

Elektrická měření

4. MĚŘENÍ PROUDU A NAPĚTÍ

2023/2024

Jakub Svatoš

4. MĚŘENÍ PROUDU A NAPĚTÍ

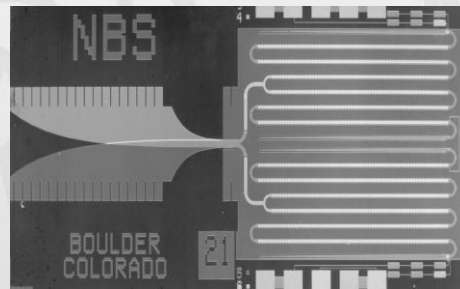
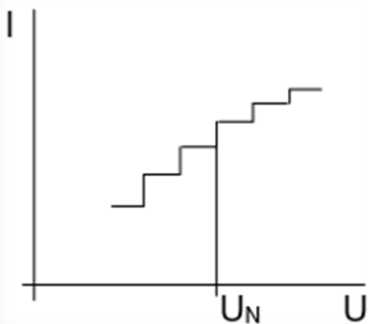
- **Etalony, referenční a kalibrační zdroje**
- **Měření stejnosměrného napětí** – přehled možností s ohledem na velikost měřeného napětí, kompenzační metoda, měření velmi malých napětí, vliv vstupní napěťové nesymetrie skutečného OZ, automaticky nulovaný zesilovač, modulační zesilovač, měření teploty termočlánky
- **Měření stejnosměrného proudu** – přehled možností s ohledem na velikost měřeného proudu, metody pro měření velkých proudů
- **Měření střídavého napětí a proudu** – přehled použitelných přístrojů a jakou hodnotu měří, měření střídavého proudu
- **Měřicí transformátory** – U i I , náhradní schéma, zapojení, použití, chyby

Etalony, referenční a kalibrační zdroje

Elektrický proud – Základní jednotkou SI je **ampér**. Je definována fixováním číselné hodnoty elementárního náboje e rovné $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, je-li vyjádřena v jednotce C, což se rovná A's.

Realizace – přes absolutní jednotku napětí (**Josephsonův jev**) a odporu (**kvantový Hallův Jev**), které jsou definovány na základě fundamentálních konstant – Planckovy konstanty h a náboje elektronu e .

Primární etalon - Josephsonův jev – inverzní střídavý Josephsonův jev, kdy přivedením střídavého proudu (obvykle pomocí externího elektromagnetického pole) na Josephsonův přechod se vytvoří stejnosměrné napětí, tedy jev slouží jako dokonalý převodník frekvence na napětí



$$U_N = n f_0 \frac{h}{2e}$$

$$\frac{2e}{h} = 483,59790 \text{ THz} / V$$

Sekundární etalony

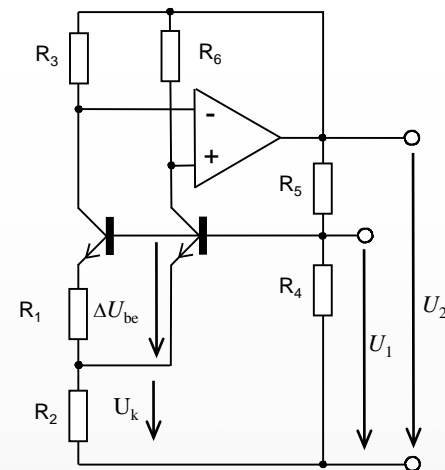
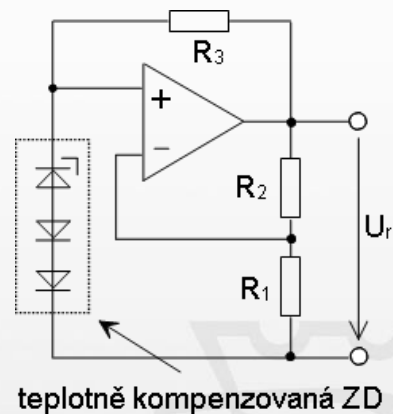
Teplotně kompenzované Zenerovy diody nebo
teplotně kompenzovaný PN přechod báze-emitor

