

# ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18\_056/0013239

## Měření elektrického proudu

Přednáška KET/ELM

J. Švarný



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

**MŠMT**  
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

# Měření elektrického proudu

## Obsah

- Etalony DC proudu
- Vliv odporu ampérmetru
- Přístroje pro měření DC proudu
- Měření AC proudu – základní definice
- Přístroje pro měření AC proudu
- Změna rozsahu ampérmetru
- Literatura

# Měření elektrického proudu

## Etalony DC proudu

- Proudové váhy

Princip: srovnávání silového působení elektrického proudu procházejícího vodiči a zemské přitažlivosti.

- Kvantové etalony napětí a odporu a Ohmův zákon

Princip: Generování proudu pomocí kvantového etalonu napětí a kvantového etalonu odporu. Dle Ohmova zákona:

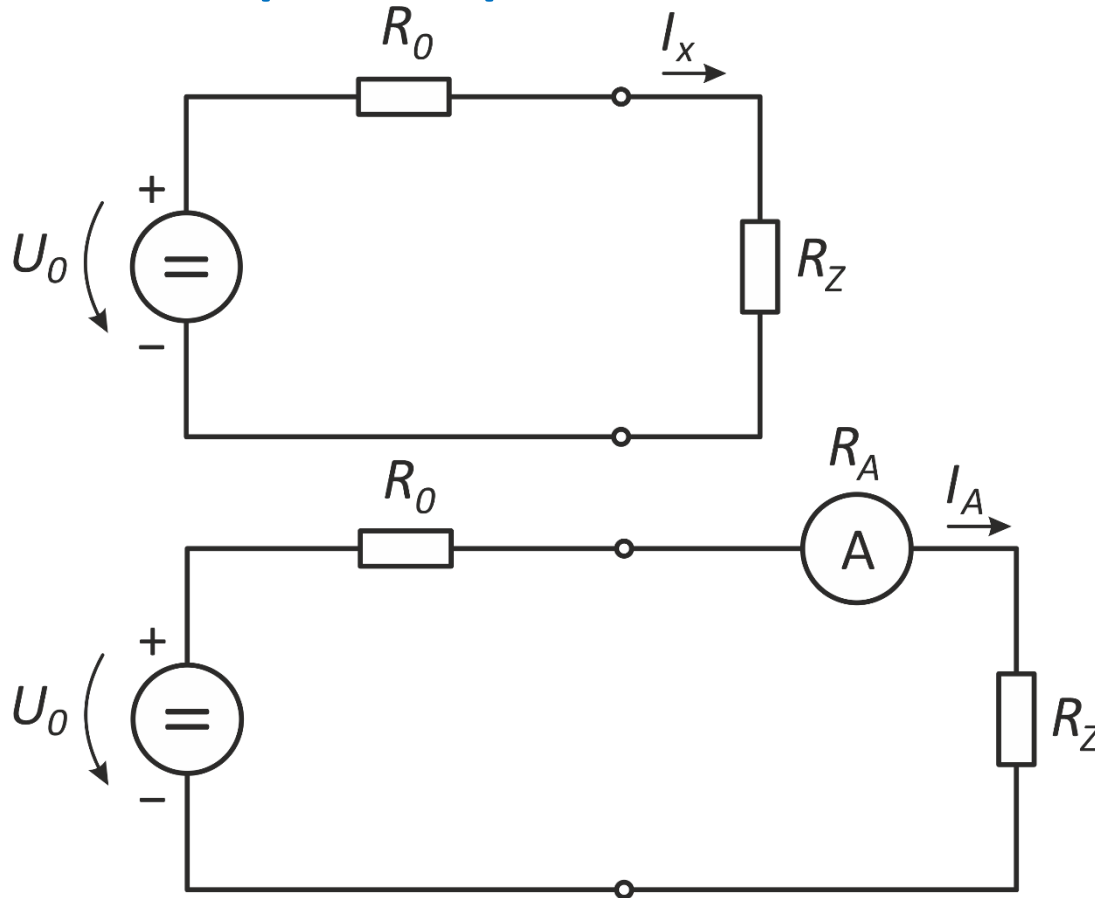
$$I = \frac{U}{R}$$



*Proudové váhy*

# Měření elektrického proudu

## Vliv odporu ampérmetru



$R_0$ ...vnitřní odpor zdroje

$R_Z$ ...odpor měřené větve

$R_A$ ...vnitřní odpor A-metru

$$R_A > 0 \Rightarrow I_X \neq I_A$$

$$I_X = \frac{U_0}{R_0 + R_Z}$$

$$I_A = \frac{U_0}{R_0 + R_Z + R_A}$$

Absolutní chyba:

$$\Delta = I_A - I_X =$$

$$\frac{U_0}{R_0 + R_Z + R_A} - \frac{U_0}{R_0 + R_Z}$$

# Měření elektrického proudu

## Vliv odporu ampérmetru

Procentní chyba:

$$\begin{aligned}\delta_{\%} &= \frac{\Delta}{I_X} 100 = \frac{\frac{U_0}{R_0 + R_Z + R_A} - \frac{U_0}{R_0 + R_Z}}{\frac{U_0}{R_0 + R_Z}} 100 = \\ &= \left( \frac{R_0 + R_Z}{R_0 + R_Z + R_A} - 1 \right) 100 = \frac{-R_A}{R_0 + R_Z + R_A} 100 \cong \frac{-R_A}{R_0 + R_Z} 100\end{aligned}$$

Zapojením A-metru do obvodu vzniká systematická chyba, jejíž procentní hodnota  $\delta_{\%}$  je dána poměrem vnitřního odporu  $R_A$  k celkovému odporu obvodu ( $R_0 + R_Z + R_A$ ).

