

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Odporové teplotní snímače na flexibilním substrátu

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal KOPEJSKA**
Osobní číslo: **E13B0122P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Odporové snímače teploty na flexibilních substrátech**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište odporové senzory teploty (RTD), oblasti využití, princip jejich funkce, typická materiálová provedení, diskutujte charakteristické parametry a vlastnosti (stabilita, opakovatelnost, hystereze, dynamika) a postavení RTD v porovnání s ostatními typy senzorových elementů pro elektrické měření teploty.
2. Popište metody charakterizace a kalibrace RTD a matematické vyjádření teplotní závislosti. Uveďte související standardy, diskutujte problematiku přesnosti určování teploty a typické chyby měření.
3. Zmapujte problematiku RTD realizovaných na flexibilních substrátech. Charakterizujte specifické vlastnosti, typická konstrukční provedení a použití těchto typů teplotních senzorů.
4. Vyhledejte výrobce flexibilních RTD a zpracujte přehled dostupných produktů a jejich parametrů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **FRADEN, Jacob. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 4. vyd. Springer-Verlag New York, 2010. ISBN 978-1-4419-6466-3.**
2. **WEBSTER, John G. a Halit EREN. Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement. 2. vyd. CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4398-4889-0.**
3. **CHILDS, Peter R. N. Practical temperature measurement. Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0 7506 5080 X.**
4. **Internetové stránky výrobců: OMEGA, RdF Corporation, Minco, Measurement Specialties, Svel Sensors, JUMO a další.**
5. **Průmyslové vyhledávače GlobalSpec (IHS Engineering 360), ThomasNET a další.**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Silvan Pretl, Ph.D.

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Práce je zaměřena na popis funkčnosti, vlastností, standardů a využití odporových teplotních senzorů a materiálu použitého při konstrukci senzorů. Počínaje pevnými, ale také ohebnými, substráty až po nejčastěji používané kovové odporové materiály a vodivé kontakty. Dále také porovnání RTD s jinými typovými teplotními senzory. Neposledně způsoby kalibrace, zapojení a následného měření a popis chyb měření. Vytvoření souhrnné tabulky výrobců a jejich dostupných ohebných senzorů. Seznam je tvořen převážně třemi největšími výrobci pomocí průmyslového vyhledávače GlobalSpec. Hlavní přínos této práce je v sepsání informací o odporových teplotních senzorech a výčet hlavních výrobců a jejich jednotlivých odporových senzorů na ohebných nosných materiálech, které jsou uvedeny v tabulce. Z vytvořeného seznamu se zjistilo, že největšími výrobci je Minco Project, Int a OMEGA Engineering, kteří využívají platinu jako odporový materiál. Polyamidový nebo silikonový pružný materiál pro nosnou složku s přírůdky z poniklovaných měděných drátů a velká část uvedených senzorů je k dispozici do sedmi pracovních dnů.

Klíčová slova

Odporový teplotní senzor, teplota, měření, materiál, vlastnosti, flexibilní substrát, RTD senzory, elektrický signál, nominální proud, samoohřev, elektrický odpor, elektrická izolace, teplotní koeficient odporu.

Abstract

The work is focused on the description of functionality, properties, standards and use of resistance temperature sensors as well as materials used in sensor design, which range from solid but also flexible substrates to the most commonly used metal resistance materials and conductive contacts. In addition, the RTD comparison with other temperature sensors. Methods of calibration, connection and subsequent measurement and description of measurement errors. Creation of summary tables for manufacturers and their available and flexible sensors will be another point of this thesis. The created list consists mostly of the three largest manufacturers using the GlobalSpec industrial search engine. The main benefit of this thesis is to collect the information about the resistance temperature sensors and to list the main manufacturers and their individual resistive sensors on the load bearing materials, which are presented in the table. It was found that the largest manufacturers such as Minco and OMEGA Engineering, use platinum as a resistive material and polyamide or flexible silicone material used for the load bearing component with nickel-plated copper wires and a large proportion of these sensors is available within seven business days.

Keywords

Resistance temperature sensor, temperature, measurement, material, property, flexible substrate, RTD sensor, electrical signal, nominal current, self-heating, electrical resistance, electrical insulation, temperature coefficient of resistance.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Michal Kopejska