(definovaný proud + termostat)

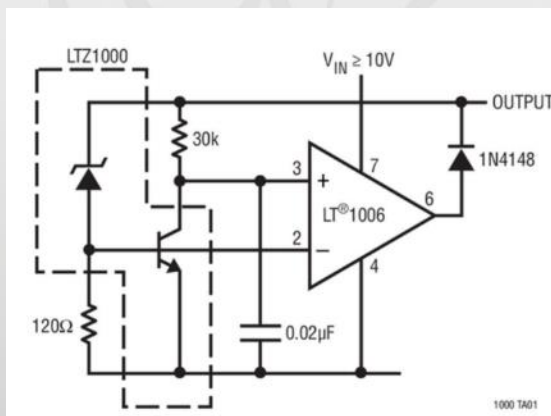
Referenční zdroje – integrované obvody

$$U_r = U_{ZD} (R_1 + R_2) / R_1$$

$$U_2 = U_1 (R_4 + R_5) / R_4$$

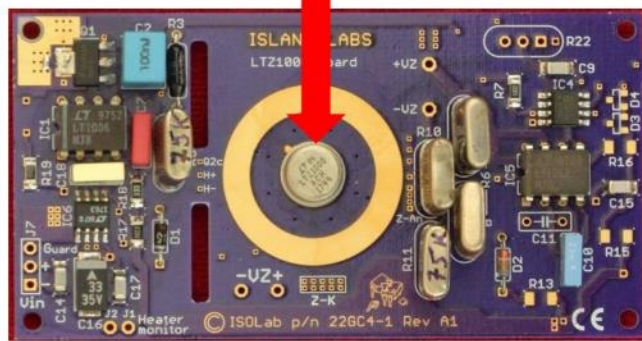


Mezi nejstabilnější na trhu dostupné reference patří LTZ1000A (drift v řádu ppm/měsíc), technologie podpovrchové zenerovy diody s termostatem



