

Senzory a Měření - protokol 2 - měření střídavého napětí

Vypracoval **Vojtěch Michal** 24. března 2021, "měření" provedeno dle videa ze dne 18. 3. 2020.

Záznam z měření na Youtube:

<https://www.youtube.com/watch?v=Ux4ak3cuHRI>, <https://www.youtube.com/watch?v=yL22yHrP8k>, <https://www.youtube.com/watch?v=yL22yHrP8kw>

Úkoly měření

Pozor na polaritu termočlásku, někdy jsou protikusy konektorů asymetrické. Obecně ale - v ideálním případě - na polaritě nezávisí, absolutní hodnota napětí je stále stejná. Otočení polarity však může pomoci potlačit napěťové offsety systémů dále (třeba zesilovače). Pro měření byl použit termočlánek typu K (konstantan +alumel) s konstantou citlivosti $\alpha_{12} = 40.8 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$.

1) Změřte teplotu v kalibrační píce termočláskem.

Multimetr je v režimu měření stejnosměrného napětí. Srovnávací spoj je v pokojové teplotě 24.7°C , nachází se kdesi v konektoru, kde termočláskový materiál přechází na měděné vodiče jdoucí do multimetru.

a) Bez kompenzace: ruční multimetr MY64 má rozsah 200 mV, měří 3mV. Stolní multimetr U3401A měří 2.97mV na rozsahu xxxx. (kouknout do datasheetu). Vztah pro napětí na srovnávacím konci je

$$U_{BC} = \alpha_{12}(\vartheta_M - \vartheta_S), \text{ odtud určíme teplotu měřicího konce jako } \vartheta_M = \frac{U_{BC}}{\alpha_{12}} + \vartheta_S, \text{ po číselném dosazení vychází}$$

teplota píčky $\vartheta_M = 97.5^\circ\text{C}$ (za předpokladu, že byla v termodynamické rovnováze s měřicím koncem termočlásku).

b) S použitím kompenzačního obvodu AD8495 (kompenzuje teplotu srovnávacího konce, užitečný signál rovněž zesiluje, výstup má citlivost $5\text{mV} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$). Ruční multimetr měří 496 mV na rozsahu 2V, stolní multimetr měří 492.75mV. Protože výstup kompenzačního obvodu již není závislý na teplotě srovnávacího konce, lze rovnou stanovit, že teplota píčky je $\vartheta_M = \frac{492.75 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 98.5^\circ\text{C}$.

2) Určete rozšířenou nejistotu měření napětí termočlásku ($k_r=2$) použitými číslicovými voltmetry.

Určete rozšířenou nejistotu měření napětí termočlásku ($k_r = 2$) použitými číslicovými voltmetry.

Napětí měříme přímo, zatím bez dalších součástek v cestě. Výrobce garantuje u multimetrů následující přesnosti: $\pm 0.5\%$ rozsahu ± 1 digit pro ruční Master MY64 na rozsahu 200mV, multimetr má 2000 countů (1 digit odpovídá 0.1mV). Pro stolní U3201A je na rozsahu 500mV přesnost $\pm 0.02\% \pm 4$ digitů; digit odpovídá 10 μV .

Použijme vztah, že nejistota typu B digitálního je $u_B = \frac{\frac{\delta}{100} X + NR}{\sqrt{3}}$, kde N je počet chybových digitů, R je fyzikální rozměr odpovídající jednomu digitu, X je měřená hodnota a δ je relativní chyba měření v procentech.

Dosazením do tohoto vztahu vyjde pro multimetr Mastech MY64 $u_{B1} = \frac{0.5 \cdot 3 + 1 \cdot 0.1}{100 \sqrt{3}} = 0.066 \text{ mV}$ a

ruční
pro stolní U3201A $u_{B2} = \frac{0.02 \cdot 2.97 + 4 \cdot 0.01}{100 \sqrt{3}} = 0.023 \text{ mV}$. Protože není zatíženo

náhodnými chybami, je kombinovaná standardní nejistota rovna předpokládáme, měření nejistotě typu B. Po rozšíření koeficientem $k_r = 2$ vychází rozšířené nejistoty $U_1 = 0.132 \text{ mV}$ pro ruční multimetr a $U_2 = 0.046 \text{ mV}$ pro stolní multimetr.

3) Navrhněte zapojení s OZ, pomocí kterého zesílíte napětí termočládku

Navrhněte zapojení s OZ, pomocí kterého zesílíte napětí termočládku (bez kompenzačního obvodu).

Požadované zesílení je 101. Zvolte takové zapojení, aby chyba metody způsobená vstupním odporem zesilovače byla zanedbatelná. S tímto obvodem opakujeme měření 1a) s tím, že napětí termočládku je nyní zesíleno navrženým zesilovačem.

