

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření teploty

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: TEMPERATURE MEASUREMENT

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Principy měření teploty

Teplota je veličina, která ovlivňuje téměř všechny stavy a procesy v přírodě. Při měření teploty se měří obecně jiná veličina, která je na teplotě závislá podle určitého vztahu, z něhož je možno teplotu vyčíslit. K měření teploty se využívá celá řada funkčních principů, jejichž přehled je uveden v tab. I.

V tomto příspěvku jsou popsány principy vybraných dotykových snímačů teploty, přičemž hlavní pozornost je věnována senzorům teploty, které poskytují elektrický výstupní signál a jsou vhodné pro provozní měření teploty. Podrobnější informace o snímačích teploty je možno nalézt v literatuře (1, 2, 3). Bezdotykovému měření teploty bude věnován další příspěvek v následujícím čísle časopisu.

Termoelektrické snímače teploty

Základem je termoelektrický článek tvořený dvěma vodiči z různých kovových materiálů. Principiální uspořádání obvodu termoelektrického snímače je naznačeno na obr. 1.a. Obvod se skládá ze dvou kovových vodičů A a B navzájem

spolu spojených. Jeden z bodů spojení označujeme jako *měřicí spoj*, druhý jako *srovnávací spoj*. Jestliže se teploty obou spojů liší, vznikne termoelektrické napětí a obvodem prochází proud (*Seebeckův jev*). V zjednodušené formě můžeme závislost termoelektrického napětí na teplotě vyjádřit lineárním vztahem:

$$E = \alpha_{AB} \cdot t_m + \alpha_{BA} \cdot t_s = \alpha_{AB} \cdot (t_m - t_s) \quad (1)$$

kde t_m a t_s je teplota měřicího a srovnávacího spoje, α_{AB} koeficient závislý na materiálech použitých kovů, přičemž platí, že $\alpha_{AB} = -\alpha_{BA}$

Rovnice (1) platí jen pro úzké rozmezí teplot. Pro přesnější vyjádření se používá vztah:

$$E = \sum_{i=0}^n a_i \cdot \Delta t^i \quad (2)$$

kde n je rovno 2 až 14 podle požadované přesnosti, rozsahu teplot a typu termoelektrického článku.

Materiál na výrobu termočlánků by měl vykazovat pokud možno velký a lineární přírůstek E v závislosti na teplotě, stabilitu údaje při dlouhodobém provozu a odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům. Dvojice materiálů pro termočlánky jsou normalizovány a jednotlivé termočlánky se označují velkými písmeny. Pro průmyslové použití jsou nejrozšířenější termočlánky typu J (železo-měďnikl) pro rozsah teplot od -200 do $+600$ °C, typu K (niklchrom-niklhlinit) v rozsahu od -50 do $1\,000$ °C a typu S (platinarhodium-platina) v rozsahu od 0 do $+1\,300$ °C. Hodnoty termoelektrických napětí jsou zřejmě z charakteristik na obr. 2.

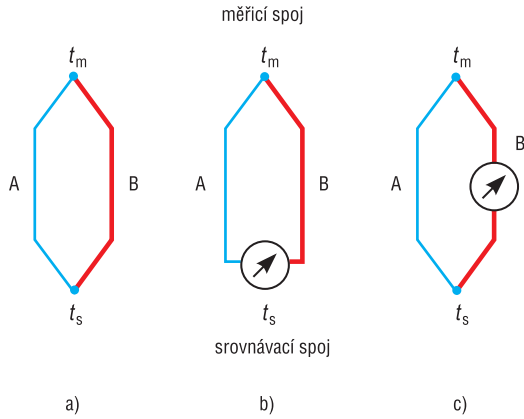
Termoelektrický článek je zdrojem napětí řádově v mV. Chceme-li změřit velikost termoelektrického napětí, musíme zapojit do obvodu snímače měřicí přístroj buď tak, že rozpojíme srovnávací spoj (obr. 1.b) nebo tak, že zapojíme měřidlo do jedné přerušené větve termočlánku (obr. 1.c).