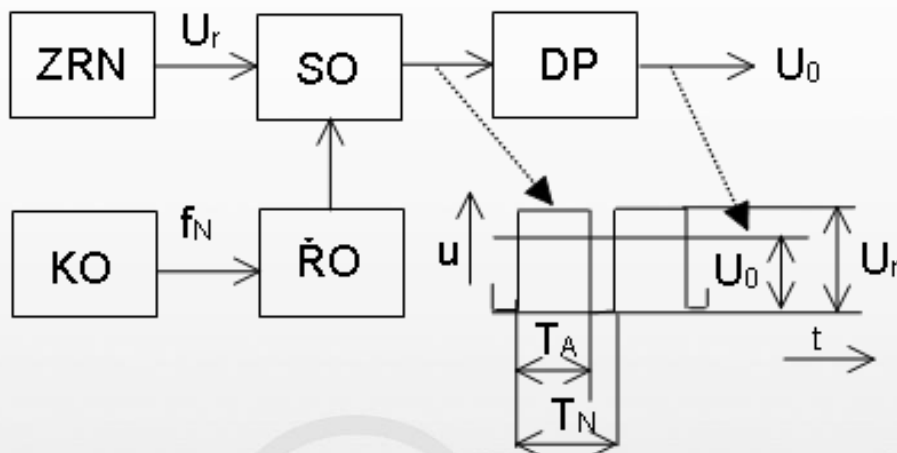
~300 USD

...30 let staré



Napěťové kalibrátory

přesné D/A převodníky s šířkovou modulací



ZRN- zdroj referenčního napětí

SO – spínací obvod

DP – dolní propust

KO – krystalový oscilátor

ŘO - řídicí obvod

$$U_0 = U_r \frac{T_A}{T_N} = U_r \frac{X}{N}$$

kde

$$T_A = \frac{X}{f_N}, \quad T_N = \frac{N}{f_N}$$

X = číslo, které převádíme na napětí

N = rozsah převodníku



Měření stejnosměrného napětí

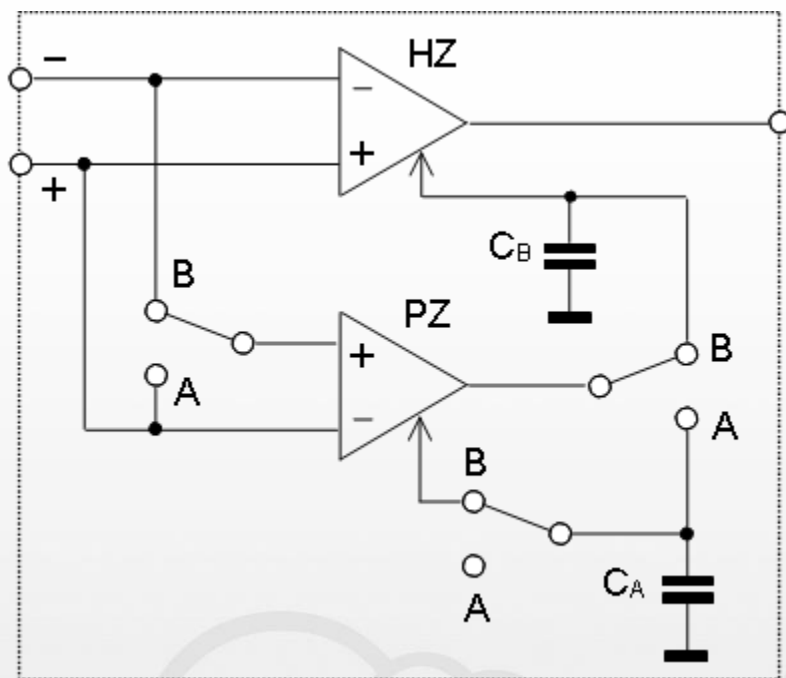
10 mV ÷ 1000 V	magnetoelektrické voltmetry, $R_i = 1 \div 50 \text{ k}\Omega/\text{V}$
10 mV ÷ 1000 V	běžné multimetry, $R_{\text{VST}} = 10 \text{ M}\Omega$
< 10 mV	kvalitní multimetry, speciální mikro/nanovoltmetry

Zesilovače:

> 10 mV	měřicí stejnosměrně vázané zesilovače*)
0,1 mV ÷ 10 mV	automaticky nulované zesilovače
< 0,1 mV	modulační zesilovače

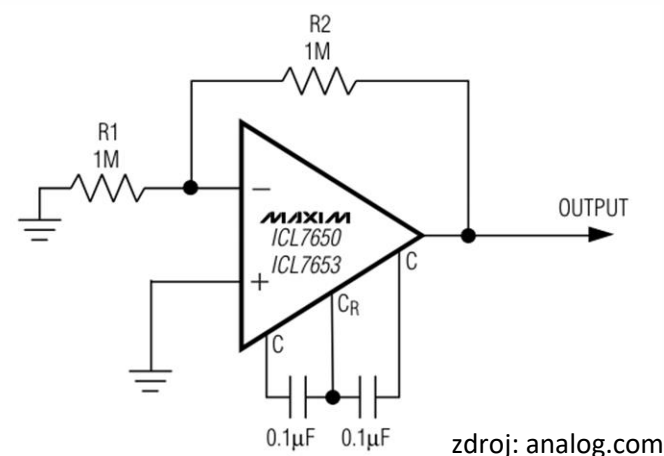
*) viz. přednáška č. 3 – nutno uvažovat i vliv vstupní napěťové nesymetrie