Ideální ampérmetr má  $R_A = 0$ .

# Měření DC proudu - přístroje

## Magnetoelektrické A-metry

- Rozsahy:  $\sim 10 \mu\text{A}$  až  $\sim 1 \text{ A}$
- Omezená přesnost měření
- Relativně levné

### Příklad: MX1 (Metrix), [1]:

- $A_{\text{DC}}$  rozsahy:  $50 \mu\text{A}$  až  $10 \text{ A}$
- Úbytek na plnou výchylku:  $0,5 \text{ V}$  až  $1,2 \text{ V}$  (dle rozsahu)
- $TP: 2$



Multimetr MX1 (Metrix)

# Měření DC proudu - přístroje

## Digitální multimetry

- $A_{DC}$  rozs.:  $\sim 100 \mu\text{A}$  až  $\sim 1 \text{ A}$
- Rozlišení: až  $10 \text{ nA}$  (lab. př.)
- Vysoká přesnost
- Vyšší cena



Multimetr 34401A

### Příklad: 34401A (Keysight), [2]:

- $A_{DC}$  rozs.:  $10 \text{ mA}$  až  $3 \text{ A}$
- Rozlišení:  $10 \text{ nA}$   
(nejnižší rozsah)
- Úbytek:  
 $0,1 \text{ V}$  až  $2 \text{ V}$   
(dle rozs.)
- Přesnost viz specifikace

#### Accuracy Specifications $\pm$ (% of reading + % of range)<sup>1</sup>

Function	Range <sup>3</sup>	Frequency, etc.	24 Hour <sup>2</sup> 23°C $\pm$ 1°C	90 Day 23°C $\pm$ 5°C	1 Year 23°C $\pm$ 5°C	Temperature Coefficient 0°C – 18°C 28°C – 55°C
DC current	10.00000 mA	< 0.1 V Burden Voltage	0.005 + 0.010	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.0020 + 0.0020
	100.0000 mA	< 0.6 V	0.010 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.0020 + 0.0005
	1.000000 A	< 1.0 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.0050 + 0.0010
	3.00000 A	< 2.0 V	0.100 + 0.020	0.120 + 0.020	0.120 + 0.020	0.005 + 0.0020
True rms AC current <sup>4</sup>	1.000000 A	3 Hz – 5 Hz	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.006
		5 Hz – 10 Hz	0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.035 + 0.006
		10 Hz – 5 kHz	0.10 + 0.04	0.10 + 0.04	0.10 + 0.04	0.015 + 0.006
3.00000 A	3 Hz – 5 Hz	1.10 + 0.06	1.10 + 0.06	1.10 + 0.06	0.100 + 0.006	
	5 Hz – 10 Hz	0.35 + 0.06	0.35 + 0.06	0.35 + 0.06	0.035 + 0.006	
	10 Hz – 5 kHz	0.15 + 0.06	0.15 + 0.06	0.15 + 0.06	0.015 + 0.006	

# Měření DC proudu - přístroje

## Zpětnovazební A-metry

- Měření velmi malých proudů:  $\sim 1$  pA až  $\sim 1$  mA
- Princip: OZ ve funkci TIA (převodník I/U s nulovým úbytkem napětí na vstupu) viz dále – měřicí převodníky

### Příklad: PD750, TTI, [3]:

- Rozs.:  $\pm 20$  nA až  $\pm 20$  mA
- Rozlišení: 1 pA (min. rozs.)
- Chyba:  $\pm(0,05\% + 2 \text{ digs})$
- A/W konstanta:  $0,1 \div 1$
- Předpětí:  $-14$  V až  $+14$  V

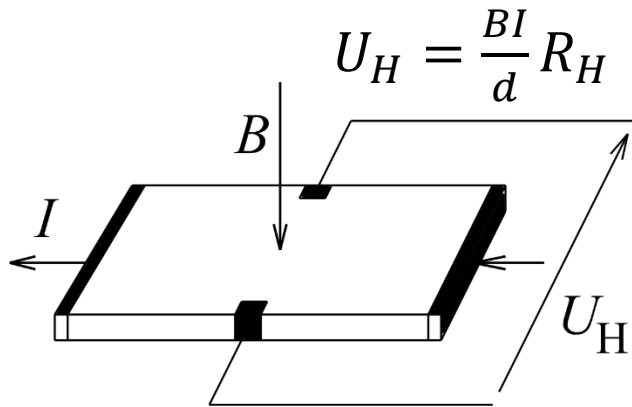


*PD750 Photodiode Amplifier –  
Terahertz Technologies Inc.  
(převzato z: [www.teratec.us](http://www.teratec.us))*