Obě přípojovací svorky měřidla musí mít stejnou teplotu, aby při zapojení měřidla do obvodu nedošlo ke změně termoelektrického napětí. K prodloužení termočlánku do místa srovnávacího spoje se používá tzv. *kompensační vedení*, které

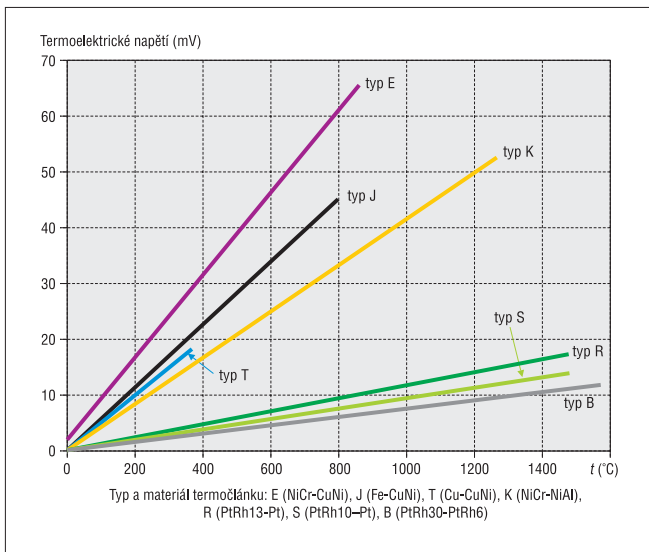
Tab. I. Principy využívané k měření teploty

Skupina	Typ teploměru	Princip měření	Teplotní rozsah (°C)
Dilatační teploměry	plynový	změna tlaku	$-5 - +500$
	tenzní	změna tenze par	$-40 - +400$
	kapalinový	změna objemu	$-200 - +750$
	kovový	délková roztažnost	$0 - +900$
Elektrické teploměry	termoelektrické	termoelektrický jev	$-200 - +1\,700$
	odporové kovové	změna elektrického odporu	$-250 - +1\,000$
	odporové polovodičové	změna elektrického odporu	$-200 - +400$
	diodové	změna prahového napětí	$-200 - +400$
Speciální teploměry	teploměrné barvy	změna barvy	$+40 - +1\,350$
	optovláknové senzory	amplituda či fáze při šíření nebo odrazu světla	$+40 - +1\,350$
Bezdotykové teploměry	širokopásmové pyrometry	zachycení veškerého teplotního záření	$-40 - +6\,000$
	úzkopásmové pyrometry	zachycení úzkého svazku teplotního záření	$-40 - +3\,000$
	poměrové pyrometry	srovnání dvou svazků teplotního záření	$+700 - +2\,000$
	IČ termokamery	snímání teplotního obrazu tělesa	$-40 - +2\,000$

Obr. 1. Obvod termoelektrického článku



Obr. 2. Statické charakteristiky termočlánků

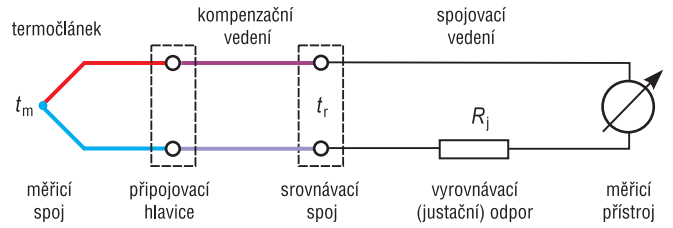


je vyrobeno buď ze stejných materiálů jako termočlánek, nebo u termočlánků z vzácných kovů je z materiálů, které mají v určitém teplotním rozmezí stejné termoelektrické vlastnosti. U spojovacího vedení se upravuje velikost odporu vyrovnávacím (justačním) odporem na stanovenou hodnotu, obvykle 20 Ω (obr. 3.).

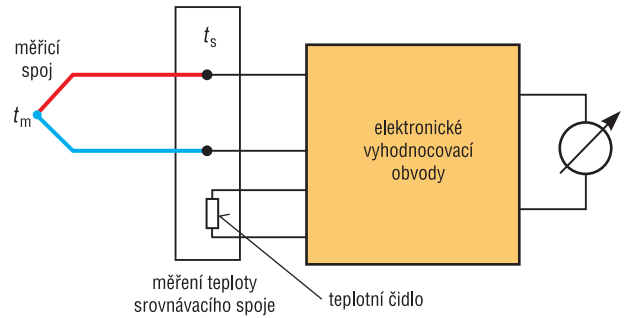
Z rovnice (1) plyne, že teplotu srovnávacího spoje t_s je nutno udržovat konstantní, anebo je třeba kolísání teploty tohoto spoje vhodně kompenzovat. Kompenzační obvody jsou běžně integrovány do současných elektronických převodníků (obr. 4.). U číslicových měřicích systémů se nejčastěji používá tzv. izotermická svorkovnice, jejíž teplota se snímá např. polovodičovým odporovým teploměrem a příslušná korekce se číslicově vyhodnotí.

