

Marcel Kreidl

# MĚŘENÍ TEPLOTY

SENZORY A MĚŘICÍ OBVODY



*Kniha tvoří první díl připravované edice senzorů neelektrických veličin. V knize jsou přehledně zpracovány fyzikální principy senzorů teploty a dle těchto principů jsou pak senzory rozděleny do jednotlivých kapitol jako jsou odporové kovové a polovodičové, termoelektrické, dilatační, speciální a bezdotykové senzory. U jednotlivých typů senzorů jsou uvedeny konstrukce, charakteristiky a tabulky, měřicí obvody. Příloha knihy obsahuje podrobné tabulky odporových kovových a termoelektrických senzorů a emisivní materiálů. Nedílnou součástí knihy jsou statické a dynamické vlastnosti senzorů teploty. V souladu s řadou mezinárodních předpisů je vyjadřování přesnosti měření uváděno prostřednictvím nejistot měření. Vzhledem k tomu, že v technické praxi zatím není pojem nejistota měření běžně používán, je v úvodní části knihy uveden podrobný výklad.*

*Autor je vysokoškolským pedagogem, který se měřením teplot zabývá jak po stránce teoretické tak i výzkumné. Kniha je určena inženýrům a technikům, ale také jako studijní literatura pro studenty technických středních i vysokých škol. Kniha předpokládá znalost středoškolské matematiky a základní znalosti z elektrotechniky.*

---

Marcel Kreidl

## **MĚŘENÍ TEPLITY – senzory a měřicí obvody**

Bez předchozího písemného svolení nakladatelství nesmí být kterákoliv část kopírována nebo rozmnožována jakoukoliv formou (tisk, fotokopie, mikrofilm nebo jiný postup), zadána do informačního systému nebo přenášena v jiné formě či jinými prostředky.

Autor a nakladatelství nepřijímají záruku za správnost tištěných materiálů. Předkládané informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Všechny registrované nebo jiné obchodní známky použité v této knize jsou majetkem jejich vlastníků. Uvedením nejsou zpochybněna z toho vyplývající vlastnická práva.

Veškerá práva vyhrazena

© Doc. Ing. Marcel Kreidl, CSc., Praha 2004–2005

© Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Marcel Kreidl: MĚŘENÍ TEPLITY – senzory a měřicí obvody

BEN – technická literatura, Praha 2005

1. vydání

**ISBN 80-7300-145-4**

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>ZÁKLADNÍ POJMY Z OBORU MĚŘENÍ TEPLOT .....</b>	<b>13</b>
2.1	Teplota .....	15
2.2	Teplotní stupnice .....	15
2.3	Senzor teploty .....	19
2.4	Statické vlastnosti senzorů teploty .....	20
2.4.1	Nejistoty měření .....	20
2.5	Dynamické vlastnosti senzorů teploty .....	29
2.5.1	Přechodové charakteristiky senzorů teploty .....	30
<b>3</b>	<b>KOVOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty .....</b>	<b>35</b>
3.1	Odporové platinové snímače teploty .....	38
3.2	Odporové niklové snímače teploty .....	43
3.3	Odporové měděné snímače teploty .....	43
3.4	Měřicí obvody pro kovové odporové snímače teploty .....	44
3.4.1	Vliv měřicího proudu .....	44
3.4.2	Vliv odporu vedení .....	45
3.4.3	Linearizace statické charakteristiky kovového odporového snímače teploty .....	48
3.5	Konstrukce odporových kovových snímačů teploty .....	50
<b>4</b>	<b>POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty ...</b>	<b>55</b>
4.1.	Termistory .....	57
4.2	Negastory (NTC termistory) .....	59
4.2.1	Teplotní závislost odporu termistoru .....	60
4.2.2	Linearizace statické charakteristiky termistoru .....	62
4.2.3	Zatěžovací konstanta .....	64
4.2.4	Nejistota měření teploty s termistorem .....	68
4.3	Pozistory (PTC termistory) .....	69
4.4	Polovodičové monokrystalické senzory teploty .....	70

