# 2.1. Úvod

### 2.1.1. Měření stejnosměrných proudů multimetrem

Elektrický proud [A] je jedinou elektrickou veličinou v soustavě SI. Proud potřebujeme měřit např. při konstrukci, oživování a opravách elektronických zařízení. Multimetr v režimu měření proudu měří úbytek napětí na rezistoru (tzv. bočníku) a rozsahy se přepínají změnou jeho odporu.

Měříme-li tedy např. proud odebíraný číslicovým obvodem, vzniká zde chyba metody (odpor obvodu se zvětší o odpor bočníku a změřený proud je menší, než bez zapojeného multimetru), jejíž velikost mimo jiné závisí i na použitém rozsahu. Použijeme-li (v rozporu se základními pravidly volby měřicího rozsahu) větší rozsah, než by odpovídal měřenému proudu, tato chyba metody klesne.

Na druhé straně ale vzroste nejistota měření (složka nejistoty daná chybou z rozsahu). Je nutné tedy řešit následující dilema: měřit s malou nejistotou metodicky chybnou hodnotu, nebo s větší nejistotou hodnotu s menší metodickou chybou.

#### 2.1.2. Měření stejnosměrných proudů převodníkem A-V s operačním zesilovačem

Výše uvedená chyba metody nevzniká v případě, že vstupní odpor měřicího zařízení je roven nule. To splňuje např. převodník proud – napětí s operačním zesilovačem, viz obr. 1b. Ten lze s běžnými operačními zesilovači použít pro měření proudu řádově do desítek mA s tím, že při měření velmi malých proudů je třeba vzít v úvahu velikost vstupních klidových proudů použitého OZ.

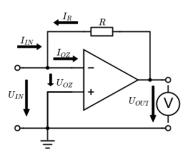
### 2.1.3. Měření větších stejnosměrných proudů klešťovým ampérmetrem

Pro měření proudů větších než desítky mA však nelze převodník proud – napětí s běžným operačním zesilovačem použít. V těchto případech se pro měření proudu bez chyby metody způsobené úbytkem napětí na bočníku používají klešťové ampérmetry s převodníky na magnetickém principu. Zde navíc není nutné obvod před měřením rozpojovat.

# 2.2. Domácí příprava

**2.2.1.** Odvoď te vztah pro určení měřeného proudu z výstupního napětí převodníku proud – napětí s operačním zesilovačem.  $U_{IN}$ 

$$I_{IN} = -I_R \pm I_{OZ} \wedge U_{OUT} = R \cdot I_R \Rightarrow I_{IN} = -\frac{U_{OUT}}{R} \pm I_{OZ}$$



- **2.2.2.** Odvoď te vztah pro určení nejistoty měření proudu převodníkem proud napětí s OZ
  - a) v případě ideálního OZ;
  - b) v případě reálného OZ (vliv vstupní napěťové nesymetrie zanedbejte).

$$u_{f(x_1,...,x_n)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\frac{\partial f}{\partial x_i}(X_i) \cdot u_{x_i})^2}; \ u_x = \frac{\Delta_x}{\sqrt{3}}; \ \Delta_x = \frac{\delta_1}{100}x + (0, \frac{\delta_2}{100}M, N \cdot R_\Delta)$$

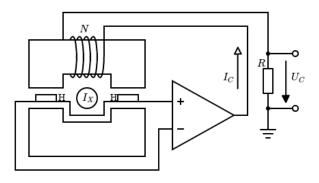
a) 
$$I_{IN} = -U_{OUT}/R \Rightarrow u_{I_{IN}(id)} = \sqrt{(\frac{-1}{R}u_{U_{OUT}})^2 + (\frac{U_{OUT}}{R^2}u_R)^2}$$

b) 
$$I_{IN} = -I_R \pm I_{OZ} \Rightarrow u_{I_{IN}} = \sqrt{u_{I_{IN}(id)}^2 + (\frac{I_{OZ}}{\sqrt{3}})^2} = \sqrt{(\frac{-1}{R}u_{U_{OUT}})^2 + (\frac{U_{OUT}}{R^2}u_R)^2 + \frac{I_{OZ}^2}{3}}$$

**2.2.3.** Nakreslete principiální zapojení převodníku proud – napětí pracujícího na magnetickém principu a odvoď te vztah pro určení měřeného proudu z výstupního napětí.

