

MĚŘENÍ MALÝCH PROUDŮ

Jakub Dvořák

18.10.2020

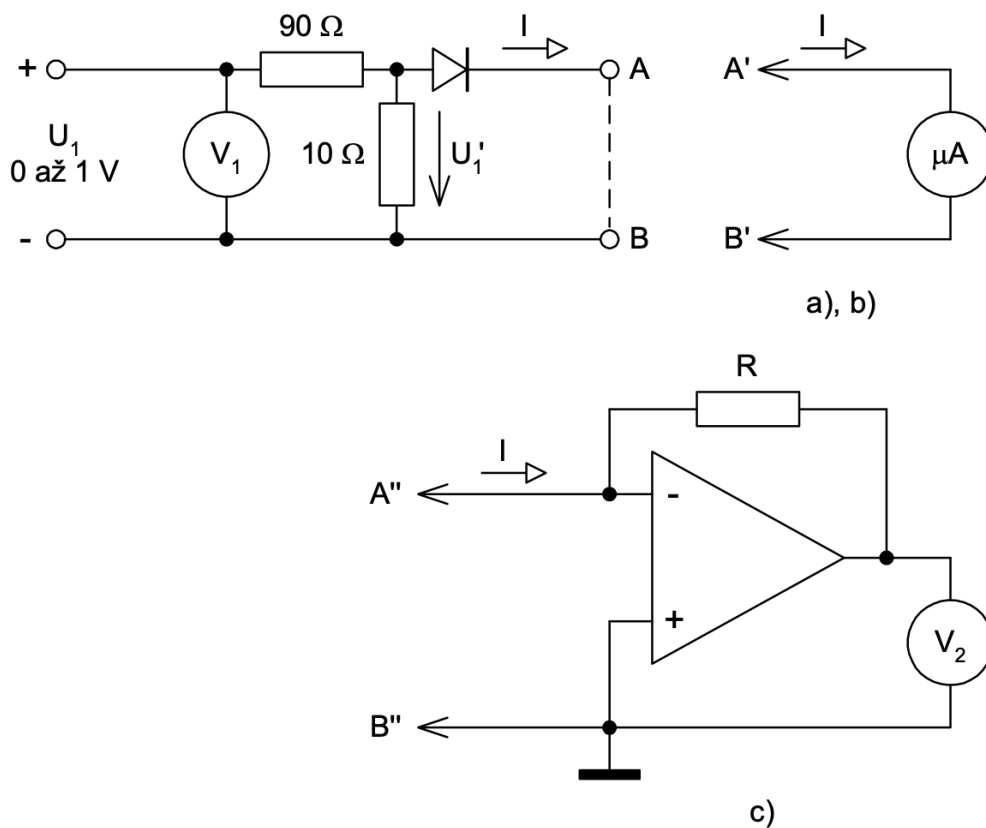


**FACULTY OF
ELECTRICAL ENGINEERING**

1 Úkol měření

1. V zapojení podle obr. 1 změřte proud germaniovou diodou v propustném směru v oblasti malých napětí (20 až 100 mV) v pěti bodech charakteristiky:
 - a) analogovým mikroampérmetrem,
 - b) číslicovým mikroampérmetrem na různých rozsazích,
 - c) pomocí převodníku proud - napětí s operačním zesilovačem, u něhož před měřením určete velikost odporu zpětnovazebního rezistoru R tak, aby převod proud - napětí byl 10^{-5} A/V.
2. Naměřené hodnoty vyneste do společného grafu.
3. Při měření dle 1a) a 1b) určete chybu metody způsobenou vnitřním odporem ampérmetru.
4. Z naměřených hodnot určete **vnitřní odpory použitých mikroampérmetrů**.

2 Schéma zapojení



Obrázek 1: Zapojení pro měření malých proudů [1]

3 Seznam použitých přístrojů

- V_2 - voltmetr číslicový, typ ..., přesnost ...
- μA_1 - mikroampérmetr magnetoelektrický, tř.přes. 0,5, rozsah $150 \mu A$
- μA_2 - mikroampérmetr číslicový, typ GDM-8145 přesnost $\pm(0,3 \% \text{ z rozsahu} + 4 \text{ digity})$, rozsah $200 \mu A$ a 2 mA
- R - přesný rezistor nebo odporová dekáda, přesnost 0,1 % (příp. 0,2 %)
- Př1 - přípravek s odporovým děličem a polovodičovou diodou
- Př2 - přípravek s operačním zesilovačem
- U_1 - zdroj proměnného stejnosměrného napětí s číslicově nastavitelnou hodnotou
- NZ - napájecí zdroj pro OZ