4.4.1	Monokrystalické Si senzory .....	70
4.4.2	Senzor SiC .....	74
<b>5</b>	<b>MONOLITICKÉ PN SENZORY TEPLoty .....</b>	<b>77</b>
5.1	Diodové PN senzory teploty .....	79
5.2	Tranzistorové PN senzory teploty .....	81
5.3	Monolitické (integrované) PN senzory teploty .....	82
<b>6</b>	<b>TERMoeLEKTRICKÉ ČLÁNKY .....</b>	<b>87</b>
6.1	Seebeckův jev .....	89
6.2	Typy termoelektrických článků .....	92
6.3	Názvosloví termoelektrických článků a souvisejících částí měřicího řetězce .....	95
6.4	Termoelektrická pravidla .....	96
6.5	Vliv kolísání srovnávací teploty a způsoby kompenzace vzniklé systematické odchylky .....	98
6.6	Potlačení vlivu rušení při měření termoelektrickým článkem ..	101
6.7	Diferenční a sériové zapojení termoelektrických článků .....	103
6.8	Linearizace charakteristik .....	103
6.9	Konstrukce termoelektrických snímačů teploty .....	105
6.9.1	Drátové termoelektrické články .....	105
6.9.2	Plášťové termoelektrické články .....	107
6.9.3	Speciální termoelektrické snímače .....	108
<b>7</b>	<b>DILATAČNÍ TEPLoměRY .....</b>	<b>111</b>
7.1	Tyčové teploměry .....	113
7.2	Bimetalické teploměry .....	113
7.3	Bimateriálová (dvojmateriálová) čidla .....	117
7.4	Skleněné teploměry .....	117
7.5	Kapalinové tlakové teploměry .....	120
7.6	Parní tlakové teploměry .....	121
7.7	Plynové tlakové teploměry .....	122
<b>8</b>	<b>SPECIÁLNÍ DOTYKOVÉ SENZORY TEPLoty .....</b>	<b>125</b>
8.1	Akustické teploměry .....	127
8.3	Krystalové teploměry .....	129

8.3	Šumové teploměry .....	130
8.4	Magnetické teploměry .....	131
8.5	Optické vláknové senzory teploty .....	132
<b>9</b>	<b>INDIKÁTORY TEPLOTY .....</b>	<b>139</b>
9.1	Keramické žároměrky .....	141
9.2	Tavné indikátory teploty .....	142
9.3	Barevné indikátory teploty .....	143
<b>10</b>	<b>ZABUDOVÁNÍ DOTYKOVÝCH TEPLOMĚŘŮ .....</b>	<b>147</b>
10.1	Měření teploty v tekutinách .....	149
10.2	Měření teploty tuhých těles .....	151
10.3	Měření povrchové teploty tuhých těles .....	152
<b>11</b>	<b>BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLOTY .....</b>	<b>155</b>
11.1	Úvod .....	157
11.2	Základní veličiny pro bezdotykové měření teplot (pyrometrii) ..	158
11.3	Černé těleso, černý zářič .....	163
11.4	Zákony záření (zákony jsou uvedeny pro černé těleso) .....	164
11.5	Senzory (detektory) pro bezdotykové měření teplot .....	168
11.5.1	Základní parametry detektorů záření .....	168
11.6	Senzory (detektory) tepelného záření .....	169
11.6.1	Tepelné detektory infračerveného záření .....	169
11.6.2	Kvantové detektory infračerveného záření .....	175
11.7	Pyrometry .....	180
11.7.1	Úhrnné pyrometry (pyrometry na celkové záření) .....	180
11.7.2	Monochromatické pyrometry .....	181
11.7.3	Pásmové pyrometry .....	182
11.7.4	Poměrové pyrometry .....	183
11.7.5	Vícepásmové pyrometry .....	184
11.7.6	Pyrometry s automatickou korekcí emisivity .....	184
11.7.7	Pyrometry s optickými vlnovody v infračervené oblasti .....	185
11.8	Snímání teplotních polí (termografie) .....	186
11.9	Termovize .....	186
11.10	Nejistoty a chyby metod bezdotykového měření teploty .....	190

