

Smart Temperature Contact and Noncontact Transducers and their Application

Inteligentní teplotní kontaktní a bezkontaktní senzory a jejich aplikace

SMUTNÝ, Lubomír

Prof. Dr. RNDr. ✉ VŠB-TU Ostrava, Katedra automatizační techniky a řízení 352, ul. 17.
listopadu 15, 708 33 OSTRAVA-Poruba, 🖥️ lubomir.smutny@vsb.cz 🌐 URL adresa
<http://www.352.vsb.cz/pracovnici/smu50.asp>

***Abstrakt:** V příspěvku je popsán současný stav inteligentních snímačů pro měření teploty. Jsou zde charakterizovány standardní principy a vlastnosti kontaktních „smart“ senzorů s důrazem na nové provedení, materiály a trendy v této oblasti. Jsou uvedeny i méně tradiční principy teplotních snímačů (např. optické vláknové senzory), dále prudce se rozvíjející skupina bezkontaktních inteligentních teplotních senzorů. Stručně jsou charakterizovány poznatky a aplikační zkušenosti z této oblasti získané na KATR VŠB-TUO.*

***Abstract:** The contribution deals with describe of actual state of intelligent temperature transducers. There are characterized standard principles and properties of contact smart temperature transducers with an accent on the new implementation, materials and trends in this area. There are described even less traditional principles of temperature sensors (for instance optical fiber sensors), further quick developing group of noncontact smart temperature sensors. Briefly there are characterized a knowledge and application experiences from this area obtaining on the Department of Control Systems & Instrumentation VŠB-TUO.*

***Klíčová slova:** snímač, teplota, inteligentní senzor, vláknový senzor, kontaktní teploměr*

1 Úvod

Teplota je jednou z nejdůležitějších veličin ovlivňující téměř všechny stavy a procesy v pří-rodě. Pomineme-li klasické rtuťové a kovové bimetalové teploměry, uplatňují se obvykle standardní měřicí řetězce sestavené ze snímače, převodníku a vyhodnocovací a zobrazovací jednotky. Měření teploty zajišťuje snímač, jehož signál se v převodníku zesiluje, upravuje a většinou digitalizuje a vyhodnocovací jednotka ho ve vhodném tvaru zobrazuje a případně dokumentuje. Převodník a vyhodnocovací jednotka tvoří zpravidla jeden celek, v poslední době často samostatně nabízený jako inteligentní (smart) senzor teploty [DÁDO, 1999], [KABEŠ, 2004], [FUKAČ, 2005].

2 Dotykové snímače teploty

Teplota je v průmyslové praxi i v dalších aplikačních oblastech velmi často měřenou a řízenou veličinou a její přesné měření je nejčastěji prováděným měřicím úkonem. Přes rostoucí význam bezkontaktního měření se teplota měří v průmyslu častěji kontaktními (tj. dotykovými) metodami, tj. snímače teploty jsou v přímém kontaktu s měřeným médiem či tělesem.

Atomy krystalové mřížky kovu s rostoucí teplotou zvyšují amplitudu svých kmitů a kladou tak větší odpor průchodu elektronů. To je zjednodušená představa závislosti odporu kovů na teplotě, která je principem těchto senzorů.

Závislost elektrického odporu lze v rozsahu teplot 0°C až 100°C vyjádřit přibližným vztahem:

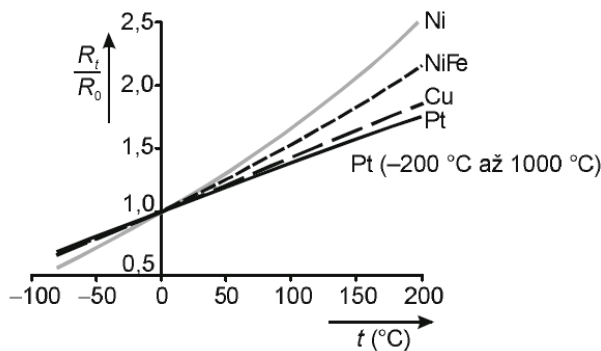
$$R=R_0(1+\alpha\theta), \quad \text{kde } \alpha \text{ [K}^{-1}\text{]} \text{ je teplotní součinitel odporu a } R_0 \text{ odpor při teplotě } 0^\circ\text{C}.$$