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Silvanu Pretlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH.....	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD.....	10
1 ODPOROVÉ TEPLTNÍ SENZORY RTD.....	11
1.1 OBLASTI POUŽITÍ.....	12
1.2 PRINCIP FUNKCE.....	13
1.3 MATERIÁLOVÁ PŘÍMĚNÍ.....	15
1.3.1 Křemík.....	16
1.3.2 Plasty.....	16
1.3.3 Kovy.....	17
1.3.4 Keramika.....	19
1.3.5 Skla.....	20
1.3.6 Nanomateriály.....	21
1.4 CHARAKTERISTICKÉ PARAMETRY A VLASTNOSTI RTD	21
1.4.1 Stabilita.....	22
1.4.2 Opakovatelnost.....	23
1.4.3 Hystereze	23
1.4.4 Dynamika.....	23
1.4.5 Citlivost.....	25
1.4.6 Přesnost a tolerance RTD.....	25
1.4.7 Samo-ohřev (Self-heating).....	26
1.5 SROVNÁNÍ RTD SNÍMAČŮ S OSTATNÍMI TEPLTNÍMI SNÍMAČI	27
1.5.1 Odporové teploměry	27
1.5.2 Termoelektrické teploměry.....	28
1.5.3 Zařízení pro infračervené měření teploty.....	28
1.5.4 Bimetalové (dvojkovové) teploměry.....	29
1.5.5 Teploměry využívající roztažitelnosti kapalin.....	29
1.5.6 Teploměry měřící změnu stavu.....	29
2 POUŽITÍ A MĚŘENÍ POMOCÍ RTD.....	30
2.1 METODY CHARAKTERIZACE A KALIBRACE RTD	30
2.1.1 Charakterizace RTD.....	30
2.1.2 Kalibrace.....	33
2.2 MATEMATICKÉ VYJÁDŘENÍ TEPLTNÍ ZÁVISLOSTI A STANDARDY	34
2.3 PŘESNOST URČOVÁNÍ TEPLTY A TYPICKÉ CHYBY MĚŘENÍ.....	36
3 RTD REALIZOVANÁ NA FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTECH	38
3.1 SPECIFICKÉ VLASTNOSTI.....	38
3.2 TYPICKÁ KONSTRUKČNÍ PŘÍMĚNÍ.....	40
3.2.1 Plastové substráty.....	40
3.2.2 Skleněné substráty.....	42
3.2.3 Flexibilní kovový substrát.....	42
3.2.4 Textilní substrát.....	43
3.3 POUŽITÍ FLEXIBILNÍCH RTD	44
4 KOMPARECE DOSTUPNÝCH FLEXIBILNÍCH RTD	45
ZÁVĚR	47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	48

Seznam symbolů a zkratk

Symboly

$\alpha [K^{-1}]$	Teplotní součinitel elektrického odporu
$t_0 [^{\circ}C]$	Teplota na počátku měření
$\rho [\Omega m]$	Měrný odpor
$l [m]$	Délka vodiče
$S [m^2]$	Plocha vodiče
$T [^{\circ}C]$	Teplota
$R_0 [\Omega]$	Odpor při teplotě t_0
$R_V [\Omega]$	Celkový odpor vedení
$R_{CU} [\Omega]$	Odpor přívodního vedení
$R_1, R_2, R_3 [\Omega]$	Stabilizační odpory pro můstek
$R_z [\Omega]$	Odpor zapojení při teplotě t
$\Delta R_t [\Omega]$	Rozdíl odporu při teplotě t
$U_V [V]$	Výstupní napětí
$U_{st} [V]$	Napětí stabilizovaného zdroje
$R_{vst} [\Omega]$	Vstupní odpor
$R_t [\Omega]$	Odpor při teplotě t
$S [^{\circ}C \cdot mW^{-1}]$	Koeficient samo-ohřevu
$I [mA]$	Nominální Proud

Zkratky

<i>RTD</i>	Resistance Temperature Detectors (Odporové teplotní snímače)
<i>RFID</i>	Radio Frequency IDentification (Radiofrekvenční IDentifikace)
<i>PI</i>	Polyimidová fólie
<i>PVC</i>	Polyvinylchlorid
<i>PAR</i>	Polyarylát
<i>PES</i>	polyethersulfon
<i>PEEK</i>	polyetherketonová vlákna
<i>PC</i>	Polykarbonát
<i>CO₂</i>	Oxid Uhlíčitý
<i>FeO</i>	Oxid železnatý
<i>SiO₂</i>	Oxid křemičitý

<i>TCR</i>	Temperature Coefficient Resistance (Teplotní koeficient odporu)
<i>PTC</i>	Positive Temperature Coefficient (Kladný teplotní koeficient)
<i>NTC</i>	Negative Temperature Coefficient (Záporný teplotní koeficient)
<i>PRT</i>	Platinum Resistance Thermometers (Platinové Odporové Teploměry)
<i>SPRT</i>	Standard Platinum Resistance Thermometers (Standartní platinové Odporové Teploměry)
<i>Pc</i>	Personal Computer (Osobní Počítač)
<i>Wire-wound</i>	Vinuté RTD senzory
<i>Thin-Film</i>	Tenkovrstvé RDT senzory

Jednotky

$^{\circ}\text{C}$	Stupeň celsia – jednotka teploty
Ω	Ohm – jednotka odporu
$k\Omega$	Kilo-ohm – odvozená jednotka odporu
mA	Miliampér – odvozená jednotka proudu
W	Watt – jednotka výkonu
mW	Miliwatt – odvozená jednotka výkonu
mm	Milimetr – odvozená jednotka délky
μm	Mikrometr – odvozená jednotka délky
nm	Nanometr – odvozená jednotka délky
cm^2	Čtverečný centimetr – odvozená jednotka obsahu
mm^3	Krychlový centimetr – odvozená jednotka objemu
rad/s	Radián za sekundu – jednotka úhlové rychlosti
Hz	Hertz – jednotka frekvence

Úvod

Cílem podkladů je prostudovat okruh problémů spojených s flexibilními RTD senzory, flexibilními substráty, které jsou využívány pro výrobu RTD senzorů a provést srovnání dostupných flexibilních RTD senzorů.