4 Teoretický úvod

Při měření malých proudů ručními ampérmetry nastává chyba měření. Ta je dána relativně vysokým odporem bočníku ampérmetru, na kterém měříme úbytek napětí. Dle obrázku 1 je vidět, že odpor diody, která není vlivem nízkého napětí zcela otevřena, je srovnatelný s odporem ampérmetru. Vinou čehož vznikne dělič napětí se srovnatelnými úbytky napětí na diodě a na ampérmetru. Tato chyba metody jde kompenzovat zvýšením rozsahu a tedy snížením odporu. Zde se ale naměřená hodnota dostane na začátek rozsahu a vzniká zde opět nejistota měření daná *chybou rozsahu*.

5 Naměřené hodnoty

Změřená data jsou v tabulce 1.

Námi změřené hodnoty mají různé předpony i jednotky. Je proto nutné je přepočítat na jednotné jednotky. Pro číslicový ampérmetr stačí hodnoty v mA vynásobit 1000, abychom dostali μA . Pro spočtení napětí na výstupu operačního zesilovače platí:

$$\begin{aligned} I_{in} &= -I_{out} \\ I_{in} &= -\frac{U_{out}}{R} \\ I_{in} &= -\frac{U_{out}}{10\,000} \text{ A}, \end{aligned} \tag{1}$$

Vstupní napětí $\frac{U}{V}$	Ručičkový μ ampérmetr $\frac{I}{\mu A}$ rozsah 150 μA	GDM-8145 $\frac{I}{\mu A}$ rozsah 200 μA	GDM-8145 $\frac{I}{mA}$ rozsah 2 mA	IU Převodník $\frac{U}{V}$ rozsah 2 V
0,2	0,9	1,33	0,0012	-0,0155
0,3	1,4	2,36	0,0024	-0,0277
0,4	2	3,69	0,0041	-0,0448
0,5	2,6	5,39	0,0064	-0,0684
0,6	3,3	7,48	0,0095	-0,1012
0,7	4	10	0,0136	-0,1459
0,8	4,8	12,96	0,0190	-0,2062
0,9	5,25	16,37	0,0260	-0,2867
1	6,4	20,23	0,0349	-0,3926

Tabulka 1: Změřené hodnoty

kde I_{out} je proud protékající diodou, U_{out} je měřené napětí a R je rezistor připojen mezi výstup a invertující vstup operačního zesilovače.

6 Zpracování naměřených hodnot

6.1 Převod na stejné jednotky

Jelikož hodnoty napětí byly měřeny ve voltech a jednotné jednotky jsou μA , je potřeba změřené napětí vydělit $-0,1 \frac{A}{V}$. Přepočtené hodnoty jsou zapsány v tabulce 2 a zobrazeny v grafu 1.

Napětí na děliči $\frac{U}{V}$	Ručičkový μ ampérmetr $\frac{I}{\mu A}$ rozsah 150 μA	GDM-8145 $\frac{I}{\mu A}$ rozsah 200 μA	GDM-8145 $\frac{I}{\mu A}$ rozsah 2 mA	IU Převodník $\frac{I}{\mu A}$ rozsah 2 V
0,02	0,9	1,33	1,2	1,55
0,03	1,4	2,36	2,4	2,77
0,04	2	3,69	4,1	4,48
0,05	2,6	5,39	6,4	6,84
0,06	3,3	7,48	9,5	10,12
0,07	4	10	13,6	14,59
0,08	4,8	12,96	19	20,62
0,09	5,25	16,37	26	28,67
0,1	6,4	20,23	34,9	39,26

Tabulka 2: Přepočtené hodnoty

Nejistotu pro ručičkový ampérmetr spočítáme pomocí vzorce

$$u(I_{rv}) = \frac{TP \cdot rozsah}{100 \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,5 \cdot 150 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot \sqrt{3}} = 0,433 \mu A. \quad (2)$$

Napětí na děliči	GDM-8145 $\frac{U}{\mu A}$ rozsah 200 μA	GDM-8145 $\frac{U}{\mu A}$ rozsah 2 mA
0,02	0,000139	0,001175
0,03	0,000156	0,001196
0,04	0,000179	0,001226
0,05	0,000209	0,001266
0,06	0,000245	0,001319
0,07	0,000289	0,001390
0,08	0,000340	0,001484
0,09	0,000399	0,001605
0,10	0,000466	0,001759