Pro kovové teplotní senzory se většinou využívá platina pro její chemickou netečnost, časovou stálost, vysokou teplotu tavení a také pro možnost dosažení vysoké čistoty (pohybuje se v rozmezí 99,9 až 99,999%). Kromě platiny se užívá rovněž nikl, želeto-nikl, měď, molybden nebo některé další slitiny [ŠPRINGL, 2005], [KADLEC, KMÍNEK, 2005].

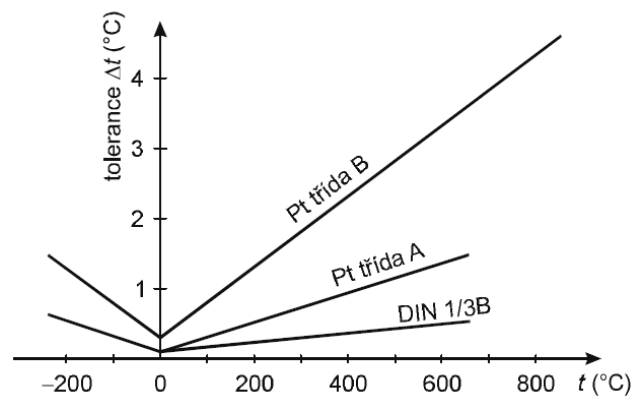
Poměr hodnoty odporu při 100°C a při 0°C se nazývá *odporový poměr*. Tento poměr současně vyjadřuje jakost odporu odporového snímače (např. pro platinu činí 1,385).

Stabilita měřícího odporu vyjadřuje dovolené kolísání hodnoty základního odporu při změně teploty. Udává, o kolik se změní odpor, když jej vystavíme maximální teplotě, pro kterou má být použit, a pak změříme, o kolik se změnil základní odpor při 0°C. Odchylku pak označujeme jako *nestabilita* měřícího odporu. Základní odpor R_0 je hodnota odporu při 0°C.

Důležitým parametrem odporových snímačů teplot je *otřesuvzdornost*. Je to odolnost snímače vůči mechanickému chvění, které by mohlo mít za následek mechanické poškození měřícího odporu a tím by vneslo do měření nepřesnost. Otřesuvzdornost se zkouší přímočarým kmitavým pohybem se sinusovým průběhem [SMUTNÝ, 2007].

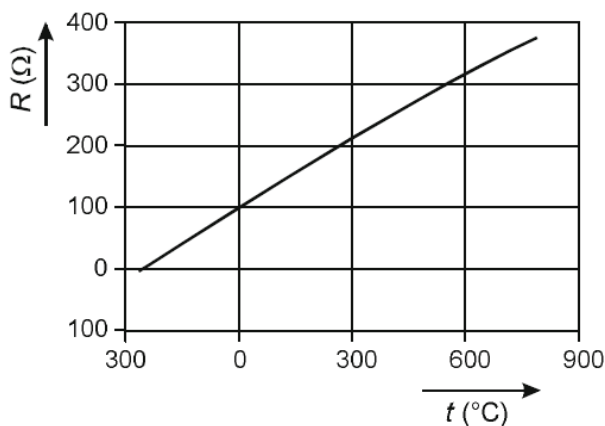


Obr. 1 – Závislost poměrného odporu na teplotě pro nejobvyklejší kovové odporové snímače