Provedení termoelektrického snímače pro provozní aplikace je patrné z obr. 5. Termoelektrický snímač teploty je vlastně termoelektrický článek, umístěný v ochranné armatuře, která zabraňuje jeho mechanickému poškození a chrání jej před nepříznivými fyzikálními a chemickými vlivy. Vlastní termoelektrický článek je vložen do stonkové trubky zakončené přírubou, na které je svorkovnice s připojenými vývody termočlánku. Materiál vnější ochranné trubky je různý podle charakteru prostředí a velikosti měřené teploty. Teploměrná jímka chrání teploměr před nepříznivými účinky prostředí, zhoršuje však jeho dynamické vlastnosti. Termoelektrické měřicí vložky se vyrábějí

Obr. 3. Zapojení termočlánku



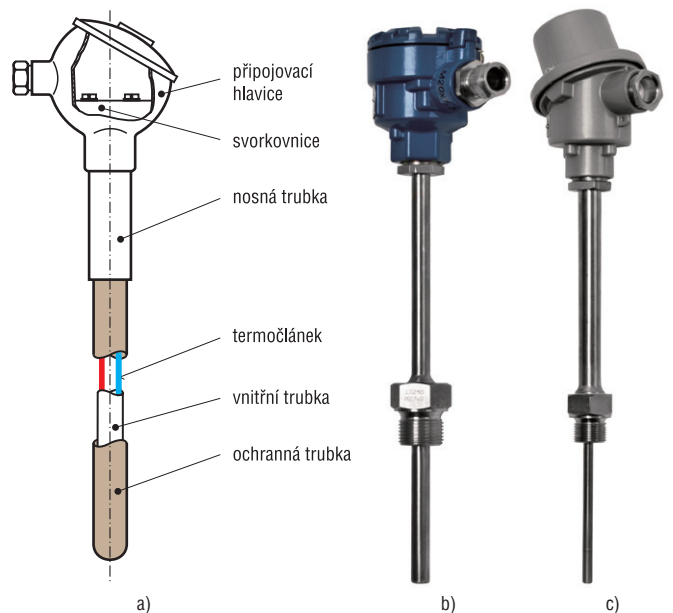
Obr. 4. Automatická kompenzace kolísání teploty srovnávacího spoje



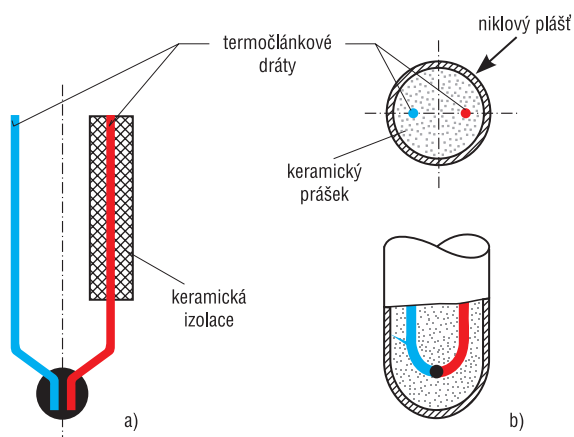
s jedním nebo dvěma články. Termočlánekové dráty jsou vzájemně elektricky izolované např. keramickými trubičkami (obr. 6.a). Moderním typem kompaktních snímačů jsou tzv. *plášťové termočlánky*, u nichž jsou dráty uloženy v niklové nebo nerezové trubičce vyplněné práškovým MgO nebo Al₂O₃ (obr. 6.b). Průměr kovového pláště činí 0,15 až 10 mm. Plášťové termočlánky lze ohýbat, mají malou časovou konstantu a umožňují měření i na těžko přístupných místech.

Termočlánek používaný pro provozní měření by měl být pravidelně kontrolován v intervalu jednoho až 1,5 roku. V některých

Obr. 5. Termoelektrický snímač s ochrannou trubkou; a) schéma snímače, b) snímač ModuTEMP 70 bez převodníku, c) s převodníkem v připojovací hlavici od firmy JSP (4)