Již od 17. století, kdy Galileo Galilei a jeho studenti konstruují kapalinové teploměry se člověk snaží proniknout do tajů měření teploty. Teplotu je možné měřit různými metodami s různou přesností. Rozvojem a zdokonalováním průmyslové výroby je stále více důležité měřit teplotu, dle které je zapotřebí řídit výrobní procesy a postupy. Aby mohla řídicí jednotka správně vyhodnocovat teplotu, kterou ovlivňuje výrobní procesy, je nutné naměřenou teplotu převést na elektrický signál. Na transformaci teploty má vliv přesnost a rychlost měření, prostředí, ve kterém se teplota měří a samozřejmě správná volba senzoru a převodníku.

Podklady se v první kapitole budou zabývat odporovými teplotními senzory RTD, oblastí jejich využití, principem jejich funkce, materiály používané k jejich konstrukci, charakteristickými parametry a vlastnostmi.

V druhé kapitole se budou věnovat použití a měření pomocí RTD senzorů, matematickému vyjádření teplotní závislosti, chybám měření.

Třetí kapitola je zaměřena na RTD senzory, jejich realizaci na flexibilních substrátech, na typická provedení flexibilních substrátů.

Ve čtvrté kapitole bude provedeno srovnání dostupných flexibilních RTD senzorů.

1 Odporové teplotní senzory RTD

Senzor je velmi často definován jako zařízení, které přijímá a reaguje na signál nebo podnět. Tato definice je však příliš obecná a vztahuje se téměř na vše od lidského oka až po spoušť pistole.

Přírodní senzory – nacházejí se v živých organismech a obvykle reagují na signály, jež jsou elektrochemického původu. Jejich fyzikální základ je založen na transportu iontů v nervových vláknech, např. zrakový nerv.

Uměle vyrobené senzory – informace jsou vysílány a zpracovávány v elektrické podobě skrze transport elektronů. Snímače, jež jsou použity v umělých systémech, musí komunikovat shodným jazykem jako zařízení, s kterým jsou propojeny.

Původní definici je možno upravit na: Senzor je zařízení, jež přijímá podnět a reaguje elektrickým signálem. Podnětem může být množství, vlastnost či stav, jenž je přijat a transformován na elektrický signál.

Senzory jsou dvojího typu: pasivní a aktivní [1]

Pasivní senzor – nevyžaduje externí zdroj energie a sám rovnou vytváří elektrický signál v reakci na vnější podněty. Příkladem je termočlánek, fotodioda, piezoelektrický snímač.

Aktivní senzor – vyžaduje externí zdroj napájení pro provoz, který se nazývá budící signál. Aktivní senzory jsou někdy nazývány parametrické, jelikož své vlastnosti přemění v reakci na vnější podněty a tyto vlastnosti lze dodatečně převést na elektrický signál. Příkladem je termistor.

Dále mohou senzory rozdělit na absolutní a relativní.

Absolutní senzory – detekují podnět ve vztahu k absolutní fyzikální stupnici měření, jenž je nezávislá na podmínkách měření. Příkladem je termistor, rezistor citlivý na teplotu.

Relativní senzory – vytvářejí signál na základě nějakého zvláštního případu. Příkladem je termočlánekový snímač teploty, tlakový senzor atmosférického tlaku.

Senzory disponují některými vlastnostmi, které mohou být využity ke konkrétním případům, jako je citlivost, rozsah podnětu, stabilita, rozlišení, přesnost, rychlost odezvy, linearita, hystereze, provozní životnost, formát výstupu, velikost, hmotnost, cena, materiál, oblast aplikace, typ podnětu. [1]

RTD senzory – (Resistance Temperature Detectors) jsou teplotní čidla, jež obsahují odpor, který mění hodnotu odporu na základě teplotních změn. Mnoho let se využívají k měření teploty v laboratorních a průmyslových procesech, jsou pověstné svoji přesností, stabilitou a opakovatelností. Většina RTD prvků je složena z dlouhého jemného drátu ovinutého kolem keramického či skleněného jádra. RTD prvky jsou relativně křehké, a proto jsou velmi často umístěny v opláštěné sondě k jejich ochraně. RTD prvek je vyroben z materiálu, jenž má předvídatelné změny odporu vlivem teplotních změn. Tyto předvídatelné změny se využívají k určování teploty. [2]

Platinové RTD senzory - platina je charakteristická chemickou netečností, časovou stabilitou a vysokou teplotou tání. Měřicí odpor, jenž tvoří základní konstrukční součást teploměru, se vyrábí:

- drátkovou technologií,
- tenkovrstvou technologií,
- tlustovrstvou technologií.