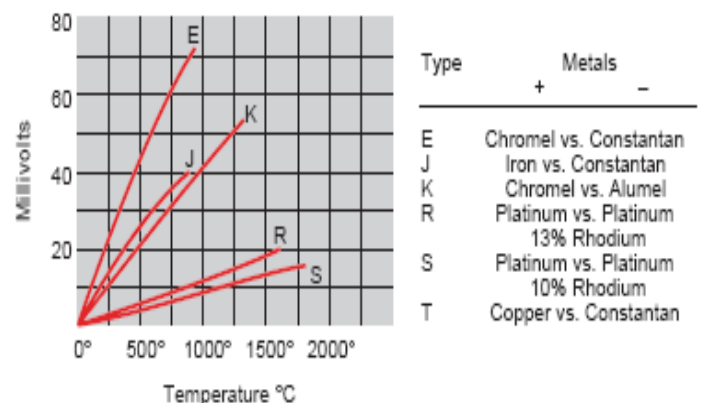


Obr. 2 – Toleranční třídy Pt odporových snímačů dle IEC-751

Na obrázcích 1 až 3 jsou uvedeny závislosti odporu nejběžnějších odporových teplotních snímačů, včetně tolerančních tříd dle IEC-751, které demonstrují lineární průběh charakteristik teplotní závislosti elektrického odporu.



Obr. 3 – Závislost odporu platinového snímače Pt 100 na teplotě

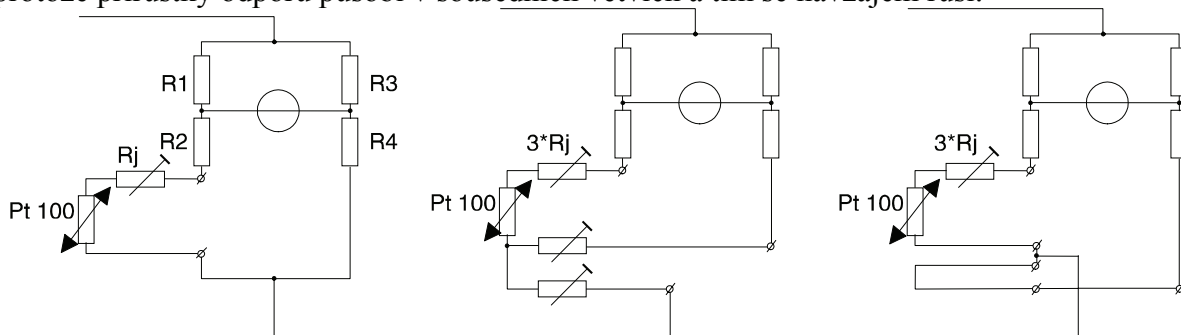


Obr. 4 – Závislost výstupního napětí základních typů termočlánků na teplotě

Dosud nejrozšířenějším způsobem měření teploty odporovými snímači je měření změn hodnot měřicího kovového odporu jeho zapojením do odporového (Wheatsonova) můstku. Měřicí teplotně závislý odpor (např. Pt 100) je zapojen do jedné větve můstku, změna teploty způsobí změnu měřicího odporu, tím dojde k rozvážení můstku. To je indikováno měřicím přístrojem zapojeným v úhlopříčce můstku. Hodnoty odporů jsou voleny tak, aby při minimální hodnotě rozsahu byl můstek vyvážen – ručička měřicího přístroje má nulovou výchylku, při maximálním rozsahu je proud do můstku nastaven tak, aby ručka ukazovala maximální hodnotu.

Odpor vedení mezi přístrojem a odporovým snímačem se vlivem změny teploty okolí mění a způsobuje *chybu měření*, neboť je zapojen spolu s měřicím odporem ve stejné větvi můstku. Proto se tohoto zapojení využívá pro kratší vzdálenosti mezi měřicím místem a vyhodnocovacím přístrojem a pro větší rozsahy teplot, aby relativní chyba byla v poměru k velikosti rozsahu menší [KADLEC & KMÍNEK, 2005].