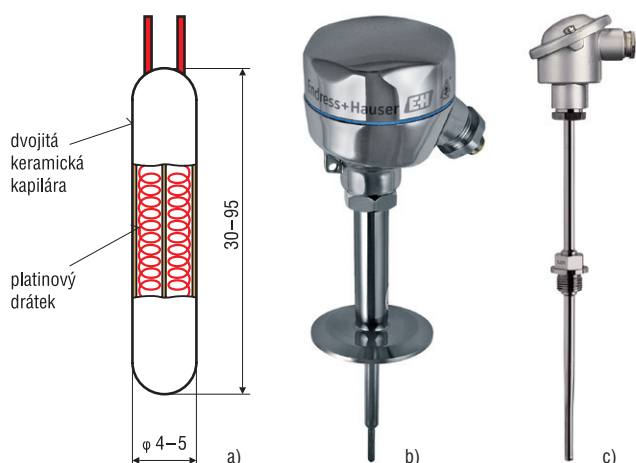


Obr. 6. Termočlánek; a) detail termočládku, b) plášťový termočlánek

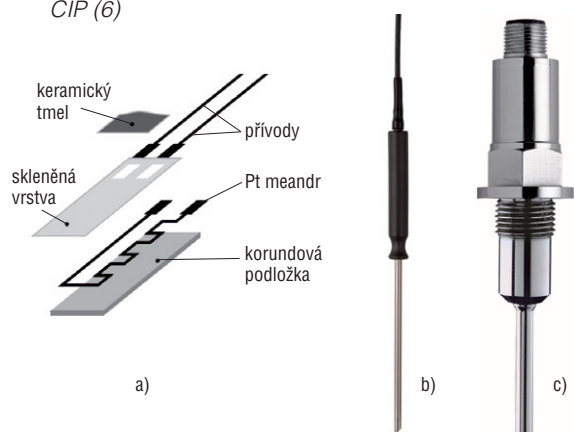


případech je zapotřebí umožnit výměnu termočládku i během provozu technologického zařízení. Pro kontrolu měřicího řetězce pro vyhodnocování signálu termočládku slouží přenosná kalibrační zařízení, která mohou měřit velikost signálu i simulovat

Obr. 7. Kovový odporový teploměr; a) měřicí odpor, b) snímač E+H Therm TM401 pro hygienické aplikace (5), c) závitový teploměr Jumo Etemp B (6)



Obr. 8. Plošný odporový teploměr; a) schéma senzoru, b) ponorná sonda, c) šroubovací sonda vhodná pro procesy CIP (6)



termočládkové signály. Pro zjištění stavu termočládkového snímače lze s výhodou využít měření jeho elektrického odporu. Nízká hodnota odporu obecně indikuje uspokojivý stav, zatímco vysoký odpor může signalizovat konec životnosti termočládku.

Odporové snímače teploty

U odporových teploměrů se využívá závislost elektrického odporu na teplotě, přičemž vlastní senzor bývá realizován nejčastěji kovovým nebo polovodičovým rezistorem.

Pro **kovové odporové teploměry** platí, že jejich elektrický odpor R vzrůstá s teplotou t . Pro čisté kovy je možno závislost vyjádřit polynomem s konstantami A, B, C:

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 + \dots) \quad (3)$$

kde R_0 je odpor při vztažené teplotě 0°C . V technické praxi vystačíme s aproximační rovnicí 2. stupně s konstantami α , β :

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0) + \beta \cdot (t - t_0)^2] \quad (4)$$

a pro menší teplotní rozsah ($\Delta t < 100^\circ\text{C}$) lze použít lineární vztah, kde α je teplotní součinitel definovaný v pracovním bodě t_0 .

Pro realizaci odporových teploměrů se používají především čisté kovy, jejichž teplotní součinitel má být stálý a pokud možno co největší. Nejčastěji používaným materiálem je platina, poněvadž může být vyrobena ve standardně čistém stavu a je fyzikálně i chemicky stálá. U provozních odporových teploměrů je důležitá záměnnost, umožňující sestavovat měřicí obvody ze snímačů a převodníků tak, aby bylo možné měřit s chybami v určitých dohodnutých mezích bez ověřování přesnosti. Z tohoto důvodu jsou normami určeny základní hodnoty platinových měřicích odporů včetně přípustných odchylek. Čidlem odporového snímače teploty je *měřicí odpor*, který je nejčastěji tvořen spirálovitě stočeným tenkým platinovým drátkem ($\varphi 0,05 \text{ mm}$); uloženým do keramického nebo skleněného tělíska (obr. 7.a). Základní odpor při 0°C činí $R_0 = 100 \Omega$ a prvek je obvykle označován jako *Pt100*. Měřicí rozsah je od -200°C do 850°C . Měřicí odpor je umístěn v ochranné trubce a v ochranné jímce podobně jako tomu bylo u termočládků. Příklady provedení provozních snímačů s odporovým teploměrem určené pro aplikace v potravinářském průmyslu jsou na obr. 7.b a 7.c.