Platinový odporový teploměr (PRT) je zařízení, které určuje teplotu měřením elektrického odporu jednoho kusu čistého platinového drátu. Platinový drátek je označován jako teplotní čidlo. Pokud se vyrábí pečlivě, poskytují výbornou kombinaci citlivosti, rozsahu a reprodukovatelnosti. [3]

1.1 Oblasti použití

RTD prvky jsou poměrně imunní vůči elektrickému rušení, a proto jsou velmi vhodné pro měření teploty v průmyslovém prostředí, především kolem motorů, generátorů a jiných vysokonapětových zařízení.

RTD prvky lze použít pro měření: v klimatizacích a chlazení, v potravinářství, v křbových kamnech a grilech, v textilní výrobě, ve zpracování plastů, v petrochemickém průmyslu, v mikroelektronice, vzduchu, plynu, teploty kapalin, teploty výfukových plynů, v automobilovém průmyslu, ve vojenském průmyslu, v letectví a kosmonautice. [1]

1.2 Princip funkce

Základem funkce senzorů jsou fyzikální a chemické zákony. [1]

Elektrický odpor lze definovat jako schopnost materiálu bránit průchodu elektrickému proudu. Čím větší je odpor materiálu (vodiče), tím hůře jím elektrický proud prochází. Elektrický odpor způsobuje v obvodu ztráty. Tyto ztráty vznikají ve vodiči při průchodu el. proudu, který se mění na Jouleovo teplo, tzn. vodič se zahřívá. Elektrický odpor materiálu je přímo závislý na vnitřní stavbě materiálu vyjadřován měrným odporem ρ .

U kovových materiálů je vliv teploty dán Mathiessenovým pravidlem. Dle tohoto pravidla je možné rozdělit rezistivitu kovů na dvě složky: $\rho = \rho_s + \rho_T$.

První složkou v tomto vzorci je ρ_s související se strukturou, složením kovu a technologií výroby. Tato složka neovlivňuje vliv teploty na odporu vodiče. Druhá složka ρ_T , která je naopak závislá pouze na teplotě a ovlivňuje odpor s měnící se teplotou. [4]

Při vzrůstající teplotě v kovech, rychleji kmitají mřížky struktury kovu a volné nosiče v kovech mají obtížnější průchod vodičem a tím se zkracuje střední doba mezi srážkami elektronů s tepelnými kmity mřížky, což způsobuje růst měrného odporu se zvyšující se teplotou. Elektrický odpor lze vyjádřit pomocí vzorce $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$, kde l značí délku vodiče a S je plocha průřezu. Při měrných teplotách je délka l a plocha S konstantní a dá se tedy elektrický odpor vyjádřit zjednodušeně:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)]$$

Ze zjednodušeného vztahu lze vyjádřit výraz pro získání teplotního součinitele elektrického odporu α :

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot (t - t_0)}$$

Kde R je odpor při teplotě t a R_0 je odpor při teplotě t_0 . Teplotní součinitel měrného odporu se nejčastěji uvažuje při 20 °C, což se je průměrná pokojová teplota. Tyto hodnoty jsou dohledatelné v tabulkách. [4]

t [°C] – teplota na konci měření

t_0 [°C] – teplota na počátku měření

R [Ω] – odpor při teplotě t

R_0 [Ω] – odpor při teplotě t_0

RTD teplotní čidlo funguje na principu měření, kdy se elektrický odpor materiálu mění s teplotou, to znamená, že odpor materiálu roste se zvyšující se teplotou. Mezi velikostí odporu a velikostí teploty je patrná lineární závislost. Relace mezi odporem RTD a okolní teplotou je velmi předvídatelná, což dovoluje spolehlivé a spojitě měření teploty.

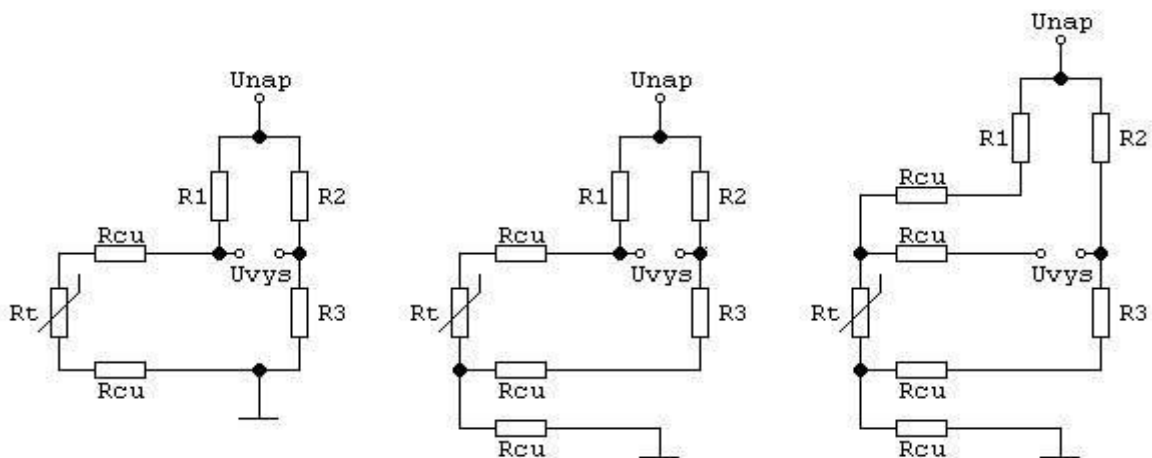
RTD senzor začne měřit, jakmile je malý stejnosměrný proud přiveden do senzoru.