Automaticky nulovaný zesilovač



HZ - hlavní zesilovač

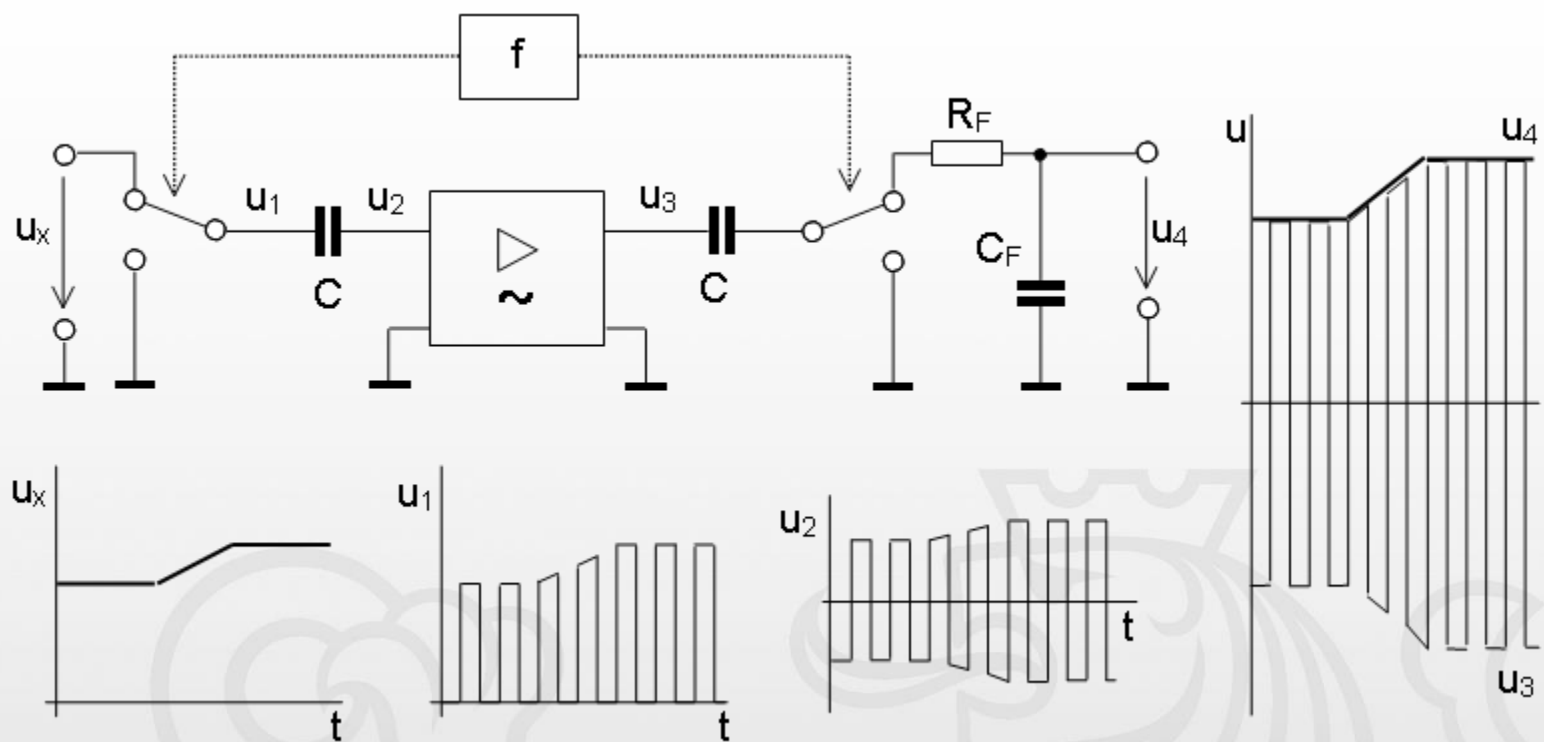
PZ - pomocný zesilovač



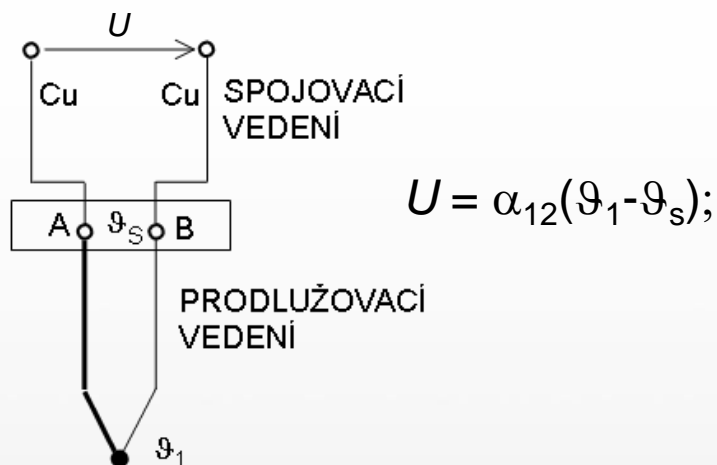
Poloha A: vstupní napěťová nesymetrie PZ je zesílena a výstupní napětí je zapamatováno na C_A

Poloha B: napěťová nesymetrie PZ je kompenzována napětím z C_A , Vstupní napěťová nesymetrie HZ je zesílena PZ a přivedena na kompenzační vstup HZ – tím je kompenzována napěťová