Hallova sonda (aktivní) generuje napětí v závislosti na magnetickém poli měřeném v mezeře ve feritovém jádře indukovaném vodičem, to je zesílen OZ a veden N závity přes feritové jádro, což anuluje celkový magnetický tok v jádře, dvě symetricky umístěné Hallovy sondz se používají pro kompenzaci vlivů vnějšího magnetického pole.

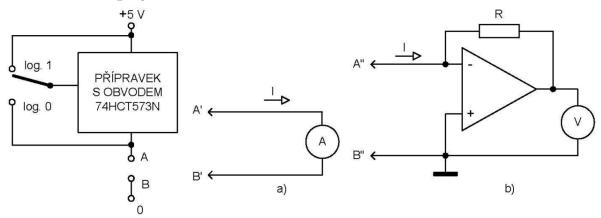
$$I_X = N \cdot I_C = N \cdot \frac{U_C}{R}$$



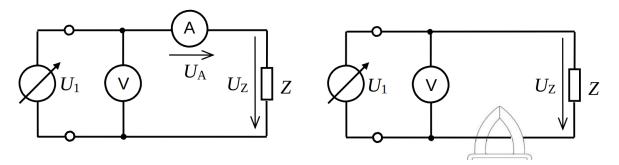
## 2.3. Úkol měření

- 2.3.1. Zapojte měřicí obvod dle obr. 1.1a a následně i podle obr. 1.1b
- **2.3.2.** Změřte napájecí proud budiče sběrnice 74HCT573N pro logické úrovně "log. 1" a "log. 0" na vstupech. Obě měření proveďte:
  - a) multimetrem v režimu měření proudu (pro logickou úroveň "log.1" na 2 rozsazích),
  - b) převodníkem I/U.
- **2.3.3.** Pro případ a) určete nejistotu údaje přístroje a chybu metody.
- **2.3.4.** Pro případ b) určete nejistotu měření proudu I včetně vlivu vstupního klidového proudu OZ (7 nA).
- **2.3.5.** Zapojte měřicí obvod dle obr. 2.2.
- **2.3.6.** Změřte proud zátěží 1,1  $\Omega$  při napájení ze zdroje napětí  $U_1 = 5$  V. Měření proveďte:
  - a) multimetrem v režimu měření proudu
  - b) klešťovým ampérmetrem.
- 2.3.7. Pro případ a) určete chybu metody, pro případ b) nejistotu údaje přístroje.

# 2.4. Schéma zapojení



Obr. 2.1. Zapojení pro měření napájecího proudu budiče sběrnice



Obr. 2.2. Zapojení pro měření napájecího proudu zátěže 1  $\Omega$ 

## 2.5. Poznámky k měření

- **2.5.1.** Při měření proudu převodníkem I/U pro logickou úroveň "log.0" použijte ve zpětné vazbě rezistor s odporem 1 M $\Omega$
- 2.5.2. Tolerance použitých rezistorů jsou uvedeny na přípravcích.
- 2.5.3. Měření klešťovým přístrojem

Přístroj se zapne otočením přepínače volby měřené veličiny do polohy, při které žlutá značka na hmatníku ukazuje na symbol měřené veličiny. Po zapnutí proběhne autotest, při němž se krátkodobě zobrazí všechny segmenty zobrazovacího displeje. Dále následuje autokalibrace, kdy se na displeji zobrazí nápis "CAL". Během autokalibrace, trvající asi 15 s, se provádí i kompenzace zbytkového magnetického pole v obvodu kleští, jimiž přitom nesmí procházet vodič s proudem. Po autokalibraci se přístroj nastaví do automatické volby měřicího rozsahu daného polohou přepínače a na displeji je zobrazena funkce "AUTO".

Přístroj umožňuje jak měření stejnosměrného, tak střídavého proudu, popř. střídavého proudu se stejnosměrnou složkou. To je na displeji indikováno jako "AC + DC".

Pokud nelze okamžitě odečítat údaj měřené veličiny, je možno aktuální měřenou hodnotu uchovat stisknutím tlačítka "HOLD". Stav se zruší následným stisknutím tohoto tlačítka, přičemž se obnoví měření.

Pokud je měřená veličina mimo rozsah přístroje, objeví se na displeji L L L L L.

