

Kalibrace dotykových snímačů teplot bez profesionálního vybavení

T. Panc, O. Tůmová, L. Kupka

Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : panct@ket.zcu.cz, tumova@ket.zcu.cz, lkupka@ket.zcu.cz

Anotace:

Článek si klade za cíl popsat metody kalibrace snímačů teploty prováděné bez profesionálního vybavení. Na základě praktických měření byly stanoveny nejistoty předkládaných postupů i limity jejich použitelnosti. Uvedené metody si mohou najít místo při rámcové kalibraci nebo cejchování přístrojů operujících s teplotou, u nichž není kladen důraz na extrémní přesnost. Prezentované řešení bylo zkoušeno v rámci stanovení přesnosti měřidel teploty na Katedře technologií a měření Západočeské univerzity v Plzni.

This paper deals with the methods of temperature calibration performed without professional equipment. Limits of usage and uncertainties of these methods were determined from measured data. Described processes can be used to verify or calibrate temperature measurement devices without great precision demands. The presented solution has been tested during the verification of accuracy of temperature measuring instruments performed on the measurement and technology department of The University of West Bohemia.

ÚVOD

Metodika přesných kalibrací je dobře zvládnuta a na trhu existuje celá řada srovnávacích a kalibračních pomůcek pro tuto oblast. Své služby v tomto oboru poskytuje rovněž dostatek akreditovaných laboratoří. Článek je zaměřen na druhou stranu pomyslného žebříčku přesnosti. Požadavek alespoň přibližného oceňování a kontroly přístrojů měřících teplotu se vyskytuje poměrně často. Příkladem mohou být amatérské konstrukce, prototypy zařízení, provozní teploměry sloužící pro orientační měření, termostaty vytápění a chlazení atd. U případů, kdy není požadována přesnost vyšší, než ± 2 °C je neefektivní vynakládat velké finanční prostředky na přesné kalibrace. Takového cíle lze dosáhnout prakticky s minimem vynaložených prostředků.

KALIBRACE METODOU PEVNÝCH BODŮ

Cejchování teplotní stupnice v prostředí, kde není k dispozici patřičné srovnávací vybavení, zpravidla probíhá na základě realizace pevných bodů vody (tání ledu a var vody). Aby bylo dosaženo co nejvyšší přesnosti, je potřeba dodržet několik pravidel. Je nutné použít nejčistší vodu a led, ledová tříšť musí být dostatečně jemná, voda (ledová suspenze) musí být míchána, kalibrovaný teploměr musí být v dostatečné vzdálenosti od ostatních předmětů. Bod varu je rovněž značně závislý na atmosférickém tlaku i přítomnosti nečistot. S vroucí vodou se navíc obtížně manipuluje. V obou případech pak navíc musí měřený teploměr být zcela odolný proti vlhkosti. Na druhou stranu velkou výhodou je, že všechny potřebné prostředky jsou běžně k dispozici, popřípadě je jejich pořizovací cena minimální. Velikost nejistoty značnou měrou závisí na konkrétním

technickém provedení. Významný vliv má velikost částic ledové tříště, rychlost míchání a umístění teploměru.

Během několika provedených měření (suspenze s většinou částic < 2 mm umístěna v Dewarově nádobě, měřena pomocí rtuťového teploměru s rozlišením 0,05 °C) byla zjištěna teplota ($0,10 \pm 0,3$) °C. Z podrobnější analýzy nejistot vyplývá, že od takto realizovaného řešení zpravidla nelze očekávat přesnost vyšší než $\pm 0,2$ °C.