Měřicí odpory se vyrábějí rovněž tenkovrstvou technologií, při níž se platinový odpor vytvoří na ploché korundové destičce technikou napařování a iontového leptání. Struktura takového plošného odporového teploměru je patrná z obr. 8.a. Plošné měřicí odpory s vrstvičkou platiny ve formě jednoduchého meandru mají miniaturní rozměry, mají rychlejší odezvu než odpory drátové, mají obvykle vyšší odpor (např. 500 nebo $1\,000 \Omega$) a jsou levnější. Drátové odpory jsou však časově stálější. Příklady měřicích sond s odporovými senzory jsou na obr. 8.b,c.

Polovodičové odporové senzory teploty podobně jako kovové využívají závislost odporu na teplotě a existuje jich několik druhů. *NTC-termistory (negastory)* jsou vyráběny spékáním různých kovových oxidů a závislost odporu na teplotě je nelineární a odpor s teplotou klesá. Termistory jsou vyráběny v širokém rozmezí hodnot odporu od jednotek Ω až do několika $\text{M}\Omega$. Teplotní součinitel je asi o řád vyšší než u kovů. Pro účely měření se používají nejčastěji perličkové termistory ve skleněném držáku. Průměr perličky bývá $0,2$ až 3 mm . Výhodou

termistorů je velká citlivost a malá hmotnost čidla, což umožňuje měření velmi malých a rychlých teplotních změn. Běžný měřicí rozsah teploty je od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (výjimečně i přes $400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Nevýhodnou vlastností termistorů je jejich časová nestálost. Zlepšení lze dosáhnout výběrem a umělým stárnutím. Závislost odporu na teplotě pro NTC-termistor je nakreslena na obr. 9. pro srovnání spolu s charakteristikami pozistoru a platinového odporového teploměru.

PTC-termistory (pozistory) jsou polovodičové součástky s kladným teplotním součinitelem odporu. Vyrábějí se z polykrytalické ferroelektrické keramiky, např. BaTiO_3 . Z charakteristiky na obr. 9. je patrné, že dochází nejprve k mírnému poklesu odporu, načež v poměrně úzkém teplotním rozmezí elektrický odpor prudce stoupá. Použití pozistorů je dáno tvarem jejich charakteristiky a jsou vhodné zejména pro měření ve velmi úzkém teplotním intervalu, zejména pak pro signalizační účely.

Pro vyhodnocení změn odporu u odporových teploměru se často používá nevyvážený Wheatstoneův můstek, který je napájen stejnosměrným stabilizovaným napětím. Velikost napájecího napětí měřicího můstku musí být volena tak, aby nedocházelo k nežádoucímu oteplení měřicího odporu Joulovým teplem. Jiný způsob vyhodnocení signálu z odporového teploměru je uveden u tzv. čtyřvodičového zapojení na obr. 10. Měřicím odporem protéká konstantní proud a spád napětí na odporu se měří pomocí zesilovače s vysokým vstupním odporem. Změny odporu se vyhodnocují na základě Ohmova zákona, přičemž nulová poloha se nastavuje změnou velikosti kompenzačního napětí.

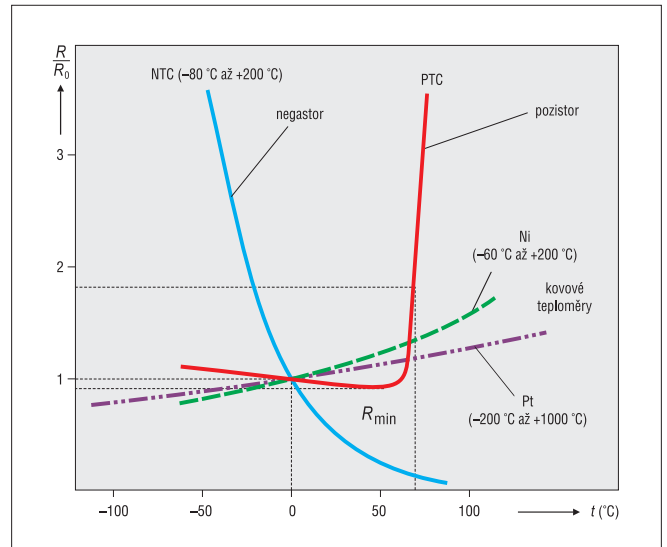
Zpracování signálů elektrických teploměru

Výstupní napětí termočlánku ani změna odporu u odporových senzorů se v průmyslových aplikacích nepoužívá přímo pro vyhodnocení měřené teploty. Využívají se převodníky, které napěťový signál termočlánku nebo změnu odporu senzoru transformují na unifikovaný proudový nebo napěťový výstupní signál. Převodník musí signál ze senzoru zesílit a vhodně upravit. V průmyslové praxi se k vyhodnocování signálu termoelektrických a odporových snímačů teploty často používají tzv. dvouvoďičové převodníky, jejichž princip byl popsán v úvodním článku tohoto seriálu o měření provozních veličin v minulém čísle.