11.10.1	Nejistoty měření teploty způsobené zdrojem nejistoty ve stanovení emisivity .....	190
11.10.2	Chyba metody způsobená nerespektováním prostupnosti atmosféry a zářivého toku okolního prostředí .....	192
11.10.3	Chyba metody způsobená zanedbáním vzájemného zářivého toku .....	193
11.10.4	Chyba metody způsobená nedodržením velikosti měřené plochy dle technických podmínek výrobce .....	195
<b>PŘÍLOHY .....</b>		<b>197</b>
I	Hodnoty měřicího odporu Pt100 .....	198
IA	Specifikace Pt senzorů firmy Hayashi Denko (Japonsko) .....	200
II	Hodnoty měřicího odporu Ni1000 .....	202
III	Termoelektrické články .....	203
IV	Hodnoty spektrálních emisivit .....	224
V	Orientační hodnoty tepelné vodivosti .....	226
<b>REJSTŘÍK .....</b>		<b>225</b>
<b>PREZENTACE FIREM .....</b>		<b>225</b>
<b>Sdružení Energy Consulting</b>		
	– Měření a vyhodnocování staveb pomocí infrakamery .....	231
<b>TMVSS</b>		
	– Termovizní kamery a bezkontaktní teploměry firmy FLIR .....	232
	– Bezkontaktní měření teploty infračervenými kamerami .....	233
<b>TURCK</b>		
	– Měření, hlídání a zobrazování teploty v průmyslové automatizaci ....	234
<b>INTRAX – Japonské platinové senzory .....</b>		
		235
<b>ELCHEMCo</b>		
	– Teplovodivé materiály .....	236
	– Indikátory teploty a další chemické přípravky pro průmysl .....	237
<b>BEN – technická literatura</b>		
	Knihy nakladatelství BEN – technická literatura .....	238
	Adresy prodejen technické literatury .....	239
	Pár slov o nakladatelství .....	240

# PŘEDMLUVA

---

Teplota patří ve všech, a to jak v technických tak i v ostatních oborech k nejdůležitějšímu parametru pro zajištění optimálního technologického procesu. Proto je až s podivem kolik let v České republice a ani v bývalé ČSR nevyšla kniha o měření teplot. Z tohoto důvodu jsem vyhověl redakci nakladatelství BEN – technická literatura a na základě své pedagogické a výzkumné činnosti na ČVUT Fakultě elektrotechnické jsem se pokusil v daném omezeném rozsahu podat o měření teplot přehlednou publikaci. Je nutné si uvědomit že jen o bezdotykovém měření teplot jsou známé knihy mající 700 stránek, a tak čtenář v této knize nenalezne vždy odpověď na všechny problémy např. jak měřit teplotu plamene apod. Stejný problém nastal při výběru v knize popsaných senzorů. Vzhledem k velkému množství typů senzorů teplot byly vybrány pouze senzory dostupné na současném trhu. Pro čtenáře, kteří se budou chtít podrobněji zabývat problematikou měření teplot, jsou v knize uvedeny knižní a internetové odkazy.

Kniha tvoří první díl připravované edice senzorů neelektrických veličin. V knize jsou přehledně zpracovány fyzikální principy senzorů teploty a dle těchto principů jsou pak senzory rozděleny do jednotlivých kapitol, jako jsou odporové kovové a polovodičové, termoelektrické, dilatační, speciální a bezdotykové senzory. U jednotlivých typů senzorů jsou uvedeny konstrukce, charakteristiky a tabulky, měřicí obvody. Přílohy knihy obsahují podrobné tabulky kovových a termoelektrických senzorů a emisivních materiálů. Nedílnou součástí knihy jsou statické a dynamické vlastnosti senzorů teploty. V souladu s řadou mezinárodních předpisů je vyjadřování přesnosti měření uváděno prostřednictvím nejistoty měření. Vzhledem k tomu, že v technické praxi zatím není pojem nejistota měření běžně používán, je v úvodní části knihy uveden podrobný výklad. Kniha je určena inženýrům a technikům ale také jako studijní literatura pro studenty technických středních i vysokých škol. Kniha předpokládá znalost středoškolské matematiky a základní znalosti z elektrotechniky.

Na závěr bych rád poděkoval doc. Ing. Josefu Jenčíkovi za cenné připomínky a pečlivou oponenturu a své ženě Ireně za jazykové korekce.

Marcel K r e i d l

Praha, červen 2004