RTD senzor může být zapojen ve dvou, tři a čtyř drátovém nastavení. Dvou drátové nastavení je nejjednodušší, ale také nejvíce náchylné k chybám [5].

Dvou vodičové zapojení disponuje celkovým odporem vedení $R_v = 2R_{Cu} + R_j$. Pro teplotní závislost rezistence vedení platí $R_{Cu} = R_{Cu0} (1 + \alpha_{Cu} \vartheta_p)$. Nevýhodou Wheatstoneova můstku je jeho nelinearita. Tento typ zapojení se používá pouze pro jednoduchá měření na krátkou vzdálenost.[6]

Pokud u **třívodičového zapojení** zvolíme $R_1=R_2=R$, $R_3=R_{tz}$ a zformulujeme-li $R_t=R_{tz} + \Delta R_t$, pak platí pro teplotní závislost výstupního napětí bez vlivu rezistence vedení $U_v=A U_{st} (\Delta R_t/2 R_{tz})$ [3]. Toto zapojení redukuje vliv odporu přívodních vodičů. Mezi výhody tohoto zapojení můžeme zařadit možnost měření odporu vedení při provozu [7]. V průmyslové aplikaci je toto zapojení nejvíce využíváno [6].

U **čtyřvodičového zapojení** se nevyužije vliv odporu vedení pokud $R_{vst} \gg R_t$ [3]. Díky této vlastnosti je čtyřvodičové zapojení vyžadováno pro velmi přesné měření a aplikace a své využití nalezne především v laboratorním prostředí. Jednotlivá zapojení jsou graficky znázorněna na Obr.1. [6]



Obr.1: Možnosti připojení senzorů k odporovému můstku, zleva: dvou, tří a čtyřvodičové zapojení. (převzato z [8])

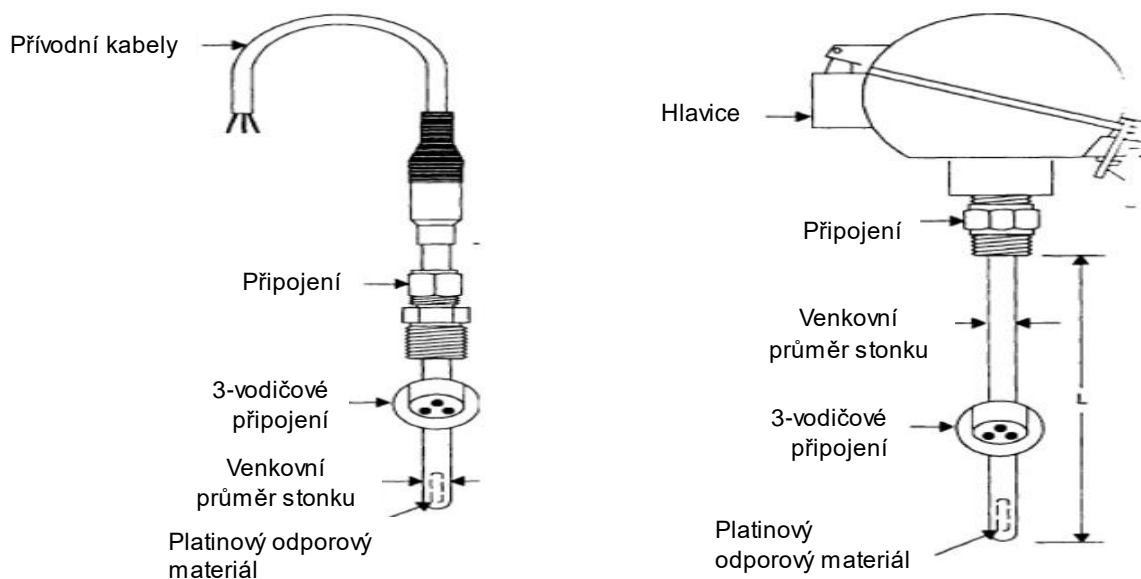
1.3 Materiálová provedení

RTD pracují na principu, kdy se elektrický odpor zvyšuje současně s rostoucí teplotou. Z tohoto důvodu je nutné při konstrukci RTD senzorů využít materiály citlivé na teplotu. Rezistivním materiálem, který se nejčastěji používá pro RTD senzory pro vysoké teploty je platina a pro RTD senzory pro nižší teploty pak nikl, měď, zlato, stříbro či slitiny zlata nebo stříbra. Platina je nejpoužívanější díky chemické a časové stálosti a vysoké linearitě v širokém teplotním rozsahu.