nesymetrie HZ. Současně je toto napětí zapamatováno na C_B a použito pro kompenzaci HZ v předchozím taktu (poloha A).

Modulační zesilovač



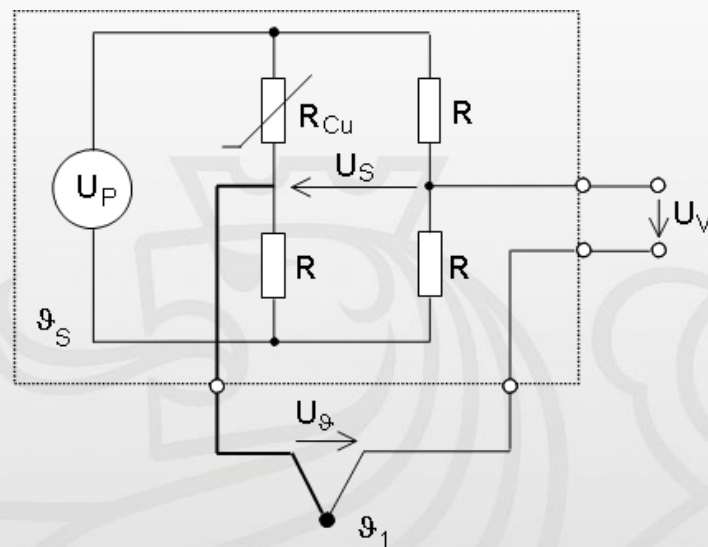
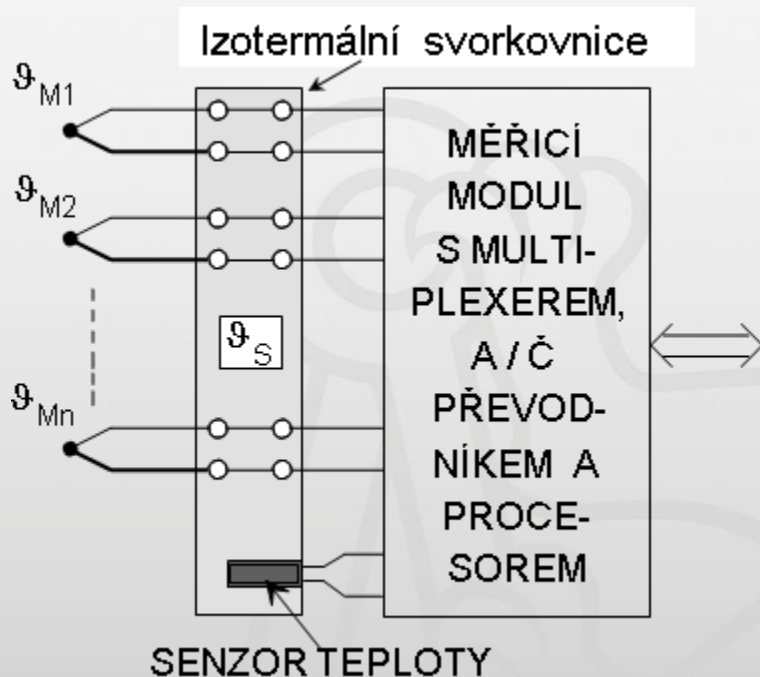
Měření malých napětí – např. měření teploty termočláanky



α_{12} = termoelektrický koeficient (VK^{-1})

ϑ_s = teplota „studeného“ (srovnávacího) konce

Lze stanovit měřením nebo kompenzovat „kompenzační krabicí“.