U číslicových teploměru se analogový signál teplotního senzoru zpracovává na číslicový výstupní signál. Blokové schéma teploměru s číslicovým výstupem je na obr. 11.

Termočlánek je na vstup zesilovače připojen prostřednictvím izotermické svorkovnice pro kompenzaci vlivu změn teploty srovnávacího spoje. Po zesílení je analogový signál převeden na signál číslicový pomocí analogově-digitálního převodníku. Vyhodnocovacím zařízením je číslicový displej, který slouží k zobrazení hodnoty měřené teploty. Při vyhodnocení signálu se využívá ve značné míře mikroprocesorová technika. Při zpracování signálu z teplotního čidla se provádí výpočet podle příslušné charakteristiky snímače a elektronika teploměru zajišťuje i automatickou kompenzaci kolísání teploty srovnávacího spoje. U provozních teploměru se elektrické analogové nebo číslicové obvody umísťují do hlavice teploměru a tvoří s vlastním snímačem teploty jediný konstrukční celek. Moderní snímače mohou být vybaveny i programovatelným převodníkem s bezdrátovou komunikací pro přenos dat.

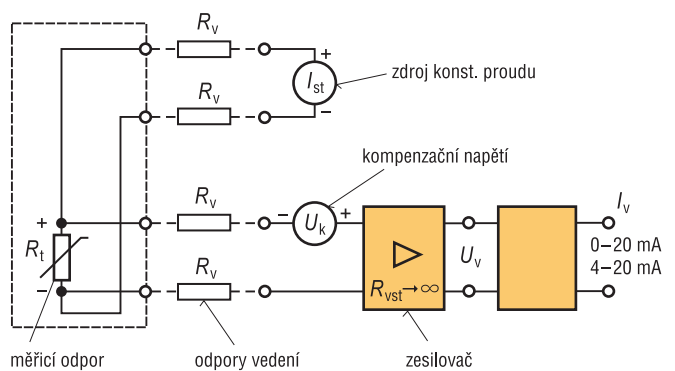
Obr. 9. Závislost odporu na teplotě pro odporové senzory



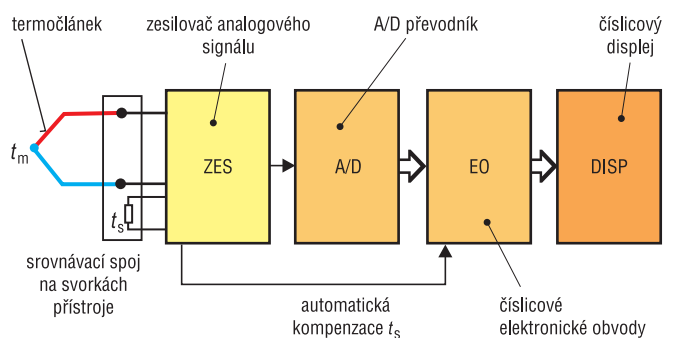
Zabudování dotykových teploměru

Jedním ze základních předpokladů správného měření teploty je vhodné umístění snímačů teploty, aby byl zajištěn správný přestup tepla a dokonalý styk s měřeným prostředím. Měřicí místo musí být voleno vhodně tak, aby byla zajištěna snadná montáž, demontáž a údržba teploměru. Teploměry je nutno téměř vždy umístit do teploměrných jímek, které chrání teploměr

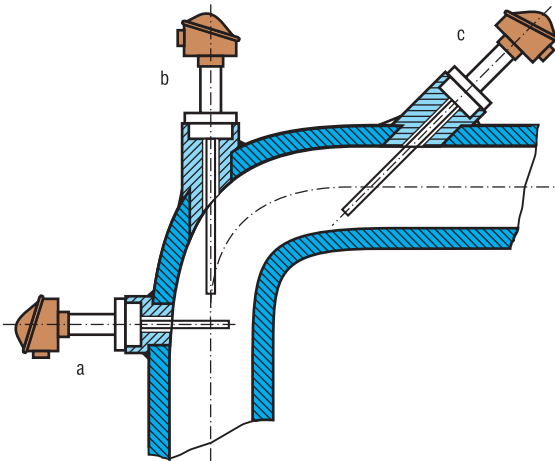
Obr. 10. Čtyřvodičové zapojení obvodu s odporovým teploměrem



Obr. 11. Teploměr s číslicovým výstupem



Obr. 12. Zabudování teploměru do potrubí



proti chemickým a mechanickým vlivům. Při umístění teplotního snímače do jímky dochází vždy k značnému ovlivnění jeho dynamických vlastností. Je to způsobeno tím, že hmota jímky bývá mnohdy několikanásobně větší než hmota vlastního čidla. Pro správné vyhodnocení teploty je nutno uvažovat vzniklou dynamickou chybu.