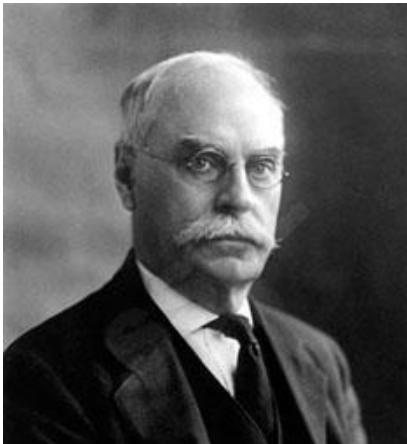
# Měření DC proudu - přístroje

## Převodník I/U s Hallovou sondou

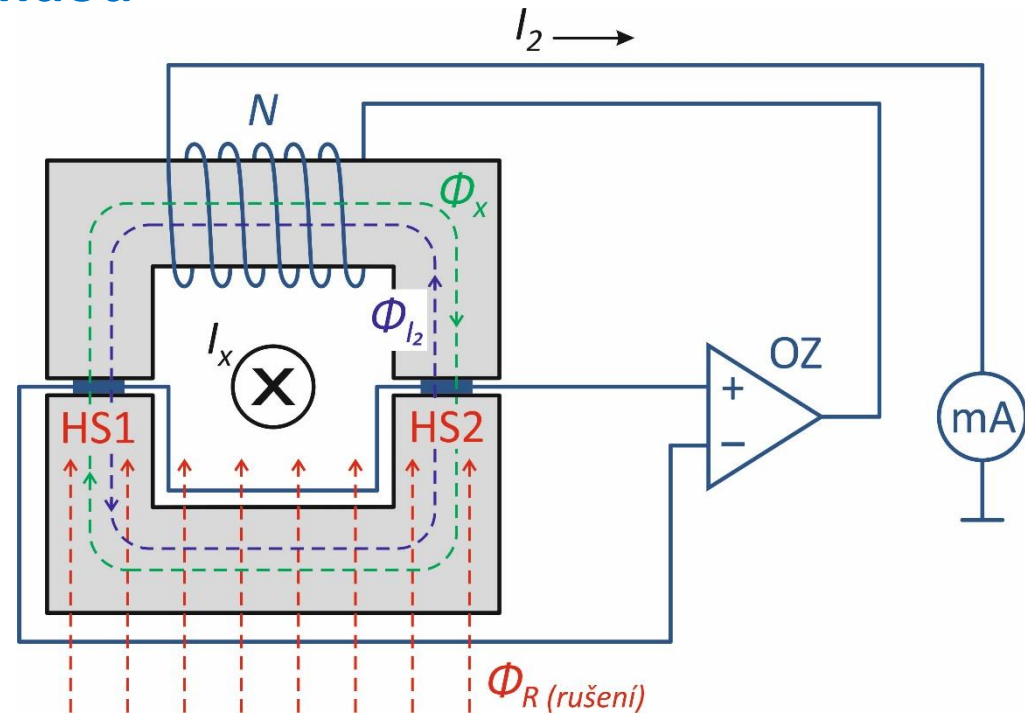
Hallův jev – 1879



([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Hall\\_effekt.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Hall_effekt.svg))



Edwin Hall (1855-1938)



$$I_x = NI_2$$

- Použití: ~100 mA až ~10 kA
- Měří DC i AC
- Galvanické oddělení

# Měření DC proudu - přístroje

## Převodník I/U s Hallovou sondou

**Příklad: 3273-50, Hioki, [4]:**

- Frekvenční rozsah (-3 dB):  
DC - 50 MHz
- Max proud: 30 A (cont.),  
50 A (peak)
- Citlivost: 100 mV/A
- Chyba:  $\pm 1$  % rdg.  $\pm 1$  mV f.s.  
(DC, 45-66 Hz, 0-30 A<sub>RMS</sub>)
- Šum: 2,5 mA<sub>RMS</sub> (do 20 MHz)
- Výstup: BNC (do osc 1 M $\Omega$ )
- Napájení:  $\pm 12$  V (5,6 VA)



*Proudová sonda 3273-50, Hioki  
(převzato z: [www.hioki.com](http://www.hioki.com))*