Tabulka 3: Nejistoty měření pro různé rozsahy a hodnoty

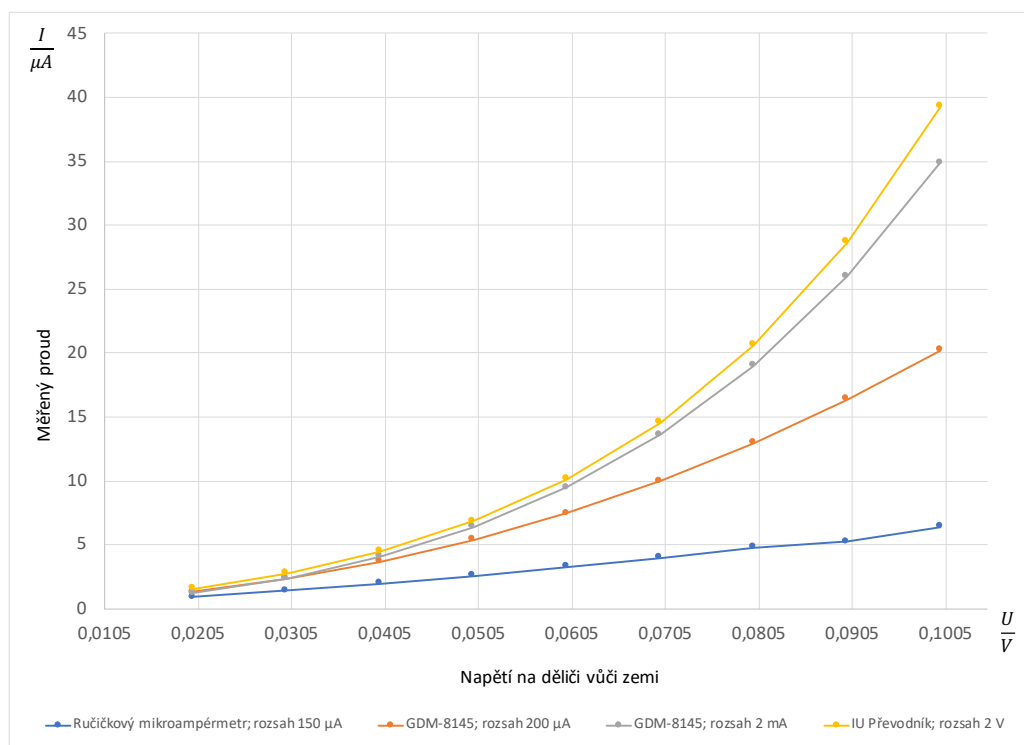
Nejistotu pro číslicový ampérmetr s rozsahem 200 μA spočítáme následovně:

$$i(I_v) = \frac{\delta_1 X + \delta_2 M}{100\sqrt{3}} = \frac{0,3\% \cdot I + 2 \cdot \frac{200}{20000}}{100\sqrt{3}} \mu A \quad (3)$$

a pro rozsah 2 mA

$$i(I_v) = \frac{\delta_1 X + \delta_2 M}{100\sqrt{3}} = \frac{0,3\% \cdot I[\mu A] + 2 \cdot \frac{2 \cdot 10^3}{20000}}{100\sqrt{3}} \mu A. \quad (4)$$

Výsledné nejistoty jsou v tabulce 3.



Graf 1: Naměřené hodnoty přepočtené na μA

6.2 Nejistota IU převodníku

Pro určení nejistoty měření proudu z měření napětí musíme parciálně zderivovat rovnici 1 podle všech proměnných. Celý postup je v rovnici 5.

$$\begin{aligned} u_{OZ}(I_{OZ}) &= \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial R} \cdot u(R)\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial U} \cdot u(U)\right)^2 + (u(I_0))^2} \\ u_{OZ}(I_{OZ}) &= \sqrt{\left(-\frac{U}{R^2} \cdot u(R)\right)^2 + \left(\frac{1}{R} \cdot u(U)\right)^2 + (u(I_0))^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Po dosazení dostaneme:

$$u_{OZ}(I_{OZ}) = \sqrt{\left(\frac{U}{R^2} \cdot u(R)\right)^2 + \left(-\frac{1}{R} \cdot u(U)\right)^2 + (u(I_0))^2}$$

6.3 Chyba měření mikroampérmetrů

Pro zjištění relativní hodnoty musíme nejdříve znát absolutní chybu Δ_{met} , kterou spočítáme jako

$$\Delta_{\text{met}} = N - S. \quad (6)$$

Absolutní chybu metody následně spočítáme pomocí rovnice

$$\delta_{\text{met}} = \frac{\Delta_{\text{met}}}{S}. \quad (7)$$

Rovnice 7 jde poté upravit do tvaru:

$$\delta_{\text{met}} = \frac{N - S}{S}, \quad (8)$$

kde N je naměřená hodnota a S je skutečná hodnota. Jelikož jsme stanovili odpor UI převodníku za nulový, můžeme hodnotu jím naměřenou považovat za skutečnou a hodnotu naměřenou ručičkovým resp. číslicovým ampérmetrem s ní porovnávat.