Při měření vyšších teplot *plynů* je výsledek měření ovlivňován jednak vedením tepla teplotní sondou, jednak sáláním. Tyto tepelné ztráty je třeba omezit např. pomocí krytů teploměru nebo izolováním potrubí v okolí zabudovaného teploměru. Pro zvýšení přestupu tepla se umísťuje teploměr do místa s vyšší

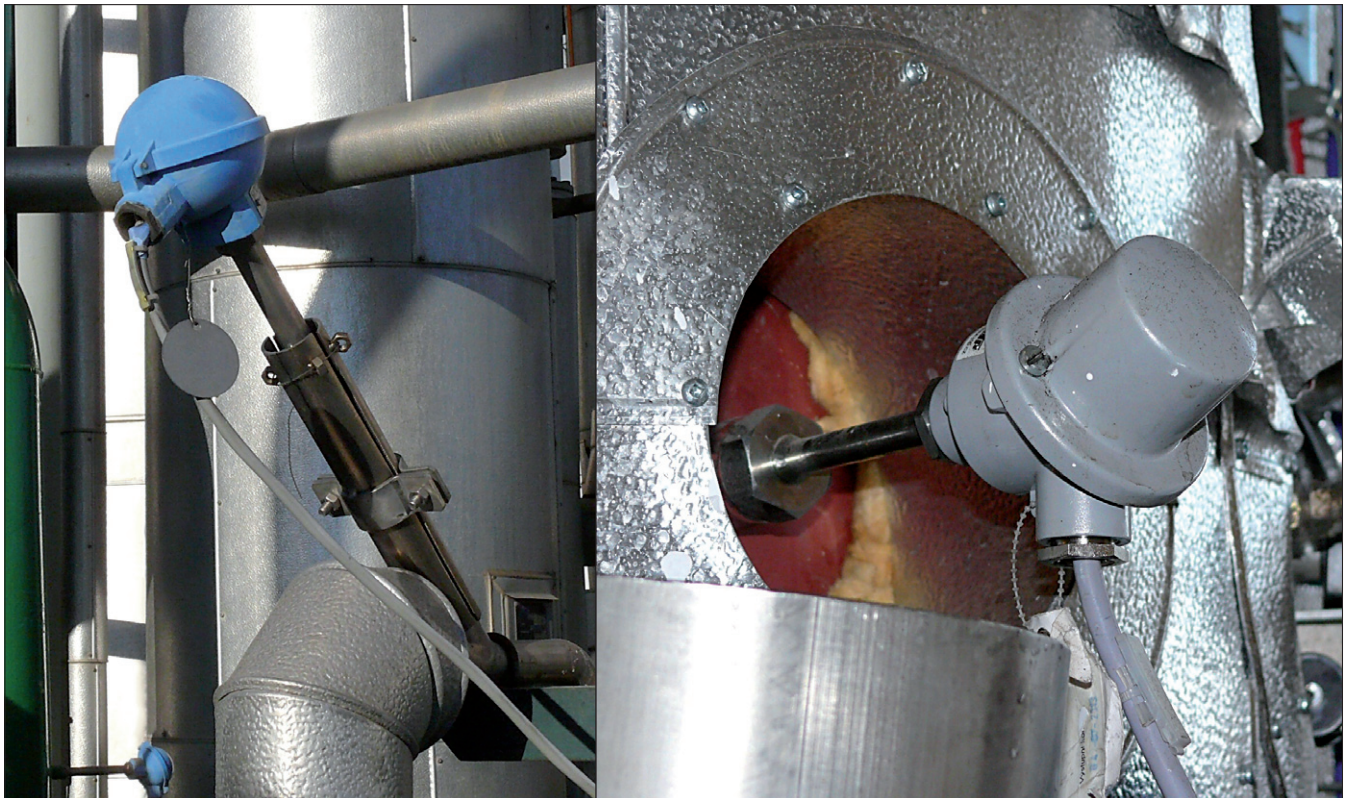
rychlostí a nikoliv do koutů bez proudění. Čidlo teploměru má zasahovat přibližně do osy potrubí. Do potrubí větších průměrů se umísťuje teploměr kolmo na směr proudění (obr. 12.a). U potrubí menších průměrů (do 200 mm) se umísťuje teploměr šikmo (pod úhlem 45°) proti směru proudění (obr. 12.c.), popřípadě do kolena potrubí proti směru proudění (obr. 12.b).