# Měření AC proudu – základní definice

- Maximální hodnota
- Střední hodnota (nábojová)
- Efektivní hodnota (tepelná)
- Činitel tvaru (form factor)
- Činitel výkyvu (crest factor)
- Činitel plnění

$$I_m = \max[i(t)]_0^T$$

$$I_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

$$k_{tv} = \frac{I_{RMS}}{I_{av}}$$

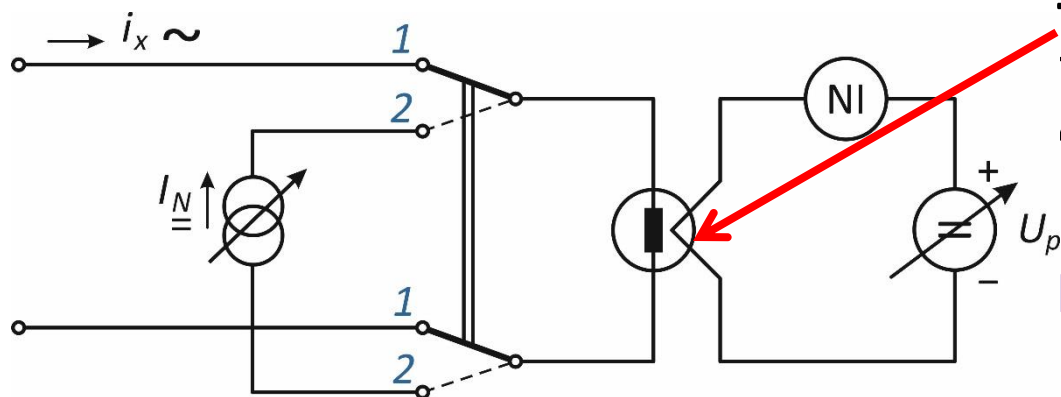
$$k_v = \frac{I_m}{I_{RMS}}$$

$$k_p = \frac{I_{av}}{I_m}$$

# Měření AC proudu – přístroje

## Komparátory AC proudu

**Význam:** Přesná měření RMS hodnoty střídavého proudu.



Komparátor AC proudu-princip

**Princip:** Pomocí **topného tělesa svázaného s termočlánkem** se porovnávají tepelné účinky neznámého AC proudu a známého DC proudu.

### Postup měření:

- 1) SW=1: Nastavení  $U_p$  tak, aby platilo NI=0
- 2) SW=2: Nastavení  $I_N$  tak, aby platilo NI=0
- 3) Čtení  $I_N$ , platí  $I_{RMS} = I_N$

$i_x$ ...měřený AC proud

NI...nulový indikátor

$I_N$ ...zdroj komparačního DC proudu

$U_p$ ...zdroj kompenzačního DC napětí

**Příklad: Fluke 792A** (viz "Měření AC napětí") + Etalon odporu pro snímání proudu

# Měření AC proudu – přístroje

## Magnetoelektrické přístroje s usměrňovači

- Rozsahy:  $\sim 100 \mu\text{A}$  až  $\sim 1 \text{ A}$
- Omezená přesnost měření
- Problém tvaru průběhu (kalibrováno pro sinus)
- Frekv. rozs.:  $\sim 10 \text{ Hz}$  až  $\sim 1 \text{ kHz}$
- Relativně levné

### Příklad: MX1 (Metrix), [5]:

- $A_{AC}$  rozsahy:  $500 \mu\text{A}$  až  $10 \text{ A}$
- Frekv. rozsah:  $16 \text{ Hz}$  až  $1 \text{ kHz}$
- Úbytek na plnou výchylku:  $0,5 \text{ V}$  až  $1,2 \text{ V}$  (dle rozsahu)
- $TP$ : 2,5



Multimetr MX1 (Metrix)

# Měření AC proudu – přístroje

## Elektromagnetické přístroje

- Rozsahy:  
~100 mA až ~100 A
- Měří přímo efektivní hodnotu bez ohledu na tvar průběhu
- Omezená přesnost měření ( $TP$  0,2 nebo horší)
- Omezený frekvenční rozsah (max. ~100 Hz)
- Větší vlastní spotřeba než magnetoel. přístroje
- Relativně levné
- Vhodné jako panelová měřidla

**Příklad: Fb96-1, Metra Blansko, [5]:**

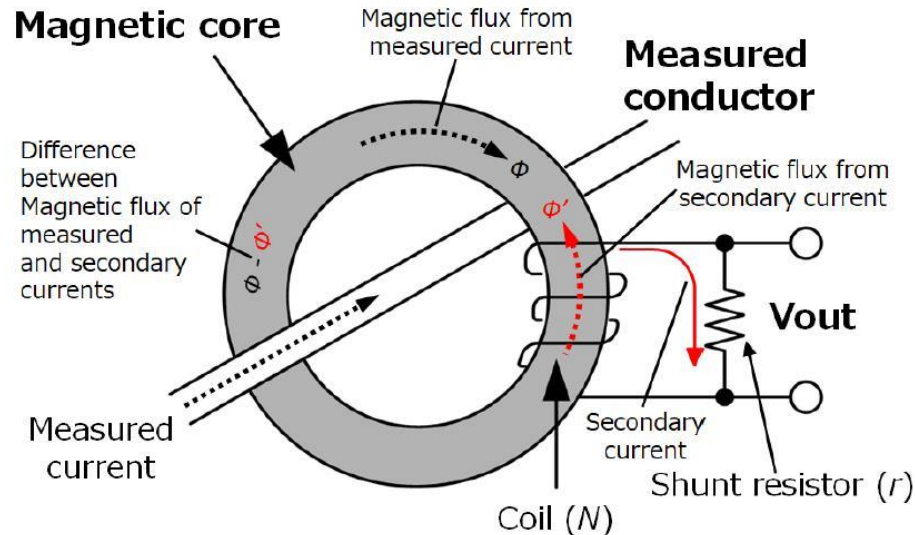
- Rozsahy: 100, 200 mA, ..., 5 A  
( $\times/1A$ ,  $\times/5A$  s měřicím transf.)
- $TP = 1,5$  (2,5 nižší rozsah)
- Prac. frekvence: 15 Hz – 400 Hz
- Vl. spotřeba: < 0,5 VA