Vliv změn odporu vedení na přesnost měření je prakticky odstraněn třívodičovým zapojením odporového snímače (viz obr. 5 b). U tohoto zapojení je snímač teploty a jeden vodič s vyrovnávacím odporem R_j zapojen do jedné větve odporového můstku a druhý vodič s vyrovnávacím odporem R_j do druhé větve. Třetí vodič je v napájecí větvi a napájecí bod je posunut až k odporovému snímači teploty. Vliv okolní teploty na vedení je eliminován, protože přírůstky odporu působí v sousedních větvích a tím se navzájem ruší.



Obr. 5 – Příklady zapojení odporového snímače Pt 100

a) Dvouvodičové zapojení b) Třívodičové zapojení c) Čtyřvodičové zapojení

U provozních teploměrů je důležitá jejich záměnnost, umožňující měřit s chybami v určitých dohodnutých mezích. Z tohoto důvodu jsou normami určeny základní hodnoty odporů včetně odchylek. Dle IEC se platinové měřicí odpory ($W_{100} = 1,385$) dělí do dvou tolerančních tříd:

- Třída A: Rozsah teplot: -200 °C až 650 °C , tolerance (°C): $\pm (0,15 + 0,002 \cdot |t|)$,
- Třída B: Rozsah teplot: -200 °C až 850 °C , tolerance (°C): $\pm (0,3 + 0,005 \cdot |t|)$,

Standardní hodnota odporu Pt senzoru je $100\ \Omega$ při 0 °C , kromě této hodnoty se ale vyrábějí též Pt senzory 50 , 200 , 500 , 1000 a $2000\ \Omega$. Pro teplotní závislost standardního měřicího odporu ($W_{100} = 1,385$, $R_0 = 100\ \Omega$) platí vztah:

$$R_{\vartheta} = R_0 [1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 (\vartheta - 100)],$$

přičemž dle IEC je $A = 3,90802 \times 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$, $B = -5,802 \times 10^{-7}\ \text{K}^{-2}$ a $C = -4,27350 \times 10^{-12}$ pro $\vartheta < 0\text{ °C}$, resp. $C=0$ pro $\vartheta > 0\text{ °C}$. Chyba linearit pro rozsah teplot od 0 °C do 100 °C činí asi $1,45 \cdot 10^{-3} R_0$ tedy cca $0,15\ \text{C}$ [KADLEC & KMÍNEK, 2005].







Kromě výše uvedených teplotních rozsahů se vyrábějí též vysokoteplotní senzory do teploty 1100 °C . Odporové senzory teploty se vyrábějí buď se dvěma, nebo čtyřmi vývody. U dvouvodičového provedení se přičítá odpor vývodů k odporu vlastního senzoru a vzniká tak jistá proměnná chyba [SMUTNÝ, 2007].

Polovodičové monokrystalické senzory teploty lze vyrobit z křemíku, germania nebo india, v praxi se však setkáváme pouze se senzory křemíkovými.

- *Teplotní součinitel odporu* je téměř konstantní v celém rozsahu teplot a jeho střední hodnota se pohybuje kolem $0,01 \text{ K}^{-1}$ (Pt snímače: $0,004 \text{ K}^{-1}$, NTC: $-0,03$ až $-0,06 \text{ K}^{-1}$).
- *Dlouhodobá stabilita*. Teplotní drift kolem $0,2 \text{ K}$ po 10000 hodinách nepřetržitého provozu při maximální provozní teplotě.
- *Linearita* je lepší než u NTC termistorů, ale horší než u platinových senzorů, nelinearitu lze však vhodnými metodami úspěšně korigovat.
- *Teplotní rozsah* je obvykle -55 až 150°C , k dostání jsou však běžně i senzory s horní teplotní hranicí 300°C .
- *Referenční hodnota odporu* při teplotě 25°C je obvykle 1000Ω nebo 2000Ω .