Jednotlivé relativní chyby pro analogový ampérmetr a číslicový ampérmetr s dvěma různými rozsahy jsou v tabulce 4.

V absolutní hodnotě jsou data v tabulce 5 Chyba metody je zobrazena v grafu 2.

Napětí na děliči	Ručičkový μ ampérmetr rozsah 150 μ A	GDM-8145 rozsah 200 μ A	GDM-8145 rozsah 2 mA
0,02	-0,4194	-0,1419	-0,2258
0,03	-0,4946	-0,1480	-0,1336
0,04	-0,5536	-0,1763	-0,0848
0,05	-0,6199	-0,2120	-0,0643
0,06	-0,6739	-0,2609	-0,0613
0,07	-0,7258	-0,3146	-0,0679
0,08	-0,7672	-0,3715	-0,0786
0,09	-0,8169	-0,4290	-0,0931
0,1	-0,8370	-0,4847	-0,1111

Tabulka 4: Relativní chyby metody

Napětí na děliči	Ručičkový μ ampérmetr rozsah 150 μ A	GDM-8145 rozsah 200 μ A	GDM-8145 rozsah 2 mA
0,02	41,94	14,19	22,58
0,03	49,46	14,80	13,36
0,04	55,36	17,63	8,48
0,05	61,99	21,20	6,43
0,06	67,39	26,09	6,13
0,07	72,58	31,46	6,79
0,08	76,72	37,15	7,86
0,09	81,69	42,90	9,31
0,10	83,70	48,47	11,11

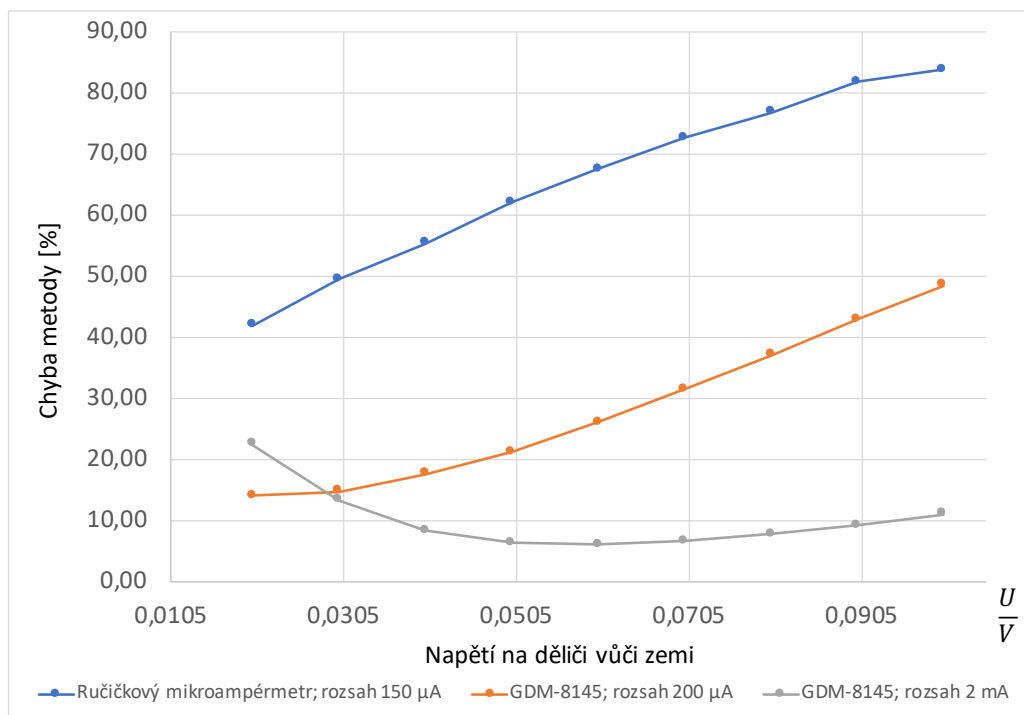
Tabulka 5: Relativní chyby metody v procentech

6.4 Měření vnitřního odporu ampérmetru

Pro jednotlivé kroky napětí použijeme ohmův zákon pro výpočet odporu diody a tento odpor následně odečteme od celkového odporu tj. i s ampérmetrem. Platí tedy následující rovnice:

$$R_A = \frac{U}{I_A} - \frac{U}{I_{ref}}, \quad (9)$$

kde U je napětí na děliči, I_A je proud změřený ampérmetrem, který nás zajímá a I_{ref} je referenční hodnota proudu - proud změřený UI převodníkem. Dosazením dat do vzorce dostaneme následující tabulku 6 a graf 3.