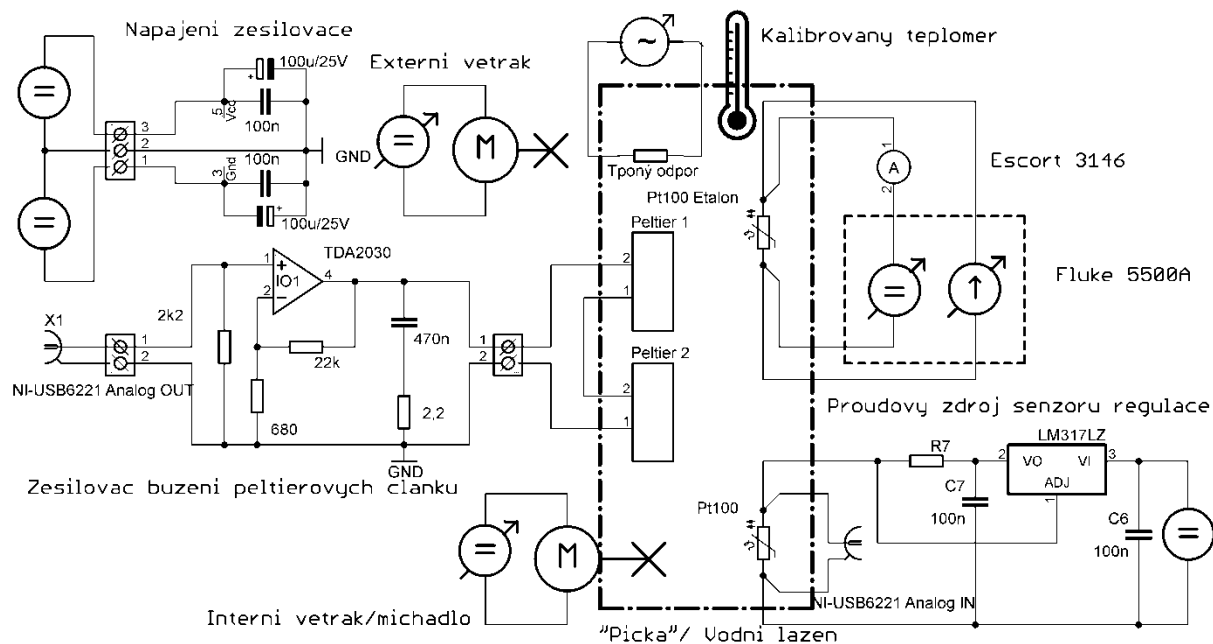
Při kalibraci, kde je jako pevný bod použit bod varu, je situace ještě horší. Jak již bylo zmíněno, je teplota varu silně závislá na tlaku. Pokud chceme vliv tlaku kompenzovat, musíme jej znát, tedy měřit, což značně komplikuje situaci. Bohužel i při kompenzaci vlivu tlaku tato metoda dle provedených měření neposkytuje vyšší přesnost než $\pm 1,2$ °C.

SROVNÁVACÍ METODY

Pokud je požadována vyšší přesnost, je nezbytné kalibrovat ve více bodech. V tomto případě je třeba použít srovnávací metody. Při tomto měření jsou referenční a měřený teploměr umístěny v prostředí o stejné teplotě a jejich údaje jsou srovnávány. Z toho vyplývá, že klíčovým prvkem je u srovnávací metody referenční teploměr.

Referenční teploměry

Na volbě správného referenčního teploměru závisí maximální dosažitelná přesnost kalibrace srovnávací metodou. Referenční teploměr by měl být alespoň o třídu přesnosti lepší než kalibrovaný. Na druhou stranu je ve většině případů zbytečné používat teploměry s rozlišením pod 0,1 °C, jelikož lze předpokládat, že neprofesionální srovnávací vybavení



Obr. 1: Schéma zapojení prototypu kalibrační pisky/lázně se zpětnovazební regulací

nebude schopno poskytnout větší přesnost. Běžné digitální teploměry a ostatně i většina polovodičových měřicích prvků bez kalibračních listů zpravidla nejsou vhodné jako referenční (mají chybu v řádu procent, potažmo jednotek °C). Stejně tak měření teploty termočlánky je zatíženo poměrně velkou nejistotou v řádu jednotek °C (vlivem výrobního rozptylu parametrů, nepřesnosti měření termoelektrických napětí, linearizace atd.).

