 10,696869 + 10,674395 = 21,371264 \text{ V}$$

- Kvantizační krok  $U_q$ :

$$U_q = \frac{21,371264}{2^{16} - 1} = 3,26 \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

- Chyba offsetu  $\delta_0$ :

$$U_r = 21,4 \text{ V}$$

$$\delta_0 = \frac{-10,7 + 10,674395}{21,4} = -1,196 \cdot 10^{-3}$$

- Chyba měřítka  $\delta_{65535}$ :

$$\delta_{65535} = \frac{10,7 - 10,696869 - (-10,7 + 10,674395)}{21,4} = 1,343 \cdot 10^{-3}$$

### 2.2.3. Šestnáctibitový převodník s napětím 3,2 V

V této části úlohy jsem nejprve počítala číslo, které potřebuji, aby na šestnáctibitovém převodníku bylo napětí 3,2 V. Toto číslo dostanu lineární interpolací

$$y = \frac{65535}{10696869 + 10,674395} \cdot (3,2 + 10,674395) = 42545,845 \doteq 42546$$

Výsledek jsem si poté ověřila a přišla jsem k závěru, že je správný.

### 2.2.4. Vliv vzorkovací frekvence na kvalitu analogového signálu

V této úloze použiji A/D převodník. Generovaný signál s harmonickým průběhem o frekvenci 1 kHz pomocí A/D převodníku v měřícím systému ISES budu zaznamenávat vzorkovací frekvencí 20 kHz, 2 kHz, 1 kHz, 1,1 kHz a 100 kHz.

Z tohoto měření jsem zjistila, že správný výsledek dostanu pro vzorkovací frekvence 20 kHz a 2 kHz. Vzorkovací frekvence 1 kHz a 100 Hz vytvoří záznam, který sinusoidu vůbec nepřipomíná, a to proto, že vzorkovací frekvence se vždy trefí do stejného místa sinusoidy a tudíž vznikne pouze šum. Pro vzorkovací frekvenci 1,1 kHz sice dostanu pravidelný signál, ale nesprávný.

### 2.2.5. Kvantizační krok A/D převodníku

Kvantizační krok A/D převodníku zjistím nejprve přímo výpočtem:

$$U_q = \frac{5}{2^{12} - 1} = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

Kvantizační krok tohoto převodníku mohu určit také ze záznamu signálu, ze kterého ihned vidím, že to je

$$U_q = 1,22 \text{ mV}$$

## 3. Závěr

### 3.1. Analogová část

Nejprve jsem určovala odpor ampérmetru. Pomocí Ohmova zákona jsem přišla k výsledku  $R = (1800 \pm 80) \Omega$  a substituční metodou k výsledku  $R = 1775,7 \Omega$ . Tyto výsledky se téměř shodují, tudíž můžu říct, že obě měření byla správná.

Dále jsem měnila rozsah ampérmetru ze  $100 \mu\text{A}$  na  $0,5 \text{ mA}$ ,  $1 \text{ mA}$  a  $2 \text{ mA}$ . Toto provedu pomocí bočníků s odporem  $0,5 \text{ mA}$ :  $R_B = 450 \Omega$ ;  $1 \text{ mA}$ :  $R_B = 200 \Omega$ ;  $2 \text{ mA}$ :  $94,7 \Omega$ .

Poté jsem ze stejného ampérmetru dělala pomocí předřadníku voltmetr o rozsahu 5 V a 10 V. Předřadníky musí mít odpor 5 V:  $R_p = 47630 \Omega$ ; 10 V:  $R_p = 97220 \Omega$ .

### 3.2. Digitální část

V této části jsem nejprve určovala číselný rozsah osmibitového a šestnáctibitového D/A převodníku. Pro osmibitový je tento rozsah 0 – 255 a pro šestnáctibitový 0 – 65535.

Pro tyto převodníky jsem určovala ještě další vlastnosti – reálný napěťový rozsah, kvantizační krok, chybu offsetu a chybu měřítka. Pro osmibitový mi tyto hodnoty vyšly:  $U_C = 9,877285 \text{ V}$ ;  $U_q = 0,038734 \text{ V}$ ;  $\delta_0 = 1,29 \cdot 10^{-4}$ ;  $\delta_{255} = 0,012014$ . Pro šestnáctibitový:  $U_C = 21,371264 \text{ V}$ ;  $U_q = 3,26 \cdot 10^{-4} \text{ V}$ ;  $\delta_0 = -1,196 \cdot 10^{-3}$ ;  $\delta_{65535} = 1,343 \cdot 10^{-3}$ .

Dále jsem určovala, jaké číslo je třeba zadat do šestnáctibitového převodníku, aby bylo výsledné napětí 3,2 V. Toto číslo je 42546.

Poté jsem zjišťovala vliv vzorkovací frekvence na kvalitu signálu. Výsledkem tohoto měření bylo, že pro signál o frekvenci 1 kHz dává správný signál vzorkovací frekvence 20 kHz a 2 kHz. Frekvence 1 kHz, 1,1 kHz a 100 Hz dávají nesprávný signál. Z toho plyne, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvojnásobná oproti frekvenci signálu. Z tohoto měření jsem také zjistila, že karta nemá antialiasingový filtr.

Nakonec jsem určovala kvantizační krok A/D převodníku. Toto jsem určovala jak ze záznamu signálu, tak přímo výpočtem. Tyto výsledky se shodují.