*Fb96-1, Metra Blansko*

# Měření AC proudu – přístroje

## Měřicí transformátory proudu



Měřicí transformátor proudu-princip  
(zdroj: [www.hioki.com](http://www.hioki.com))

$$I_1 N_1 = I_2 N_2$$

$$U_{out} = R_S I_2 = R_S \frac{N_1}{N_2} I_1$$

$$I_1 = U_{out} \frac{N_2}{N_1 R_S}$$

**Provedení:** Sekundární vinutí je pevné na magn. obvodu. Primární vinutí – měřený vodič. Značení svorek: K, L, k, l

**Vlastnosti:**

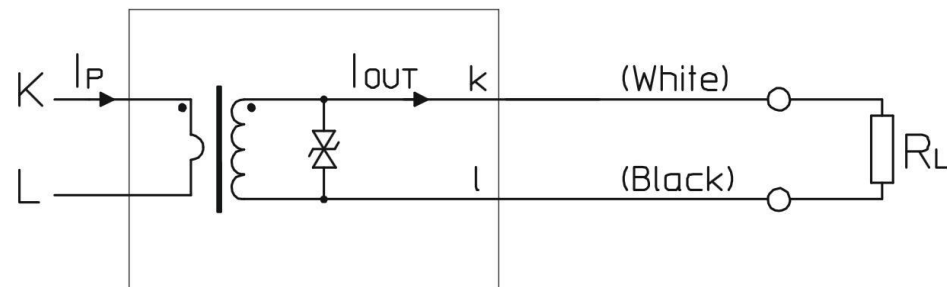
- Měří pouze AC proud
- Galvanické oddělení
- Frekvenční rozsah: ~10 Hz až ~100 kHz (dle konstrukce)
- Měřicí rozsah: ~1 A až ~1 kA
- Dobrá přesnost měření

# Měření AC proudu – přístroje

## Měřicí transformátory proudu

Příklad: Měřicí transformátor TT100-SD, LEM, [6]:

- Jm. proud (prim.): 100 A
- Výst. proud: 33,3 mA (@  $I_{jm}$ )
- Trvalé přetížení: 300 A
- Prac. frekvence: 50/60 Hz
- Chyba amplitudy:  $< 1 \%$
- Chyba fáze:  $1,5^\circ \pm 1^\circ$
- Snímací odpor:  $< 100 \Omega$  (ext.)
- Vstup: “split core”
- Výstup: kabel
- Aplikace: W-metry, měřiče energie...



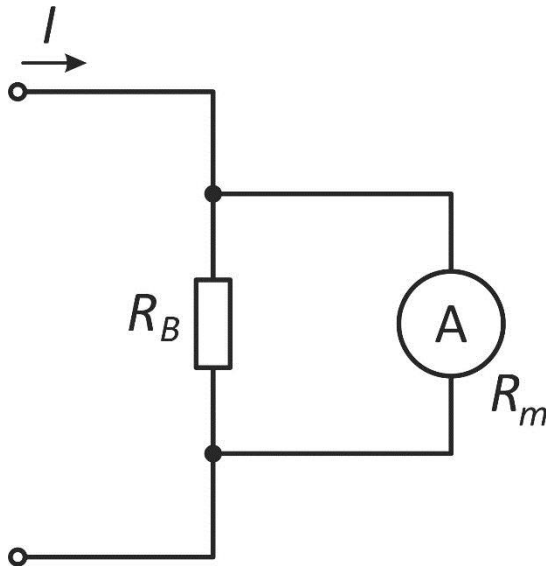
*Proudový transformátor TT-100SD, LEM  
a jeho zapojení do obvodu (zdroj:  
[www.lem.com](http://www.lem.com))*

# Měření elektrického proudu

## Změna rozsahu A-metru

**Odbočky z cívky, řazení částí vinutí:** Pouze u elektromag. A-metrů a elektro/fero-dyn. W-metrů

**Bočník:** Univerzální řešení. Odpor  $R_B$  a  $R_m$  tvoří dělič proudu.



$$I_A R_m = (I - I_A) R_B$$

$$R_B = \frac{R_m}{n-1}$$

$$n = \frac{I}{I_A} \quad \text{poměrná změna rozsahu}$$

- Pro menší proudy (do 10 A) - součást měřicího přístroje
- Pro velké proudy (10 – 1000 A) - samostatný přístroj
- A-metr se připojuje k bočníku ! (odpor vodičů, bezpečnost)