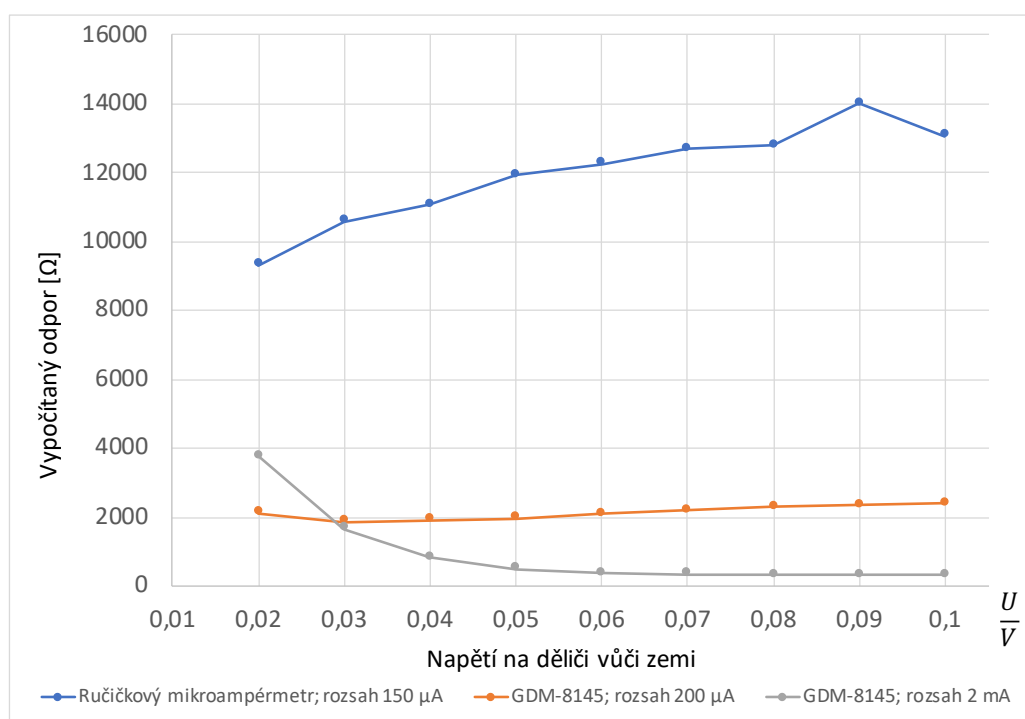
Graf 2: Relativní chyba metody v závislosti na měřeném napětí

Napětí na děliči	Ručičkový μ ampérmetr $\frac{R}{\Omega}$ rozsah 150 μ A	GDM-8145 $\frac{R}{\Omega}$ rozsah 200 μ A	GDM-8145 $\frac{R}{\Omega}$ rozsah 2 mA
0,02	9319	2134	3763
0,03	10598	1882	1670
0,04	11071	1912	828
0,05	11921	1966	503
0,06	12253	2093	387
0,07	12702	2202	349
0,08	12787	2293	331
0,09	14004	2359	322
0,10	13078	2396	318

Tabulka 6: Spočítaný vnitřní odpor ampérmetrů

7 Závěrečné vyhodnocení

Zjistili jsme, že při měření malých proudů je měření zatíženo relativně velkou chybou. U ručičkového přístroje relativní chyba dosahovala hodnoty až 83 % a u číslicového přístroje šlo o relativní chybu 48 % v rozsahu μ A a 11 % v rozsahu 2 mA. Bohužel při vyšším rozsahu se posouvá hodnota na začátek rozsahu a tím se zvyšuje nejistota typu B, jak je vidět v tabulce 3. Nejlepší možností je tedy použít operační zesilovač, díky kterému docílíme téměř nulového odporu.



Graf 3: Závislost naměřeného odporu na vstupním napětí

Seznam použité literatury a zdrojů informací

Seznam použitých internetových zdrojů

[1] Návod k laboratorní úloze