Kompenzační krabice

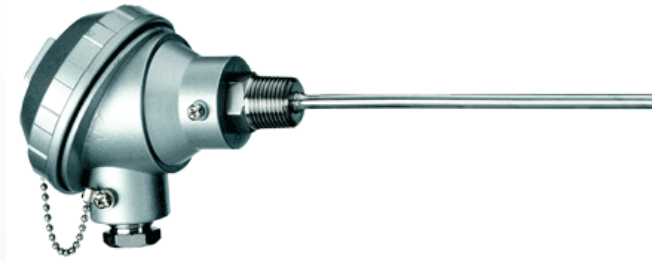
$$U_V = U_9 + U_S = k(\vartheta_1 - \vartheta_s) + k'\vartheta_s$$



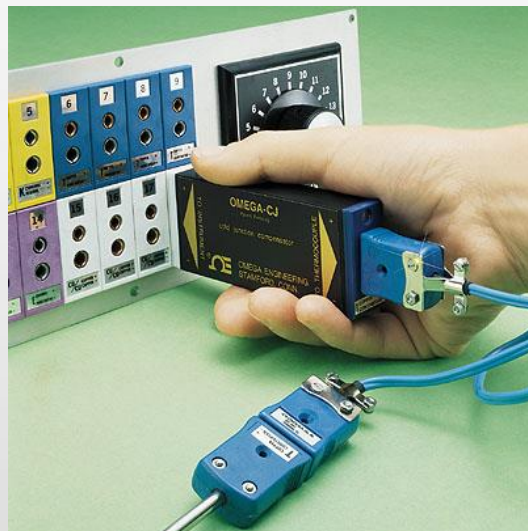
Typický laboratorní termočlánek typu K



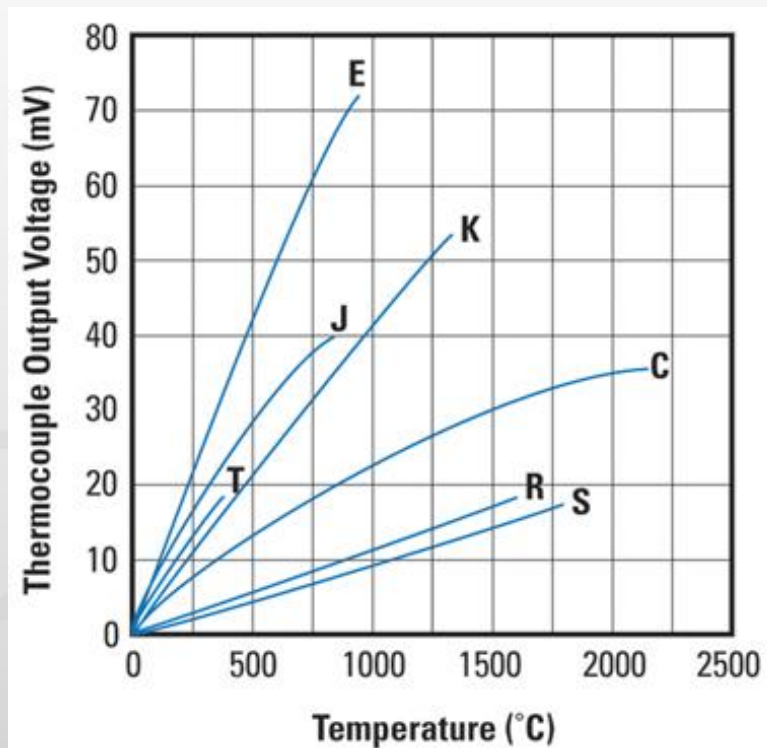
Praktické provedení spoje dvou kovů



Průmyslový termočlánek v ochranném pouzdru

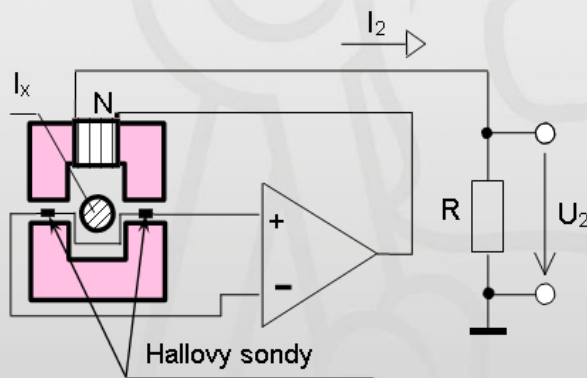


Kompenzační krabice Omega CJ



Měření stejnosměrného proudu

1 μA až 10 A	číslicové multimetry popř. magnetoelektrické ampérmetry, (s přepínatelným bočníkem, úbytky napětí typicky $50 \div 200 \text{ mV}$)
10 A až 1000 A	externí bočník + číslicový multimetr popř. magnetoelektrický milivoltmetr (úbytky napětí typicky $50 \div 200 \text{ mV}$)
$< 1 \mu\text{A}$	speciální číslicové nano/pikoampérmetry (obvykle měření úbytku napětí na vysokoohmovém odporu mikrovoltmetrem)
$< 10 \text{ mA}$	bez úbytku napětí – převodník proud - napětí s OZ (viz. předn. 3, nutno uvažovat vstupní klidové proudy)
10 mA až 10 kA	bez úbytku napětí – používají se magnetické senzory:



$$I_x = N \frac{U_2}{R}$$