Měření proudu se provede po ukončení autokalibrace, kdy se v poloze přepínače A čelistmi přístroje obepne vodič s měřeným proudem. Znaménko údaje bude odpovídat skutečnosti, pokud měřený proud bude vstupovat do magnetického obvodu čelistí ve směru šipky vyznačené na pouzdru přístroje v prostoru magnetického obvodu.

2.3.2.a

budeme-li chtít určit chybu metody, budeme muset zohlednit nenulový vnitřní odpor ampérmetru, což způsobuje úbytek napětí, obvodem v místě měření před zapojením ampérmetru protékal proud  $I_X$  roven podílu napětí zdroje  $U_0$  a celkového odporu  $R_0$ , po zapojení ampérmetru se k celkovému odporu přidává sériově ještě jeho vnitřní odpor  $R_A$ , a tak bude měřený proud  $I_x$  menší než proud skutečný, platí:

$$(I_X = \frac{U_0}{R_0}) > (I_x = \frac{U_0}{R_0 + R_A})$$

$$U_0 = I_x \cdot (R_0 + R_A) = I_x R_0 + U_A \Rightarrow \frac{U_0 - U_A}{I_x} = R_0$$

$$I_X = \frac{U_0}{R_0} = \frac{U_0}{U_0 - U_A} I_x$$

pro výpočet skutečného proudu pak zvolíme vzorec:

$$I_X = \frac{U_0}{U_0 - U_A} (I_x \pm u_{I_x}) = \frac{U_0}{U_0 - U_A} (I_x \pm \frac{1}{\sqrt{3}} (\frac{\delta_1}{100} I_x + R_\Delta N))$$

multimetrem M s rozsahem M=50 mA byl při sepnutí "1" naměřen proud  $I_x=1.959$  mA

$$I_X = \frac{5}{5 - 0.08} (1.959 \pm \frac{1}{\sqrt{3}} (\frac{0.05}{100} 1.959 + 10^{-3} \cdot 4)) \text{mA} = \frac{125}{123} (1.959 \pm 0.003) \text{mA}$$

$$I_x = (1.959 \pm 0.003) \text{mA}$$
  $I_X = (1.991 \pm 0.003) \text{mA}$   $\Delta_{I_{Xx}} = 0.032 \text{ mA}$ 

multimetrem M s rozsahem M=5 mA byl při sepnutí "1" naměřen proud  $I_x=1.8832$  mA

$$I_X = \frac{5}{5 - 0.6} (1.8832 \pm \frac{1}{\sqrt{3}} (\frac{0.05}{100} 1.8832 + 10^{-4} \cdot 4)) \text{mA} = \frac{25}{22} (1.8832 \pm 0.0008) \text{mA}$$

$$I_x = (1.8832 \pm 0.0008) \text{mA} \qquad I_X = (2.1400 \pm 0.0009) \text{mA} \qquad \Delta_{I_{Xx}} = 0.2568 \text{ mA}$$

multimetrem M s rozsahem  $M=500~\mu\mathrm{A}$  byl při sepnutí "0" naměřen proud  $I_x=0.03~\mu\mathrm{A}$ 

$$I_X = \frac{5}{5 - 0.06} (0.03 \pm \frac{1}{\sqrt{3}} (\frac{0.05}{100} 0.03 + 10^{-2} \cdot 5)) \mu A = \frac{250}{247} (0.03 \pm 0.003) \mu A$$

$$I_x = (0.03 \pm 0.003)\mu A$$
  $I_X = (0.03 \pm 0.003)\mu A$   $\Delta_{I_{Xx}} = 0.00 \ \mu A$ 

T. 3.1. Výsledky přímého měření  $I_X$ 

M	log	$I_x$	$I_X$	$\Delta_{I_{Xx}}$	[I]
50	"1"	$1.959 \pm 0.003$	$1.991 \pm 0.003$	0.032	mA
5	"1"	$1.8832 \pm 0.0008$	$2.1400 \pm 0.0009$	0.2568	mA
500	"0"	$0.03 \pm 0.003$	$0.03 \pm 0.003$	0.00	$\mu A$