Termoelektrické teploměry využívají k měření teploty termoelektrických článků. Termoelektrický článek je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů A a B , které jsou na obou koncích spolu vodičově spojeny. Jestliže teplota ϑ_m jednoho spoje bude různá od teploty ϑ_s druhého spoje, vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud. Na Obr. 4 je uvedena závislost výstupního napětí základních typů termočlánků na teplotě, a na Obr. 6 jsou uvedeny příklady běžných termočlánků, jejich značení, rozsahy a přesnosti.

Mezinárodní barevné značení termočlánků
(termočlánky a kompenzační vedení)

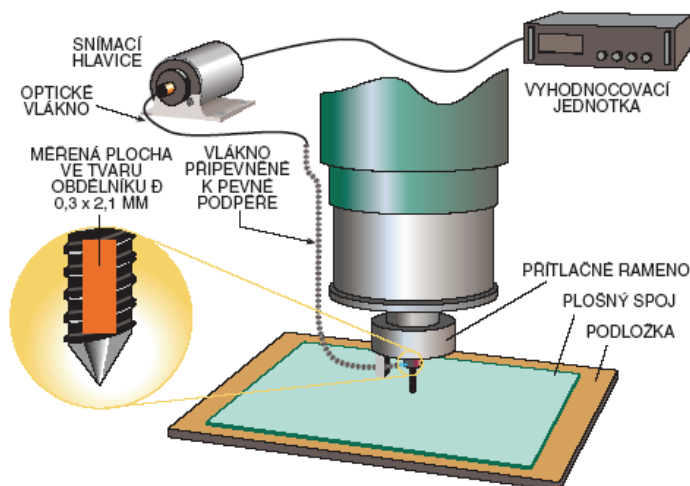
ANSI kód	kombinace slitin		barevné kódování		max. rozsah teplot	EMS (mV) elektromot. síla V daném rozsahu teplot	mezní chyba** (platí vyšší z hodnot)	
	+ vývod	- vývod	termočlánek	kompenzační vedení			standardní	speciální
J	ŽELEZO Fe (magnetic)	CONSTANTAN MEŠ-NIKL Cu-Ni			0 až 750°C (32 až 1382°F) Termočlánek 0 až 200°C (32 až 392°F) Kompenzační vedení	-8,095 až 69,553	0 až 750°C (32 až 1382°F) 2,2°C nebo 0,75% 1,1°C nebo 0,4%	
K	CHROMEGLA NIKEL- CHROM Ni-Cr	ALOMEGA NIKEL-HLINÍK Ni-Al (magnetic)			-200 až 1250°C (-328 až 2282°F) Termočlánek 0 až 200°C (32 až 392°F) Kompenzační vedení	-6,458 až 54,886	-200 až 1250°C (-328 až 2282°F) 2,2°C nebo 0,75% nad 0°C 2,2°C nebo 2,0% pod 0°C 1,1°C nebo 0,4%	
V*	MEŠ Cu	CONSTANTAN MEŠ-NIKL Cu-Ni	NENÍ STANOVENO	NENÍ STANOVENO	0 až 80°C (32 až 176°F) Kompenzační vedení			
T	MEŠ Cu	CONSTANTAN MEŠ-NIKL Cu-Ni			-200 až 350°C (-328 až 662°F) Termočlánek -60 až 100°C (-76 až 212°F) Kompenzační vedení	-6,528 až 20,872	-200 až 350°C (-328 až 662°F) 1,0°C nebo 0,75% nad 0°C 1,0°C nebo 1,5% pod 0°C 0,5°C nebo 0,4%	