Měření střídavého napětí

1) Měření střední hodnoty, cejchováno v efektivní hodnotě pro sinusový průběh

- magnetoelektrický s usměrňovačem $2 \div 1000 \text{ V}$ ($50 \text{ Hz} \div 5 \text{ kHz}$) - již historie
- číslicové multimetry nižší třídy ($10 \text{ mV} \div 1000 \text{ V}$, fr. rozsah do 1 až 10 kHz)



- $< 1 \text{ mV}$ - lock-in zesilovač nebo selektivní mikrovoltmetr (je třeba měřit jen požadovanou frekvenci)

Poznámka: Měření VF signálu není v osnovách tohoto předmětu.

2) Měření efektivní hodnoty

Efektivní hodnota střídavého napětí (U_{RMS}) je rovna takové hodnotě stejnosměrného napětí, která na odporové zátěži poskytne stejný průměrný výkon.

- elektromagnetický (feromagnetický), 10 ÷ 1000 V !!**POZOR!!** frekvenční omezení – **již historie**
- kvalitnější multimetry s převodníky efektivní hodnoty, střídavé rozsahy označeny RMS popř. TRUE RMS, nejpoužívanější „**implicitní**“ **převodník** (např. IO AD 637) – viz přednáška 9.
- Číslicové měření - vzorkovací metoda - pro schodovitou aproximaci platí:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2}$$