Lépe na tom mohou být kapalinové teploměry. Většina těchto teploměrů vykazuje chybu kolem 2 až 5 dílků stupnice. Proto kapalinový teploměr s dostatečně velkým rozlišením může sloužit jako referenční. Jelikož jsou kapalinové teploměry cejchovány při plném ponoření, kdežto měření zpravidla probíhá při částečném ponoření do měřeného média, je nutné u odečteného údaje provést korekci na vyčnívající vlákno. Prakticky to znamená přepočítání odečtené teploty na měřenou za použití vztahu:

$$t_{\text{měřená}} = t_{\text{odečtená}} - n \cdot \beta \cdot (t_{\text{okolí}} - t_{\text{odečtená}}), \quad (1)$$

kde n je počet vyčnívajících dílků [°C], β součinitel vzájemné roztažnosti kapalina-sklo (pro rtuť ve skle $16 \cdot 10^{-5}$). Teplotu okolí ($t_{\text{okolí}}$) je potřeba měřit ve střední části vyčnívajícího kapalinového sloupce. Pokud by nebyla korekce na vyčnívající vlákno provedena, znamenalo by to zvětšení nejistoty změřeného údaje o další nejistotu v řádu desetin stupňů Celsia.

Dostupnost kapalinových teploměrů s rozlišením 0,1 °C je velká. Jedná se o lékařské (tělesné) teploměry, které sice bývají uzpůsobeny jako teploměry maxima, ale i s tím se lze vypořádat. Teploměry s Hg náplní se již nevyrábějí, ale původní se stále používají. V rámci ověření jejich přesnosti bylo provedeno měření šesti

vzorů s různým datem výroby, výrobcem i kapalinovou náplní (Hg, lih). Chyba těchto teploměrů nepřesáhla $\pm 0,4$ °C. Jejich omezením je však velmi malý měřicí rozsah. Pokud dostatečně přesný kapalinový teploměr není k dispozici, není účelné jej nakupovat, protože jejich cena je vysoká.

Cenově dostupným řešením s dobrými metrologickými vlastnostmi (stabilita, přesnost) jsou platinové odporové teploměry. Jejich maximální chyba v rozsahu do 100 °C podle IEC751 [1] je $\pm 0,35$ °C v toleranční třídě A a $\pm 0,8$ °C v toleranční třídě B. Při provedených měřeních byl použit odporový teplotní senzor Pt100 M422 od firmy Heraeus zařazený v toleranční třídě B/3, tedy chybou menší než $\pm 0,27$ °C na rozsahu -100 až +100 °C. Jeho pořizovací cena se pohybuje pod částkou 130 Kč. [2]

U odporových čidel, stejně jako u všech ostatních nepřímých měření, je nutné počítat s přidavnými chybami způsobenými měřicími metodami, měřicími přístroji a výpočty. Tím se situace s určením chyby odporového referenčního teploměru komplikuje. V tomto případě je nutné postupovat v souladu s příslušnými normami a doporučeními (např. [3], [4]) a pak určit výslednou nejistotu z měření teploty předepsaným způsobem podle konkrétně použitých metod a přístrojů.

U provedených měření byla zvolena modifikovaná Ohmova metoda měření odporů s následným přepočtem odporu na teplotu podle tabelovaných údajů v IEC751 [1]. Modifikace Ohmovy metody spočívala v tomto případě v napájení měřeného senzoru proudem 1 mA dodávaným kalibrátorem Fluke 5500A a měřením jeho napětí kompenzační metodou. Zdrojem kompenzačního napětí byl opět kalibrátor Fluke 5500A a nulovým indikátorem byl

multimetr Escort 3146A, viz Obr.1. Tato konfigurace byla zvolena z důvodu dostupnosti těchto přístrojů a jejich vysoké přesnosti. Nejistota zanesená samotným měřením odporu byla v tomto případě vyčíslena na $\pm 0,068$ °C. Volba metody a zapojení by měla být vždy odvozena od dostupných přístrojů s ohledem na minimalizaci nejistot měření. Nejistota nepřímého měření musí být brána v úvahu už při volbě referenčního teploměru. V opačném případě můžeme i s výborným snímačem nepřímo měřícím teploty, dosáhnout horších výsledků, než u mnohem levnějšího přímo měřícího teploměru.