Při měření teploty *kapalin v nádobách* se vyžaduje míchání měřené kapaliny, aby byl zvětšen součinitel přestupu tepla, a aby bylo dosaženo homogenního teplotního pole. Ztráty tepla vedením se omezí dostatečným ponorem teploměru. Měření teploty *proudící kapaliny* se provádí podobně jako měření teploty proudícího plynu a platí proto podobné zásady. Zjednodušení spočívá v tom, že není třeba provádět ochranu proti ztrátám tepla sáláním. Na obr. 13. jsou ukázky zabudování snímačů teploty na provozním technologickém zařízení.

Kalibrace dotykových snímačů teploty

Kalibrace dotykových teploměru se provádí v souladu se zákonem o metrologii a navazujícími předpisy. Kalibrační postup zahrnuje vnější prohlídku snímače teploty, zkoušku stálosti a zkoušku správnosti měřidla. Správnost zkoušeného snímače teploty se zajišťuje porovnávací metodou s etalonem. Měření probíhá v termostatu, kterým může být kapalinová lázeň nebo kalibrační pírka. Při měření se umístí zkoušený teploměr do kapalinové lázně nebo do otvoru pícky, který nejlépe odpovídá největšímu průměru jímky teploměru. Současně se zkoušeným teploměrem se do odpovídajícího otvoru umístí etalon. Nárůst teploty (nestabilita) před čtením údajů teploměru i během celého čtení musí

Obr. 13. Ukázky zabudování snímačů teploty; vlevo – snímač teploty v nevýbušném provedení (teplota ethanolu v potrubí v lihovaru Dobrovice, Tereos TTD, a. s.), vpravo – snímač teploty v nádobě opatřené tepelnou izolací (teplota v zrneči v cukrovaru Dobrovice, Tereos TTD, a. s.) (foto M. Kmínek)



odpovídat předepsaným hodnotám. Kontrola správnosti se provádí obvykle ve 3 bodech, rovnoměrně rozložených v rozsahu provozních teplot snímače. Další podrobnosti ke kalibraci teplotoměrů lze nalézt v (1).

Souhrn

Článek uvádí přehled funkčních principů využívaných při provozním měření teploty. V části věnované dotykovým snímačům teploty jsou podrobněji popsány teploměry termoelektrické a odporové snímače teploty. Jsou popsány způsoby zpracování signálů elektrických teploměrů a způsoby zabudování provozních teploměrů do technologických aparatur. Připojena je zmínka o kalibraci dotykových snímačů teploty.

Klíčová slova: snímače teploty, termočlánky, odporové teploměry, zabudování snímačů teploty.

Literatura

1. KADLEC, K.: Měření teploty. In KADLEC, K., KMÍNEK, M., KADLEC, P. (EDIT.) ET AL.: *Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích*. Ostrava: Key Publishing, 2015, s. 90–135.
2. SMUTNÝ, L.: Snímače teploty – současný stav a směry vývoje. *Automa*, 13, 2007 (5), s. 58–61.
3. MICHALSKI, L. ET AL.: *Temperature measurement*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001, 499 s.
4. JSP: ModuTEMP 70. [online] <http://www.jsp.cz/teplota/>, cit. 20. 2. 2016.

5. Endress+Hauser: Měření teploty. [online] <http://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/Temperature-measurement-thermometers-transmitters>, cit. 20. 2. 2016.
6. JUMO: Odporový teploměr Etemp B. [online] <http://www.jumo.cz/produkty/teplota/odporove-teplomery/3397/celkovy-prehled.html>, cit. 20. 2. 2016.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Temperature Measurement

This article provides an overview of the functional principles used in process temperature measurement. In the part devoted to contact thermometers are described in more detail thermocouples and resistance temperature sensors. There are described methods of signal processing of electrical thermometers and ways of installation of temperature sensors into the technological apparatus. Brief mention of calibration contact temperature sensor is attached.

Key words: temperature sensors, thermocouples, resistance thermometers, installation of temperature sensors.

Kontaktní adresa – Contact address:

doc. Ing. Karel Kadlec, CSc., Vysoká škola chemicko-technologická, Fakulta chemicko-inženýrská, Ústav fyziky a měřicí techniky, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice, Česká republika, e-mail: karel.kadlec@vscht.cz