#### 2.3.2.b

pro výpočet vstupního proudu, pokud nezohledníme chybu metody měření voltmetrem, použijeme vzorec:

$$I_X = I_x \pm I_{OZ} = -\frac{U_x}{R} \pm \sqrt{(\frac{-1}{R}u_{U_x})^2 + (\frac{U_x}{R^2}u_R)^2 + \frac{I_{OZ}^2}{3})}$$
$$I_X = -\frac{U_x}{R} \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\frac{-1}{R}(\frac{\delta_1}{100}I_x + R_\Delta N))^2 + (\frac{U_x}{R}\frac{\delta_1}{100})^2 + I_{OZ}^2)}$$

multimetrem M s rozsahem  $M=50~{\rm V}$  bylo při sepnutí "1" a zapojení rezistoru  $R_1$  naměřeno napětí  $U=-12.521~{\rm V}$ 

$$I_X = \left(-\frac{-12.521}{10^6} \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{-1}{10^6} \left(\frac{0.02}{100} 12.521 + 10^{-3} \cdot 4\right)\right)^2 + \left(\frac{-12.521}{10^6} \frac{0.1}{100}\right)^2 + (7 \cdot 10^{-9})^2\right)}\right) A$$

$$I_X = \left(12.521 \pm 0.009\right) \mu A \qquad I_X = 12.521 \ \mu A \pm 0.07\%$$

multimetrem M s rozsahem  $M=500~{\rm mV}$  bylo při sepnutí "0" a zapojení rezistoru  $R_1$  naměřeno napětí  $U=-23.87~{\rm mV}$ 

$$I_X = \left(-\frac{-23.87}{10^6} \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{-1}{10^6} \left(\frac{0.02}{100} 23.87 + 10^{-2} \cdot 4\right)\right)^2 + \left(\frac{-23.87}{10^6} \frac{0.1}{100}\right)^2 + (7 \cdot 10^{-6})^2\right)}\right) \text{ mA}$$

$$I_X = \left(0.024 \pm 0.004\right) \mu \text{A} \qquad I_X = 0.024 \ \mu \text{A} \pm 17\%$$

multimetrem M s rozsahem M=5 V bylo při sepnutí "1" a zapojení rezistoru  $R_2$  naměřeno napětí U=-1.9458 V

$$I_X = \left(-\frac{-1.9458}{10^3} \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{-1}{10^3} \left(\frac{0.02}{100} 1.9458 + 10^{-4} \cdot 4\right)\right)^2 + \left(\frac{-1.9458}{10^3} \frac{0.1}{100}\right)^2 + (7 \cdot 10^{-9})^2\right)}\right) \text{ A}$$

$$I_X = \left(1.9458 \pm 0.0012\right) \text{ mA} \qquad I_X = 1.9458 \text{ mA} \pm 0.06\%$$

multimetrem M s rozsahem  $M=500~{\rm mV}$  bylo při sepnutí "0" a zapojení rezistoru  $R_1$  naměřeno napětí  $U=-0.08~{\rm mV}$ 

$$I_X = \left(-\frac{-0.08}{10^3} \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{-1}{10^3} \left(\frac{0.02}{100} 0.08 + 10^{-2} \cdot 4\right)\right)^2 + \left(\frac{-0.08}{10^3} \frac{0.1}{100}\right)^2 + (7 \cdot 10^{-6})^2\right)}\right) \text{ mA}$$

$$I_X = \left(0.08 \pm 0.02\right) \mu \text{A} \qquad I_X = 0.08 \ \mu \text{A} \pm 29\%$$

T. 3.2. Výsledky měření  $I_X$  převodníkem U/I

R	log	$I_X$	$u_{I_X}$	$u_{I_X,rel}$	[I]
$1~\mathrm{M}\Omega$	"1"	12.521	0.009	0.07%	$\mu A$
$1~\mathrm{M}\Omega$	"0"	0.024	0.004	17%	$\mu A$
$1 \text{ k}\Omega$	"1"	1.9458	0.0012	0.06%	mA
$1 \text{ k}\Omega$	"0"	0.08	0.02	29%	$\mu A$

#### 2.3.6.a

v našem případě jsme měřili proud přímo přes jeho generátor GM, který ukazoval hodnotu  $I_x = 4.11$  A, zde nebudu určovat chybu metody, protože se jedná o jedno zařízení, ale pouze nejistotu měření, za použití vzorce:

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{\delta_1}{100} x + N \cdot R_{\Delta} \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{1}{100} 4.11 + 2 \cdot 0.010 \right) \text{ A} = 0.035 \text{ A}$$
$$I_X = (4.11 \pm 0.04) \text{ A} \qquad I_X = 4.11 \text{ A} \pm 0.9\%$$

napětí na rezistorech bylo měřeno multimetrem M, který ukazoval hodnotu  $U_M = 5.000 \text{ V}$ , zatímco generátor zobrazil  $U_G = 5.2 \text{ V}$ , tento rozdíl mohl být způsoben úbytkem napětí na ampérmetru v generátoru, měřících kabelech a na paralelním odporu multimetru M

#### 2.3.6.b

klešťovým ampérmetrem A bzl naměřen proud  $I_x = 4.11$  A, nejistotu měření určíme ze vzorce:

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} (\frac{\delta_2}{100} M) = \frac{1}{\sqrt{3}} (\frac{2}{100} 39.99) \text{ A} = 0.4617 \text{ A}$$
  
 $I_X = (4.11 \pm 0.46) \text{ A}$   $I_X = 4.11 \text{ A} \pm 11\%$ 

## 2.6. Seznam použitých přístrojů a obvodvých prvků

		v i			
zn.	přístroj/prvek	specifikace			
G	generátor	TESLA BK 125: $U_Z$ =5V			
GM	DC generátor/	UTP1305: $R_{\Delta}(V) = 100 \text{ mV}, R_{\Delta}(I) = 10 \text{ mA}$			
	multimetr	$Ac \le \pm (1\% \text{ of } rdg + 2 \text{ dig})$			
M		$DCV[M = 500 \text{ mV}]: R_{\Delta} = 10 \ \mu\text{V},  Ac = \pm (0.02\% \text{ of } rdg + 4 \text{ dig})$			
		DCV[M = 5 V]: $R_{\Delta} = 100 \ \mu\text{V}, \text{ Ac} = \pm (0.02\% \text{ of } \text{rdg} + 4 \text{ dig})$			
	multimetr	DCV[M = 50 V]: $R_{\Delta} = 1 \text{ mV},  Ac = \pm (0.02\% \text{ of } rdg + 4 \text{ dig})$			
	Agilent	DCI[M = 500 $\mu$ A]: $R_{\Delta} = 10 \text{ nA}$ , Ac = $\pm (0.05\% \text{ of } rdg + 5 \text{ dig})$			
	Technologies	DCI[M = 5 mA]: $R_{\Delta} = 100 \text{ nA}, \text{ Ac} = \pm (0.05\% \text{ of } rdg + 4 \text{ dig})$			
	U3401A	DCI[M = 50 mA]: $R_{\Delta} = 1 \mu A$ , $Ac = \pm (0.05\% \text{ of } rdg + 4 \text{ dig})$			
		DCI: U(500 $\mu$ A)< 0.06 V, U(5 mA)< 0.6 V, U(50 mA)< 0.08 V			
		DCV: $Z(500 \text{ mV}) = 10 \text{ M}\Omega$ , $Z(5 \text{ V}) = 11.1 \text{ M}\Omega$ , $Z(50 \text{ V}) = 10.1 \text{ M}\Omega$			
A	ampérmetr	PK 430.1: DCI[M = 39.99 A]: $R_{\Delta} = 0.01$ A, $Ac = \pm (2\% \text{ of range})$			
OZ	zesilovač	OP 07 CP: $I_{OZ}$ =1800/7000 pA			
$R_1$	rezistor	$R_1=1 M\Omega, Ac = \pm 0.1\%$			
$R_2$	rezistor	$R_2=1 \text{ k}\Omega, Ac = \pm 0.1\%$			
$R_Z$	rezistor	$R_Z = 101 \Omega = (202  202) \Omega$			

# 2.7. Závěrečné vyhodnocení

při přímém měření proudu je nutné volit rozsah dle jeho úbytku napětí; při měření na U/I převodníku se pro různé odpory v invertujícím zapojení OZ naměřené velikosti proudů výrazně liší, nepovažuji tak toto zapojení vhodné pro měření proudů; klešťový ampérmetr má tu výhodu, že nezasahuje do obvodu, má ale zase větší relativní nejistotu měření oproti přímé metodě; při průtoku proudu rezistory se část energie přemění na teplo