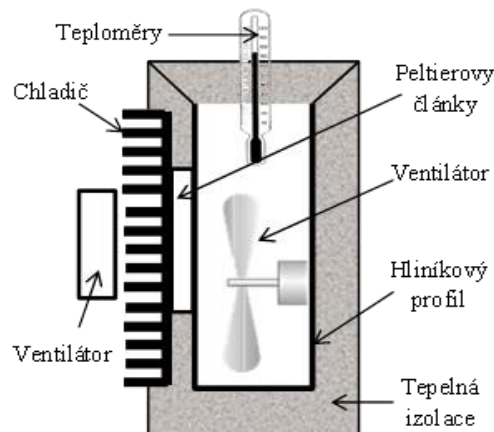
Srovnávací prostředky

K provedení srovnávací kalibrace však nestačí mít pouze referenční teploměr. Je potřeba vytvořit stabilní srovnávací prostředí, což je větším problémem. Ceny kalibračních píček nebo lázní k tomu sloužících se pohybují v řádu desetitisíců korun. I zde je možné si vypomoci bez tak rozsáhlých investic, avšak opět za cenu poněkud nižší přesnosti. Srovnávací píčka nebo lázeň se skládá z několika základních částí. První je samotné srovnávací prostředí, tedy masivní blok akumulující teplo s otvorem pro kalibrovaný teploměr nebo nádoba na kapalinu s mícháním. Nastavení přesné teploty zajišťuje topný (případně i chladicí) prvek opatřený regulací.

REALIZACE LÁZNĚ / PÍCKY

Zcela triviálním, nicméně funkčním, řešením je vytvoření vodní nebo olejové lázně v Dewarové nádobě s míchadlem a topným odporem s řízením dodávaného příkonu (výhodně může posloužit hrot mikropájky, výkonný odpor s regulovatelným zdrojem...). Tento systém lze snadno sestavit s použitím skladových zásob a dílenského vybavení. Princip fungování spočívá ve vyrovnání dodávaného a odváděného tepla. Nelze tak nastavit žádanou hodnotu teploty, což ale nevadí, jelikož je teplota srovnávána s údajem na referenčním teploměru. Kolísání teploty lázně je určitou měrou závislé na kolísání teploty okolí, což omezuje Dewarova nádoba. Toto kolísání je udržitelné v mezích $\pm 0,2$ °C. Hlavními nedostatky této metody jsou časová náročnost (doba ustálení při změně o 1 °C u realizovaného vzorku přesahovala 15 minut) a nutnost častých zásahů obsluhy.

Podobně je možné vytvořit i systém „pícky“, kde je vodní lázeň nahrazena temperovaným prostorem. Realizace takového prostoru může být různorodá, závislá na dostupných materiálech. Sestavený vzorek (Obr.2) sestává z dutého obdélníkového hliníkového profilu. V jeho vnitřní části je ventilátor sloužící k co nejrovnoměrnějšímu rozložení tepla v prostoru, kam se vkládá referenční a kalibrovaný teploměr. Z vnější strany profilu je připevněn



Obr.2: Náčrso provedení kalibrační píčky

topný/chladicí prvek, v našem případě tvořený dvěma Peltierovými články.

Druhá strana Peltierových článků je opatřena chladičem s ventilátorem, pro odvod tepla v režimu chlazení vnitřního prostoru.