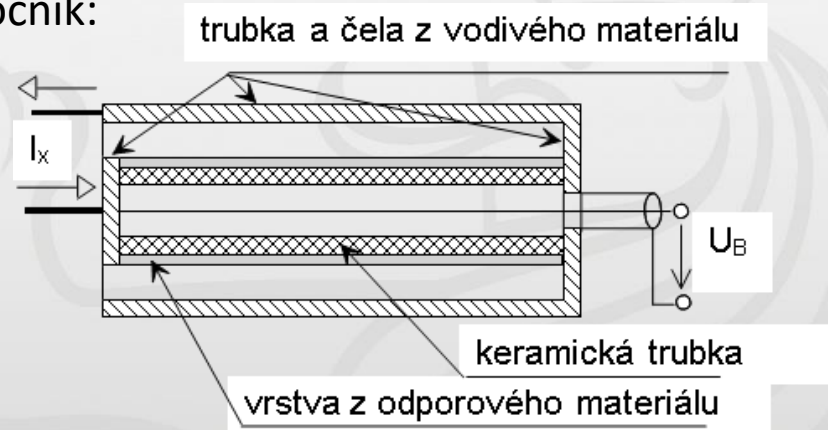
kde N = počet vzorků za periodu

Měření střídavého proudu

efektivní hodnota přímo – elektromagnetický ampérmetr (1 mA ÷ 10 A) – úbytky i na indukčnosti systému, frekvenční omezení (cca do 1 kHz)

pro **harmonický** průběh **magnetoelektrický s usměrňovačem** – vždy bočník – velká spotřeba (viz. 2. přednáška)

číslicové multimetry (ampérmetry) – měření úbytku na bočníku – úbytky typicky 10 (20) mV nebo 100 (200) mV, použitelné do jednotek kHz, měření efektivní hodnoty – omezení viz měření stř. napětí. Pro **vyšší kmitočty** (do stovek kHz) se používá bezindukční (koaxiální) bočník:



měření proudu s **galvanickým oddělením** – převodníky s **Hallovou sondou** (viz. stejnosměrná měření) a **MTP**

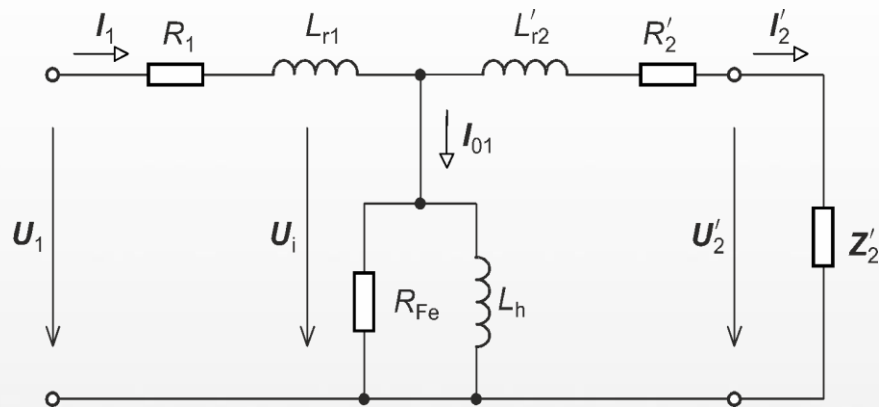
Měřicí transformátory

Měřicí transformátory proudu (MTI, MTP) (současně galvanické oddělení) se používají pro proudy větší než cca 10 A *bez stejnosměrné složky* (pro „technické“ kmitočty). I_2 zpravidla 5 (1) A.

Měřicí transformátory napětí (MTU) (galvanické oddělení) lze použít pro střídavá napětí *bez stejnosměrné složky* (pro „technické“ kmitočty). U_2 zpravidla 100 V.



Zjednodušené náhradní schéma měřicího transformátoru „přepočítaného na primár“:
(převodem 1:1)



$$U'_2 = U_2 \frac{N_1}{N_2} = p_U U_2$$

$$I'_2 = I_2 \frac{N_2}{N_1} = p_I I_2$$

$$R'_2 = p_U^2 R_2 \quad Z'_2 = p_U^2 Z_2$$

magnetovací proud I_{01} způsobuje chybu převodu a fáze MTI \Rightarrow požadavek Z_2 minimální, sekundár se nesmí rozpojit!!!

úbytky napětí na R_1 , R_2 , L_{r1} , L_{r2} způsobuje chybu převodu a fáze MTU \Rightarrow požadavek Z_2 maximální.

(udává se max./min. hodnota Z_2 nebo max zdánlivý výkon ve VA)