# Měření elektrického proudu

## Změna rozsahu A-metru

**Příklad:** Měřicí přístroj Mb72 (Metra Blansko) s měřicím rozsahem  $I_m = 5 \text{ mA}$  má úbytek na plnou výchylku  $U_m = 200 \text{ mV}$ . Spočítejte velikost bočníku pro rozsah  $I = 10 \text{ A}$ . Určete výkonovou ztrátu  $P_B$  na bočníku a celkovou spotřebu  $P$  měřidla při plné výchylce.

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 40 \Omega$$

$$R_B = \frac{R_m}{n - 1} = \frac{40}{\frac{10}{5 \cdot 10^{-3}} - 1} = \frac{40}{1999} = 0,020010005 \cong \underline{20 \text{ m}\Omega}$$

$$\left( R_B = \frac{U_m}{I - I_m} = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{10 - 5 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,2}{9,995} = 0,020010005 \cong 20 \text{ m}\Omega \right)$$

$$P_B = R_B I_B^2 = 0,020010005 \cdot 9,995^2 = \underline{1,999 \text{ W}}$$

$$P = P_B + P_m = U_m I = 0,2 \cdot 10 = \underline{2 \text{ W}}$$

# Měření elektrického proudu

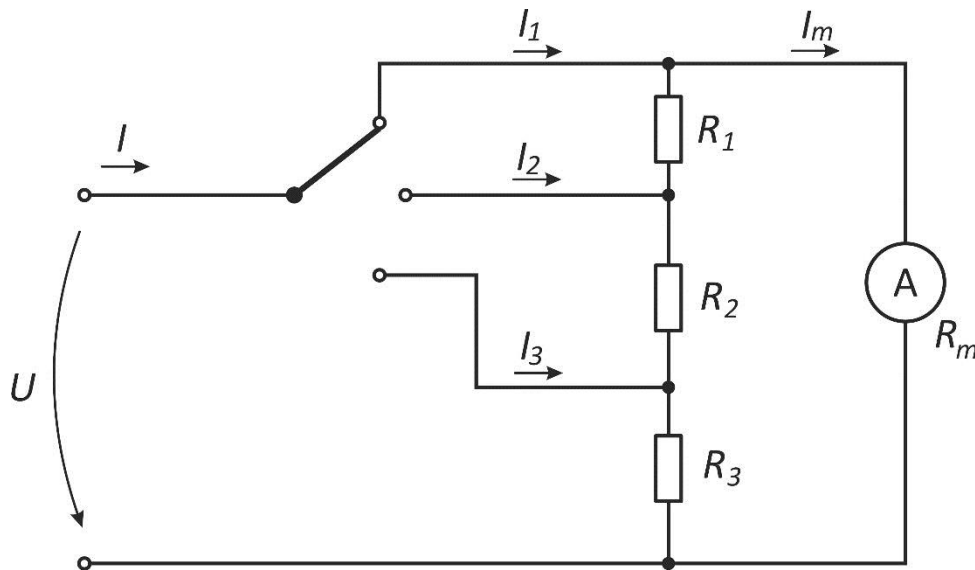
## Změna rozsahu A-metru

### Bočník v multimetru

Nezbytné je vyloučení přechodových odporů kontaktů přepínače

### Ayrtonův bočník

Odpory  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  pro proudové rozsahy  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  se určí ze soustavy rovnic:



$$U_m = (R_1 + R_2 + R_3)(I_1 - I_m)$$

$$U_m + R_1 I_m = (R_2 + R_3)(I_2 - I_m)$$

$$U_m + (R_1 + R_2)I_m = R_3(I_3 - I_m)$$

$U_m$ ... napětí na A-metru  
(při plné výchylce)

$I_m$ ... proud A-metrem  
(při plné výchylce)