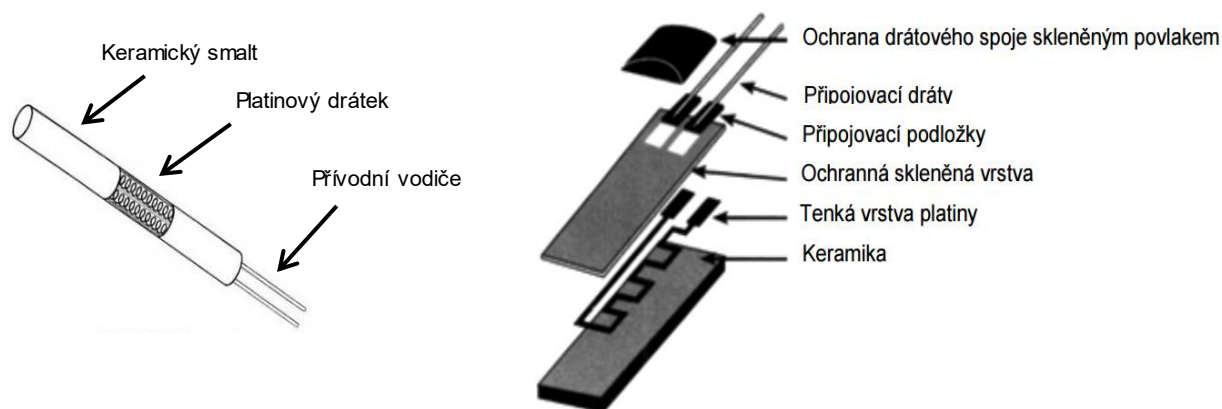
Nejobvyklejšími typy senzorů RTD jsou vinuté (wire-wound) a tenkovrstvé (thin-film).

Konstrukce se skládá z nosného substrátu, kterým bývá nejčastěji keramický či skleněný váleček v případě vinutých RTD, nebo destička pro vrstevové RTD. Na nosné konstrukci je navinuta nebo nanášena vrstva rezistivního materiálu nejčastěji kovu. Pro ochranu a zafixování je drátek spojen s tělískem keramickým smaltem případně vrstvičkou skla měkčího, než je sklo nosného tělíska. Takto vytvořené čidlo má vnitřní vedení a ukládá se do dalších ochranných prvků skládajících se ze stonku a naposledy hlavice. Vývody bývají nejčastěji vyráběny z mědi, stříbra, případně ze slitin platiny. Stonek chrání senzor a vývody před vnějšími vlivy a mechanickým namáháním jako je tlak, vibrace apod.. [7]

Důležité charakteristiky RTD senzorů zahrnují teplotní koeficient odporu (TCR), jmenovitý odpor při teplotě 0°C a toleranční třída. TCR určuje souvislost mezi teplotou a odporem. [5]



Obr. 2: Konstrukce běžných stonkových RTD (převzato z [9])



Obr. 3: Ukázka konstrukce senzorů zleva: vinuté a vrstvé čidlo (převzato z [10, 11])

1.3.1 Křemík

Křemík je druhým nejhojnějším prvkem na zemi. V přírodě se volně nenachází, pouze v podobě oxidu a křemičitanu. Mezi oxidy křemíku patří písek, křišťál, ametyst, jíl, slída a jiné. Křemík se získává zahříváním oxidu křemíku a uhlíku v elektrické peci za použití uhlíkových elektrod. Křemík je levný materiál a vykazuje mnoho fyzikálních jevů, které jsou velmi užitečné pro senzorové aplikace. Relativně velké účinky křemíku jsou Hallův jev, Seebackův jev, piezorezistance a jiné. Největší problém křemíku je jeho teplotní citlivost. Křemík vykazuje velmi užitečné mechanické vlastnosti, které jsou v současné době žádoucí při výrobě RTD senzorů.