Zapojení zesilovače musí být neinvertující, které se vyznačuje vysokým vstupním odporem. Pakliže bude mezi výstupem a invertující svorkou rezistor R_2 a mezi invertující svorkou a zemí R_1 , poté zesílení zapojení je

$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$. Požadavek na zesílení $A = 101$ splňují standardní hodnoty $R_1 = 1\text{k}\Omega$ a $R_2 = 100\text{k}\Omega$. Není rozumné

použít výrazně vyšší hodnoty, protože napěťový úbytek na větším odporu bude citlivější na šumy a bias current vstupů operačního zesilovače.

Při skutečném měření byl použit nastavitelný odpor pro získání $R_2 = 99\text{k}\Omega$, signál je proto zesílen s koeficientem $A = 100$. Stolní multimetr měřil 302.2 mV, ruční multimetr měří 304mV na rozsahu 2V.

4) Nakreslete zapojení pro určení napěťové nesymetrie OZ

Nakreslete zapojení pro určení napěťové nesymetrie OZ – a) přímo b) pomocí komutace (prohození) svorek.

Uvedte rovnice pro výpočet, a napěťovou nesymetrii vypočtete: použijte hodnoty z videa. Jaké jsou typické hodnoty U_o ? (pro OZ OP07 najděte a srovnejte s naměřenou/vypočtenou hodnotou).

Podle datasheetu by měl být input offset voltage (vstupní napěťová nesymetrie) typicky 30 μV , maximálně 70 μV .

a) Zkratováním vstupů zesilovače získáme na výstupu 8mV. S ohledem na zesílení $A = 100$ to odpovídá offsetu 80 μV . Zkratovat se musí vstupy celého neinvertujícího zapojení, nikoli jenom uvnitř použitého OZ. Pakliže bychom zkratovali invertující a neinvertující svorku OZ, bude nějaká ta exsitující nesymetrie zesilována jeho obrovským zesílením (120 dB i víc). To samozřejmě narazí na hranici napájení a výstup je saturován. Měřená hodnota je v takovém případě k ničemu, ukazuje nám nanejvýš, že OP07 není rail2rail. Pro validní měření je potřeba zachovat zápornou zpětnou vazbu (viz zapojení na obrázku).

b) Měřená napětí: 305 mV, po komutaci -288mV.

Zapojení zesilovače s napěťovým offsetem provádí operaci $u_o = A(U_{offset} + u_i)$. V naší moci je otočit znaménko u_i . Proto výstupní napětí před komutací je $u_{o1} = A \cdot U_{offset} + A \cdot u_i$, po komutaci $u_{o2} = A \cdot U_{offset} - A \cdot u_i$. Prostým

sečtením obou výstupních hodnot vyjde $u_{o1} + u_{o2} = 2A \cdot U_{offset} \Rightarrow U_{offset} = \frac{u_{o1} + u_{o2}}{2A} = \frac{305 - 288}{2 \cdot 100} = 0.085 \text{ mV}$.

Napěťový offset je tedy 85 mikrovoltů.

5) Změřte teplotu v kalibrační píce pomocí USB modulu s izotermální svorkovnicí.

Změřte teplotu v kalibrační píce pomocí USB modulu s izotermální svorkovnicí. Pokud je indikovaná hodnota jiná, než teplota na kalibrační píce, pokuste se nalézt možné zdroje odchylek.

Pro zajištění definované úrovně v případě poškození senzoru (zde například přetržení drátů v termočláncu, obecně otevření obvodu - stav vysoké impedance na vstupu) je rozumné vstup tahat pullup/pulldown rezistorem na nějakou definovanou úroveň. V případě odpadnutí termočláncu stáhne pulldown výstupní napětí hluboko do záporu, což může řídicí logika spolehlivě vyhodnotit jako poškozený senzor. V opačném případě by vstupní vodič plaval a šuměl, zesilovač by divoce oscilloval a zdánlivě měřená teplota by prudce oscillovala.

Izotermální svorkovnice sama obsahuje přesné čidlo teploty, díky kterému je možné digitálně kompenzovat teplotu srovnávacího konce. Měření ukazuje 104°C, což odpovídá teplotě 103.5°C měřené ve stejný okamžik stolním multimetrem.

6) Srovnejte nejistotu měření

Srovnejte nejistotu měření teploty přímým měřením (1a+2) a měřením se zesilovačem s OZ (3) pro oba multimetry, při ideální znalosti teploty okolí. Jak se výsledek změní a jaká nejistota dominuje, pokud uvažujeme nejistotu měření teploty místnosti 0,5°C (kr=2)?