Celý hliníkový profil je ze všech stran izolován PU pěnovou izolací. Tímto způsobem se snadno vytvoří provizorní kalibrační píčka. Regulace této píčky popsaným způsobem vyrovnávání tepla je obtížná – řízení příkonu musí být precizní. Kolísání lze udržet obtížně v mezích ± 1 °C a doba ustálení je velká.

Zpětnovazební regulace v lázni/píckce

Zásadní vylepšení spočívá v doplnění popsaných systémů o zpětnovazební regulaci. Zpětnovazební regulace jednak umožňuje nastavit žádanou hodnotu a hlavně výrazně zkracuje dobu ustálení (při změně o 1 °C na cca 2 minuty u lázně a 5 minut u pícky). Také zajišťuje vyšší stabilitu, tedy menší kolísání, nastavené teploty (až $\pm 0,1$ °C u lázně i pícky). Na druhou stranu tím roste složitost, doba nutná k sestavení a cena systému. U vytvořených prototypů zařízení byla zpětnovazební regulace realizována přes měřící kartu NI USB 6221. Jde o univerzální měřící kartu k PC vybavenou mimo jiné 16bitovými A/D a D/A převodníky, které byly pro zpětnovazební regulaci použity. Jako snímač teploty byl použit již zmíněný odporový teploměr Pt100 M422 napájený obvodem LM337 zapojeným jako zdroj proudu (1,33 mA). Výstupní signál z regulátoru (karty NI USB 6221 a obslužného software) je zesílen stejnosměrně vázaným zesilovačem s obvodem TDA2030A a dále veden na Peltierovy články (viz Obr.1)

Řídicí algoritmy obstarává software LabView. Tato konfigurace umožňuje snadné nastavení všech parametrů regulátoru, vizualizaci dat a jejich přímou analýzu. Základem algoritmu je PID regulátor z toolkitu PID and Fuzzy Logic. Nastavení optimálních konstant regulátoru je komplikovanou záležitostí, jejíž popis přesahuje rozsah tohoto článku. Hlavním sledovaným parametrem je pochopitelně stabilita nastavené teploty. U sestavených prototypů byla zkoušena Ziegler-Nicholsonova metoda.

Dosažené výsledky však nebylo možné nazvat optimálními především z hlediska stability. Nakonec se jako nejlepší ukázal heuristický přístup. Nejlepších parametrů (kolísání v mezích $\pm 0,1^\circ\text{C}$) bylo dosaženo pouze s P regulátorem (I a D složky = 0). Systém sám o sobě totiž již obsahuje značně velkou derivační složku (zpoždění vlivem A/D a D/A převodu, digitálního zpracování, šíření teploty v píce/lázni). Nenulová integrační konstanta způsobovala nestabilitu systému, což bylo způsobeno nerovnoměrným tepelným výkonem topení a chlazení.

Z těchto poznatků plyne příznivý závěr, že regulační smyčku v tomto případě není vůbec třeba realizovat tak složitě. Celý regulační obvod lze zjednodušit na senzor zapojený v můstku, P regulátor sestavený například ze stejnosměrně vázaného obvodu TDA2030A s nastavitelným ziskem (tedy P konstantou) a Peltierových článků (nebo jen topným odporem). Pícka/lázeň doplněná tímto regulátorem je snadno a levně (v řádu stovek Kč) sestavitelná a přesto může vytvořit srovnávací prostředí s deklarovanou stabilitou teploty až $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

ZÁVĚR

Popsaná metodika ani vybavení rozhodně nemůže konkurovat profesionálním přístrojům a postupům. Může však sloužit v případech, kdy je profesionální kalibrace zbytečně drahý komfort. I když přímá finanční náročnost popsaných řešení není velká, je třeba zvážit nejen jejich technické aspekty (hlavně dosažitelnou přesnost), ale i „cenu“ investovaného času. Všechny metody jsou již z principu více časově náročné, zvláště chceme-li s nimi dosahovat co nejpřesnějších údajů.