Obr. 6 – Příklady běžných termočlánků, jejich značení, rozsahy a přesnosti

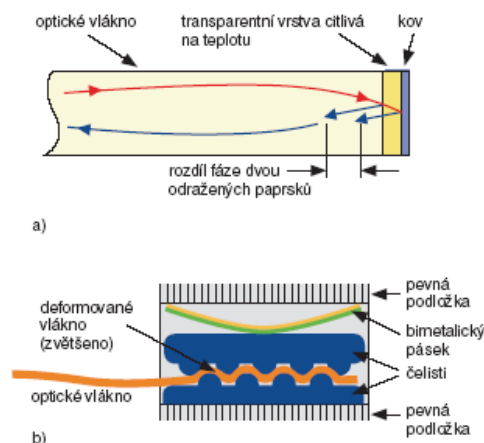
V zjednodušené formě můžeme závislost termoelektrického napětí na teplotě vyjádřit lineárním vztahem [Ďaďo, 1999]:

$$E = \alpha_{AB} [\vartheta_M - \vartheta_S]$$

Materiál na výrobu termoelektrických článků má vykazovat pokud možno velký a lineární přírůstek napětí E v závislosti na teplotě, stabilitu údaje při dlouhodobém provozu a odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům. Kovové páry materiálů pro vytvoření termočlánků jsou normalizovány (viz Obr. 6). V současné době se stále více využívá úpravy výstupního signálu přímo v hlavici termočlánku, neboť přenos nízkonapěťových signálů trpí rušením. Proto je měřicí řetězec koncipován tak, že na výstupu je buď zesílený analogový proudový signál (4 – 20 mA), nebo číslicový signál dle vybrané průmyslové počítačové sítě ILAN (např. HARD, CAN, ProfiBUS) [SMUTNÝ, 2007], [VOJÁČEK, 2004].



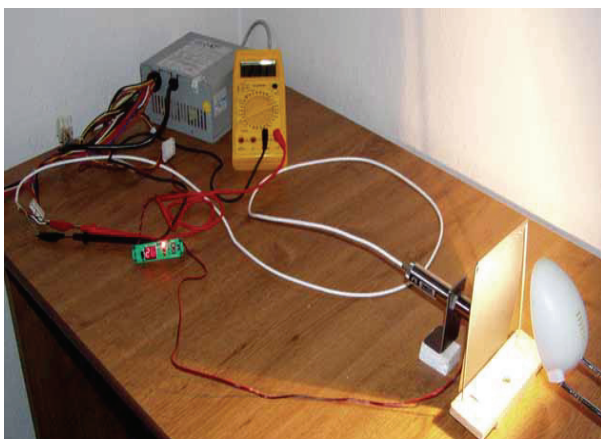
Obr. 6 – Příklad aplikace bezkontaktního senzoru teploty s využitím optického vlákna pro měření rychlých změn povrchové teploty



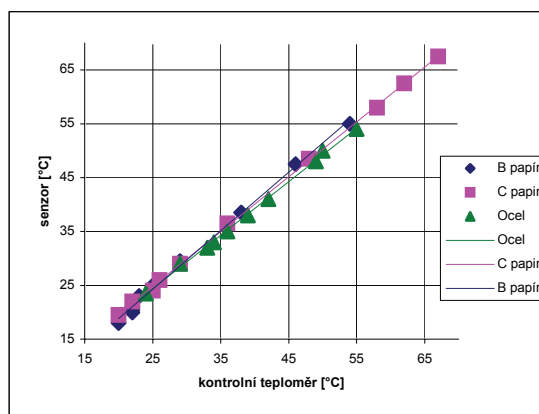
Obr. 7 – Optický vláknový senzor teploty:

- a) změna fáze světla prostřednictvím změny odrazu složek světla,
- b) změna amplitudy procházejícího světla prostřednictvím deformace (změny útlumu) vlákna

V průběhu vrtání otvorů v deskách plošných spojů může dojít ke zničení desky přehřátým vrtákem. Monitorovací systém OMEGA umožňuje velmi úzce směřovaným měřením teploty vrtáku zachytit strmý teplotní nárůst zahřívajícího se nástroje. Velmi malý optický bezkontaktní snímač je umístěn přímo v přítlačné části vrtačky (dokáže monitorovat okamžitou teplotu vrtáku přímo během vrtání.). Vyhodnocovací jednotka poté vyhodnotí kritickou úroveň signálu a spustí alarmní akci.