Teplotu měříme nepřímo, přepočítáváme ji z měřeného napětí pomocí vztahu $\vartheta_M = \frac{U_{BC}}{\alpha_{12}} + \vartheta_S$. Nepřímou

nejistotu teploty měření vyjádříme jako $u_{\vartheta_M} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$, kde f je závislosti ϑ_M na ostatních veličinách a x_i je i -tá veličina. předpis

a) Pro přímé měření máme zjištěné standardní nejistoty typu B (viz úloha 2). Od koeficientu citlivosti nepřichází žádná nejistota, ten předpokládáme přesný. Pakliže je měření teploty srovnávacího konce ideálně přesné, poté

podle zákona šíření nejistot platí $u_{\vartheta_M} = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_{12}} \Delta U_{BC} \right)^2}$, což se rovná 1.62°C pro stolní multimetr a 0.56°C pro ruční multimetr.

b) Pakliže je i teplota místnosti měřena s nejistotou $\Delta \vartheta_S = 0.5^\circ\text{C}$, poté pro nepřímou nejistotu měření teploty

platí $u_{\vartheta_M} = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_{12}} \Delta U_{BC} \right)^2 + (1 \cdot \Delta \vartheta_S)^2}$, což se po vyčíslení rovná 1.69 °C pro stolní multimetr a 0.75 °C pro ruční multimetr.

Protože ruční multimetr nebyl schopen přesného měření ani s předpokladem ideální znalosti teploty místnosti, nezměnila relaxace předpokladů výrazně výsledek. Pozorovatelnější (alespoň relativně citelnější) změna je patrná na nejistotě u stolního multimetru, který byl dříve velmi dobrý, protože mu každá další nejistota velmi ubližuje.

c) Měření s operačním zesilovačem: neměříme přesně U_{BC} , nýbrž

$$U_{multimetr} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(U_{BC} + U_{offset}) \Rightarrow \frac{U_{multimetr}}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)} - U_{offset} = U_{BC}. \text{ Odtud pro teplotu měřicího konce platí}$$

$$\vartheta_M = \frac{U_{multimetr} - U_{offset}}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \alpha_{12}} + \vartheta_S = \frac{U_{multimetr} - U_{offset}}{\alpha_{12}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \vartheta_S.$$

Tento vzath derivujeme pro získání jednotlivých partiálních derivací:

$$\frac{\partial \vartheta_M}{\partial \vartheta_S} = 1,$$

$$\frac{\partial \vartheta_M}{\partial R_1} = \frac{U_{multimetr} - U_{offset}}{\alpha_{12}} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2}, \text{ Tolerance obou rezistorů je } 0.1\%, \text{ tedy } \Delta R_1 = 1\Omega, \Delta R_2 = 100\Omega.$$

$$\frac{\partial \vartheta_M}{\partial R_2} = \frac{U_{multimetr} - U_{offset}}{\alpha_{12}} \frac{-R_1}{(R_1 + R_2)^2},$$

$$\frac{\partial \vartheta_M}{\partial U_{multimetr}} = \frac{1}{\alpha_{12}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \dots \text{ vyšetřeno v úloze 2}$$

Poté pakliže měřená hodnota $U_{multimetr} = 2.97\text{mV}$, $U_{offset} = 0.085\text{ mV}$ a $\alpha_{12} = 40.8 \cdot 10^{-6}\text{V.K}^{-1}$, platí:

$$u_{\vartheta_M} = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_{12}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Delta U_{multimetr}\right)^2 + \left(\frac{U_{multimetr} - U_{offset}}{\alpha_{12}} \frac{-R_1}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_2\right)^2 + \left(\frac{U_{multimetr} - U_{offset}}{\alpha_{12}} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_1\right)^2 + (\Delta \vartheta_S)^2} = \sqrt{\dots}$$

Pro stolní multimetr po dosazení vyjde $u_{\vartheta_M} = \sqrt{3.178 \cdot 10^{-5} + 0.5 + 0.7 + 0.25} = \sqrt{1.45} = 1.20^\circ\text{C}$. Pro ruční

multimetr $u_{\vartheta_M} = \sqrt{2.612 \cdot 10^{-4} + 0.5 + 0.7 + 0.25} = \sqrt{1.45} = 1.2^\circ\text{C}$.

Zavedením zesilovače se stala chyba v důsledku nepřesnosti multimetru o několik řádů nižší než chyba zavedená nepřesností rezistorů kolem OZ a nebo měřením pokojové teploty. Rozdíly v přesnosti multimetrů se tak staly prakticky zanedbatelné ve srovnání s dominující chybou rezistorů R_1 , R_2 .