Křemík je hlavním stavebním prvkem keramiky a skla, které se u RTD senzorů používají jako nosný substrát vlastního senzoru. Křemík se také používá u velmi specifické oblasti senzorové techniky na výrobu polovodičových RTD senzorů. Tyto senzory jsou založeny na principu P-N přechodu, které se často využívají v integrovaných obvodech. Dále se využívá pro výrobu termistorů převážně pro skupinu (PTC). Výhodou těchto senzorů oproti konvenčním polovodičovým PTC senzorům je vysoká lineární závislost odporu na teplotě. Mezi další výhody patří poměrně nízká cena oproti kovovým RTD senzorům, které tvoří majoritu v senzorové technice pro měření teploty pomocí odporových materiálů. [1]

1.3.2 Plasty

Plasty jsou synteticky vyrobené materiály z chemických surovin nazývané monomery. Monomer, např. ethylen, reaguje s jinými monomerními molekulami a vytváří dlouhé řetězce opakujících ethylenových jednotek, jež tvoří polymer polyethylenu. Polymery se skládají z atomů uhlíku v kombinaci s jinými prvky. Chemici využívají jen osm prvků k vytváření různorodých plastů. Těmito prvky jsou uhlík (C), vodík (H), dusík (N), kyslík (O), fluor (F),

křemík (Si), síra (S) a chlor (Cl). Polyethylen je nejjednodušší polymer a má mnoho užitečných vlastností pro snímací technologie.

Plasty jsou skvělé elektrické izolátory. Aby byly plasty elektricky vodivé, musí projít laminací s kovovou fólií, malováním s vodivým nátěrem nebo metalizací. Další způsob, jak získat elektrickou vodivost, je smíchání plastů s vodivými přísadami (např. grafit či kovová vlákna) nebo vytvoření kompozitních plastových součástí obsahující kovovou síťku.

Polymer, který je velmi používán pro snímací technologie je Kapton. Jedná se o polyimidovou (PI) fólii od firmy DuPont. Jde o termoset s hustotou 1,42 g / cm³ a s nízkou tepelnou vodivostí 0,12 W. PI zůstává stabilní v širokém rozsahu teplot od -273 °C do +400 °C, je používán v ohebných plošných spojích. Flexibilní PI deska s plošnými spoji může být tenká až 50 mm i tenčí. Tyto flexibilní desky vydrží téměř milion ohybů a jsou běžně používány jako materiál pro okna všech druhů rentgenových zdrojů a rentgenových detektorů. Avšak mají relativně nízkou odolnost proti mechanickému opotřebení. [1]

V RTD aplikaci se používá polyamid pro výrobu plastových hlav a krytů senzorů. Senzory s těmito prvky se používají při měření teploty v kapalných nebo plyných médiích, tudíž jsou vhodné pro měření v potrubích. Jako další plast využívaný v RTD je PVC používané u přírodních kabelů u velmi jednoduchých dvou vodičových senzorů, který nemají stonek.

1.3.3 Kovy

Z hlediska konstrukce snímačů existují dva typy kovů:

1. Neželezné
2. Železné

Železné kovy, jako ocel, se často používají v kombinaci s magnetickými snímači pro měření pohybu, vzdálenosti, síly magnetického pole a dalších.

Neželezné kovy propouštějí magnetické pole a používají se pro měření, kde není třeba brát v úvahu magnetické pole. Neželezné kovy disponují širokou škálou mechanických a elektrických vlastností. Při volbě kovu, je nezbytné zvážit jeho fyzikální vlastnosti a snadnost mechanického zpracování. Například **měď** má výborné tepelné a elektrické vlastnosti, ale je to těžký kov pro obrábění, proto se jako dobrou alternativou nabízí hliník. Pro RTD se nejčastěji využívá platina, nikl, měď apod..

Platina je stříbrně bílý vzácný kov, který je extrémně tvárný a odolný vůči korozi. Jeho kladný teplotní koeficient odporu je velmi stálý a opakovatelný, což dovoluje jeho využití při měření teploty. V aplikaci RTD je to nejvíce používaný kov pro svou chemickou netečnost, vysoký bod tavení, časovou stálost. Platina se řadí mezi kovy, které je možné čistit, tzn. dosáhnout vysoké čistoty materiálu. Čistá platina je nezbytná pro velmi přesné aplikace a je tedy velice žádoucí. Platinu můžeme rozdělit na dvě hlavní skupiny dle tříd tolerance:

První skupinou je platina pro Standardizované Platinové Odporové Teploměry (Standard Platinum Resistance Thermometers) zkráceně SPRT. Pro tento typ senzorů se využívá platiny největší jakosti a díky čistotě platiny pohybující se až v řádech tisícín procenta, se tyto senzory využívají především jako etanoly pro měřicí přístroje či pro laboratorní měření, kde je potřeba měřit teplotu co nejpřesněji. Senzory z takto čisté platiny jsou vykoupeny svou křehkostí, náchylností na okolí a také vysokou cenou. Teplotní rozsah, který tyto senzory zvládnou je limitována od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ a senzory jsou schopny měřit s citlivostí na $\pm 0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $\pm 0,013\text{ }^{\circ}\text{C}$. [12]