Obr. 8 Měřicí pracoviště pro testování bezkontaktního senzoru s termočlánkovým detektorem



Obr. 9 Statická charakteristika infračerveného teplotního senzoru.

Na katedře ATŘ byla realizována řada sad měřicích přípravků pro testování kontaktních i bezkontaktních teplotních senzorů, s důrazem na nové polovodičové inteligentní „smart“ senzory se zajímavými výsledky. Na obr. 8 a obr. 9 je ukázka měřicího pracoviště pro testování bezkontaktního senzoru s termočláňkovým detektorem OMEGA a příklad naměřených výsledků.

8 Závěr

Na přesnost měření teploty kontaktními snímači má obecně vliv více činitelů a chyby jimi způsobené můžeme zařadit do tří hlavních skupin:

1. Chyby jednotlivých členů elektrického obvodu, které mají vliv na výslednou chybu měření teploty (rozptyl vlastností termočláňkových vodičů, změny odporu přírodních vodičů, vliv rušení)
2. Chyby způsobené umístěním snímače a tepelnými vlastnostmi prostředí, jímky, armatury, apod.
3. Chyby způsobené dynamickými vlastnostmi samotného snímače.

Hlavním předpokladem správného měření teploty je vedle správného výběru principu a provedení snímače, je správné umístění snímačů teploty v měřicím místě, aby byl zajištěn správný přestup tepla a dokonalý styk s měřeným prostředím.

V posledních letech také došlo k velkému rozmachu ručních digitálních snímačů teploty s velkým výběrem vyměnitelných teplotních senzorů (ponorné, vzduchové, pro povrchovou teplotu atd.). Signál z teplotního senzoru je přístrojem elektronicky vyhodnocen (včetně kompenzace teploty srovnávacího spoje u termočláňkových snímačů) a výsledek zobrazen na displeji, případně zaznamenan do paměti, přenesen do počítače, či vytisknut. Přístroje jsou provedeny buď jako jednoúčelové teploměry, nebo jako multimetry (pro měření více veličin). Dalším novým trendem je úprava inteligentních („smart“) teplotních senzorů pro komunikaci v bezdrátových sítích WLAN. Na katedře ATŘ byla realizována řada sad měřicích přípravků pro testování kontaktních i bezkontaktních teplotních senzorů, s důrazem na nové polovodičové smart senzory se zajímavými výsledky.

Tento příspěvek byl zpracován v rámci řešení projektu FR VŠ 754/2007/Aa.

9 Použitá literatura

- ĎAĎO, S. 1999. Perspektivní senzory a obvody pro měření teploty. *AT&P Journal*, 1999, č. 6, s. 26-29.
- KABEŠ, K. 2004. Přehled trhu – inteligentní převodníky teploty. *Automatizace*, 47, 2004, č. 1, s. 33.
- KADLEC, K. & KMÍNEK M. 2005. *Měřicí a řídicí technika*. Praha: VŠCHT, Ústav počítačové a řídicí techniky. [on-line] ver. 2.01, únor 2005. Dostupný z <<http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/>>.
- SMUTNÝ, L. 2000. Smart Temperature Sensors for Measurement and Control. In *Proceedings of International Conference FME VŠB-TUO, Session 04 „Automatic Control and Applied Informatics“*. Ostrava: KAKI, 2000, paper 33, 10 pp.
- SMUTNÝ, L. 2007. Teplotní senzory – současný stav a další vývoj. In *Sborník konference „Měření a regulace teploty v teorii a praxi“*. Ostrava: TANGER, 04/2007, s. 1 – 6, ISBN 978-80-86840-31-4.
- ŠPRINGL, V. 2005. *Měření teploty – kovové odporové senzory teploty* [on-line]. Dostupný z <<http://www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1095-Mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>>.
- VOJÁČEK, A. 2004. *Optovláňkové snímače teploty pro náročná měření* [on-line]. Dostupné z <<http://automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2006032701>>.