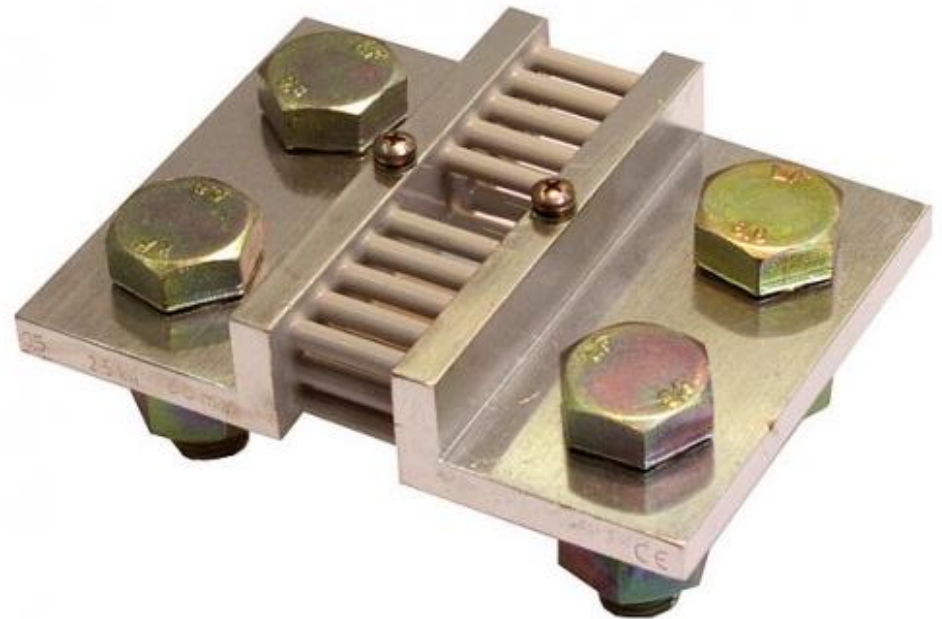
# Měření elektrického proudu

## Změna rozsahu A-metru

### Externí bočník

#### Příklad: Bočník B4, Lumel

- Proud nom.: 2,5 kA
- Úbytek: 50 mV (nom. proud)
- $TP$ : 0,2
- Montáž: šrouby + pasové vodiče
- Použití: rozšíření rozsahů DC A-metrů a W-metrů
- Výrobce: Lumel, Poznaň, PL



*DC bočník B4, Lumel  
(zdroj: [www.lumel.com.pl](http://www.lumel.com.pl))*

# Měření elektrického proudu

## Změna rozsahu A-metru

### AC snímací odpory

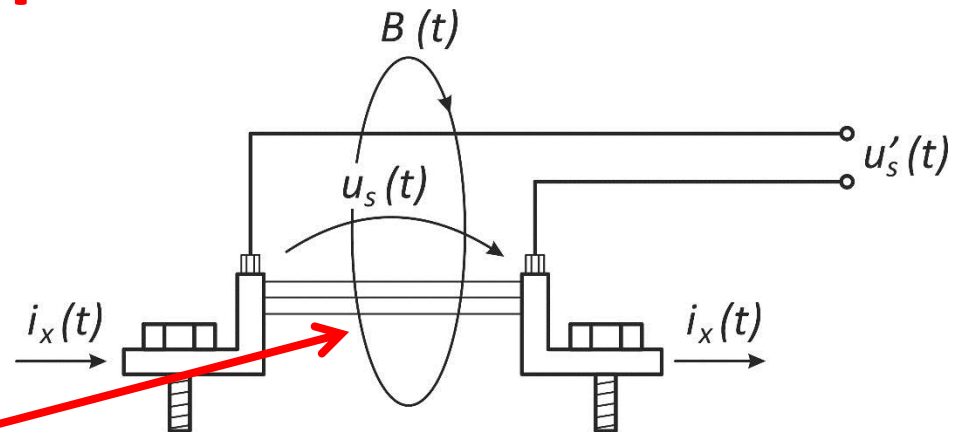
Pro snímání AC proudu není standardní konstrukce vhodná

#### Vadí:

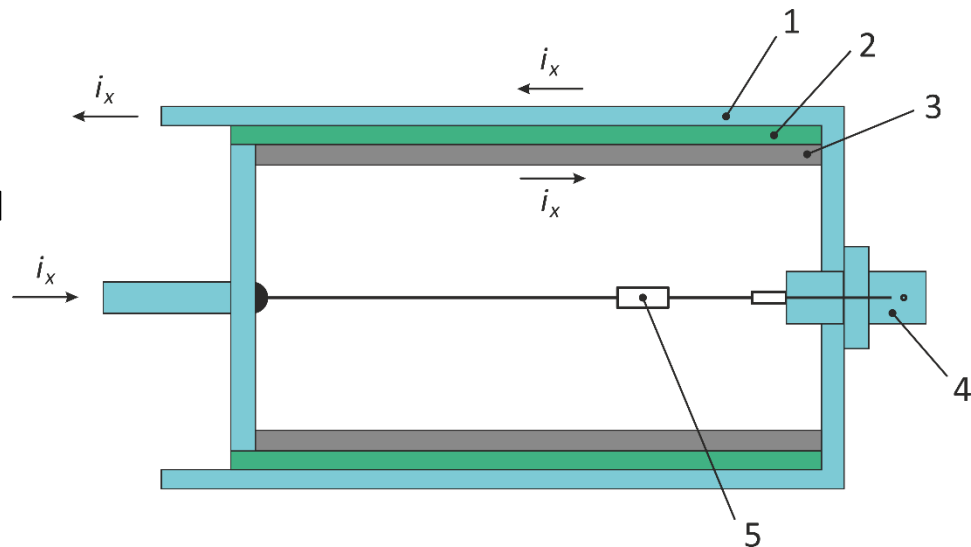
- Vzájemná induktivní vazba mezi silovým okruhem a snímacími vývody
- Do smyčky snímacích vývodů se mohou indukovat další rušivá napětí z okolí