Realizací a měřením bylo zjištěno, že běžně používanou metodou kalibrace pomocí pevných bodů lze v amatérském prostředí dosáhnout přesnosti kolem $\pm 0,3^\circ\text{C}$ (tání ledu) až $\pm 1,2^\circ\text{C}$ (var vody kompenzovaný na tlak). Tyto metody však nejsou použitelné u teploměrů, které se nesmí dostat do kontaktu s nadměrnou vlhkostí, nebo takových, pro které by tyto pevné body byly mimo měřicí rozsah. Zároveň platí omezení na dva body a lineární aproximaci ostatních. To je u cejchování čidel s nelineární převodní charakteristikou nedostatečné.

Odstranit tuto nevýhodu lze využitím srovnávací metody, která ale k realizaci vyžaduje více prostředků. I přesto ji lze vytvořit i s minimálními náklady a s dosažením poměrně příznivých parametrů. Pokud se při srovnávací metodě využívá pícka, je možné měřit i se senzory, které nesmějí přijít do kontaktu s vodou.

Celková rozšířená nejistota kalibrací prováděných na popsaném prototypu kalibrační lázně s regulací byla vyčíslena na maximálně $\pm 0,5^\circ\text{C}$, přičemž rozsah, ve kterém bylo možné teplotu nastavovat, se pohyboval od 20°C do 60°C při pokojové teplotě cca 25°C .

V případě kalibrační pícky je rozsah regulace 18 až 48°C a rozšířená nejistota $\pm 0,6^\circ\text{C}$. Koeficient rozšíření u všech rozšířených nejistot je $k_U=2$, což odpovídá přibližně 95% pravděpodobnosti výskytu pravé hodnoty v intervalu definovaném rozšířenou nejistotou. Nejistoty byly vypočteny podle doporučení popsanych v dokumentu EAL R2 [3].

Vyšší hodnota rozšířené nejistoty u pícky je způsobena především horší homogenitou rozložení teploty v měřicím prostoru. Rozsah regulace je omezen jednak použitými konstrukčními materiály, ale hlavně maximálním topným/chladičím výkonem použitých Peltierových článků a kvalitou tepelné izolace. Všechny údaje platí pro zkonstruované prototypy a je pochopitelné, že s jinými konstrukčními prvky a měřicími přístroji bude dosaženo jiných parametrů. Uvedený příklad je možným vzorem jak řešit danou problematiku s maximálním využitím dostupných prostředků.

Všechny popsané metody svými parametry postačují při cejchování teplotních stupnic amatérských konstrukcí a kalibrování méně přesných teploměrů. Do této skupiny může spadat až překvapivě značné množství běžně používaných digitálních teploměrů. Tímto případem jsou i některé měřicí přístroje používané při výuce na KETFELZČU v Plzni, které byly popsaným kalibračním vybavením ověřovány.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2012-026, „Materiálové a technologické systémy v elektrotechnice“.

LITERATURA

1. *DIN-IEC-751*.
2. **Heraeus Sensor Technology**. Dependable platinum temperature sensors. [Online] 2011 <http://heraeus-sensor-technology.com/en/home/home.aspx> [cit: 20.2.2012]
3. **Dokumenty EA**. *Vyjadřování nejistot měření při kalibracích*. Praha : ČIA, 2001.
4. **Zábranský, J.** *Korekce a kompenzace při měření teplot*. Brno : VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009.
5. **Uhrová, H.** Nejistoty měření a zpracování výsledků. *Laboratorní cvičení z fyziky*. Praha : VŠCHT, 2001, strany 20-36.
6. **Hubina, M.** Nejistoty měření při kalibraci - návod a příklady použití. *Metrologie*. 30. 11. 2000, 3, strany 31-38.
7. **Tůmová, O.** *Metrologie a hodnocení procesů*. Praha: BEN, 2009.