#### Vhodnější konstrukce:

- Klecové bočníky
- Koaxiální bočníky



DC bočník – standardní konstrukce



Koaxiální bočník: 1-kovový váleček, 2-izolant, 3-odporová dráha, 4-BNC výstup, 5-terminátor

# Měření elektrického proudu

## Změna rozsahu A-metru

### DC/AC klecové bočníky

- Frekvenční rozsah:  
DC až  $\sim 100$  kHz
- Odpor:  
 $\sim 1$  m $\Omega$  až  $\sim 100$   $\Omega$
- Jmenovité proudy:  
 $\sim 1$  mA až  $\sim 100$  A
- Výstup: BNC/TNC/N apod.

### Výrobci:

- Fluke-Calibration (USA)
- Transmille (USA)
- Aplikace: Kalibrační laboratoře



DC/AC Shunt, Fluke (převzato z: [eu.flukecal.com](http://eu.flukecal.com))



DC/AC Shunt, Transmille

(převzato z: [www.transmillecalibration.com](http://www.transmillecalibration.com))

# Měření elektrického proudu

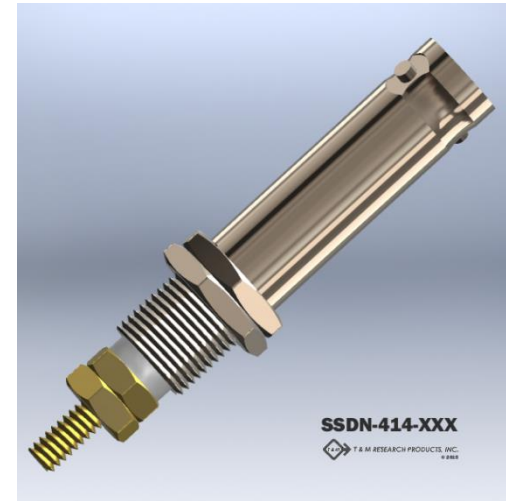
## Změna rozsahu A-metru

### Koaxiální bočníky

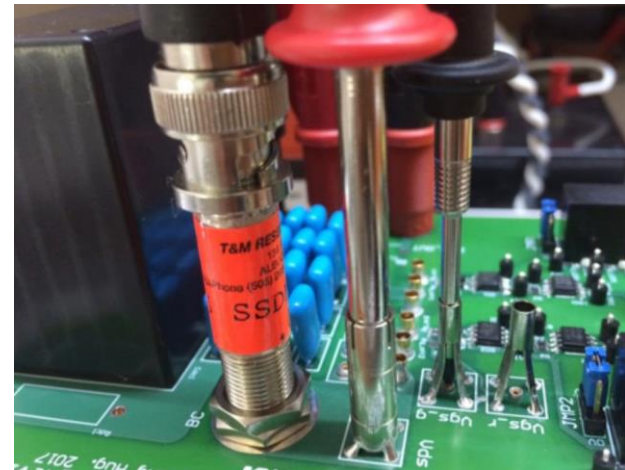
- Frekv. rozsah: DC až  $\sim 1$  GHz
- Odpor:  $\sim 1 \mu\Omega$  až  $\sim 0,1 \Omega$
- Chyba:  $\sim 1 \%$
- Výkonová ztráta:  $\sim 1$  W
- Doba náběhu:  $< 1$  ns
- Výstup: BNC/SMA/TNC/N apod.
- Indukčnost:  $\rightarrow 0$

### Výrobci:

- T&M Research Products Inc. (USA)
- Powertek (UK)
- Billmann (D)



*Koaxiální snímací rezistor, řada SSDN, T&M Research Products (převzato z: [www.tandmresearch.com](http://www.tandmresearch.com))*



*SSDN414 jako součást testovacího modulu pro charakterizaci spínacích prvků (převzato z: [www.littlefuse.com](http://www.littlefuse.com))*

# Literatura

- [1] Metrix: MX 1 Multimeter, Data Sheet, X02917B00 - Ed. 04 - 03/13, 2013, [www.chauvin-arnoux.com](http://www.chauvin-arnoux.com)
- [2] Keysight Technologies: 34401A Digital Multimeter, Data Sheet, April 2020, [www.keysight.com](http://www.keysight.com)
- [3] Terahertz Technologies Inc.: PDA-750 Photodiode Transimpdance Amplifier, Spec. Sheet, 2018, [www.teratec.us](http://www.teratec.us)
- [4] Hioki: 3273-50 Clamp on probe, Instruction Manual, [www.hioki.co.jp](http://www.hioki.co.jp)
- [5] Metra Blansko: Rozvaděčové přístroje – katalog, [www.metra.com](http://www.metra.com)
- [6] LEM: AC Current transformer TT 100-SD, Data Sheet, 071115/5, [www.lem.com](http://www.lem.com)
- [7] Haasz V.: Elektrická měření – přístroje a metody, ČVUT 2018