Druhou skupinou je platina pro Průmyslové Platinové Odporové Teploměry (Platinum Resistance Thermometers) zkráceně PRT. Tato platina se využívá u senzorů, kde není zapotřebí tak velké přesnosti a počítá se zde s namáháním v průmyslu. Jde o platinu odolnější a cenově přístupnější. Avšak vše je na úkor snížení citlivosti senzoru pohybující se kolem $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $\pm 0,025\text{ }^{\circ}\text{C}$. Historicky tyto senzory byly limitovány maximální teplotou do $420\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale v poslední době došlo k vývoji a navýšení maximálního tepelného limitu až na $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Platina použitá v těchto senzorech nedosahuje takové čistoty jako v případě SPRT, ale stále je vysoká, přibližně 99,99%. [12]

Nikl má velmi dobrou vlastnost a to odolnost vůči korozi. V porovnání s ocelí, niklové slitiny mají velmi vysokou pevnost a elasticitu. Mezi jeho slitiny patří dvojkovy s mědí, křemíku a molybdenem. Nikl a jeho slitiny zachovávají své mechanické vlastnosti při kryogenních teplotách i při vysokých teplotách kolem $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nikl se používá ve vysoce legovaných super slitinách, jako je Inconel, Monel (Ni-Cu), Ni-Cr a slitiny Ni-Cr-Fe. Pro RTD je to druhý nejvíce používaný odporový materiál. Tento kov se začal využívat z důvodu potřeby miniaturizace senzorů. Senzory jsou převážně tvořeny naprašováním ve vakuu na keramický substrát a následně je nikl na destičce upraven pomocí laseru na přesně požadovanou hodnotu odporu. Teplotní rozsah niklových senzorů je asi od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vyznačují se velmi rychlou odezvou.

Měď kombinuje velmi dobré tepelné a elektrické vlastnosti s odolností proti korozi a poměrně snadným zpracování a tudíž splňuje podmínky pro RTD. Nicméně má relativně špatný poměr pevnost-hmotnost. Měď se obtížně obrábí. Měď a její slitiny - mosazi a bronzы existují v různých formách, včetně fólií. Při venkovních podmínkách měď vytvoří na povrchu modrozelenou patinu, lze tomu zabránit použitím akrylátového nátěru. Slitina mědi a berylia má vynikající mechanické vlastnosti a využívá se k výrobě pružin. U konstrukce RTD se využívá měď k realizaci stonku senzoru a používá se i pro vrstevná čidla. Nevýhodou mědi je, že oxiduje při poměrně nízkých teplotách, tzn. nemůže se používat při teplotě vyšší než je 150 °C. Dalším nedostatkem je nízká rezistivita, která je oproti platině 6x menší. Měděné senzory se tedy příliš nevyrábí. Teplotní závislost odporu mědi lze úspěšně využít při měření teploty vinutí u elektromotorů ve vypnutém stavu.

Molybden si udržuje svoji pevnost a tuhost i při 1600°C. Molybden a jeho slitiny jsou snadno obrobitelné běžnými nástroji. V neoxidačním prostředí odolává většině kyselin. Jeho hlavní využití je pro vysoko teplotní zařízení, jako jsou topné prvky a zářiče intenzivního infračerveného záření pro vysokoteplotní pece. Molybden má nízký koeficient tepelné roztažnosti a odolává erozi roztavených kovů. Tento kov je zajímavý svou dobrou linearitou a u RTD senzorů se používá pro senzory v rozsahu -200 °C do 200 °C.

Zlato je velmi měkký a chemicky inertní kov. Může být poškozen jen kapalinou aqua regia (směs kyseliny dusičné a kyseliny chlorovodíkové), sodíkem a draslíkem za přítomnosti kyslíku. Jeden gram čistého zlata může být zpracován do listu pokrývající 5000 cm² a tloušťku menší než 0,1 mm. U RTD je zlato používáno především u kontaktů, kde slouží pro úpravu povrchu jako pokovení a zlepšení vodivostních vlastností kontaktů. Dále je využíváno jako přídavný prvek ve slitinách společně s kovy, jako je měď, nikl a stříbro.

Stříbro je nejméně nákladné ze všech drahých kovů. Je velmi tvárné a odolné vůči korozi. Má největší elektrickou a tepelnou vodivost ze všech kovů a proto je hojně využíváno na pokovování kontaktů, čím dochází ke zlepšení kontaktních vlastností materiálu a dále se přidává do slitin stejně jako zlato.

1.3.4 Keramika

V senzorových technologiích je keramika velmi vhodný krystalický materiál díky své konstrukční pevnosti, tepelné stálosti, nízké hmotnosti, odolnosti vůči mnohým chemikáliím, schopnosti přilnout k jiným materiálům a vynikající elektrické vlastnosti. Přestože většina

kovů tvoří minimálně jednu chemickou sloučeninu s kyslíkem, pouze jen několik oxidů je vhodných jako základní složka keramiky. Příkladem je oxid hlinitý a beryllia.

Vzhledem ke své tvrdosti většina keramiky vyžaduje speciální zpracování. Přesnou a cenově efektivní metodou řezání různých tvarů z keramických substrátů je rýhování, obrábění a vrtání s využitím počítačově řízeného CO₂ laseru. Substráty senzorů z keramiky jsou dostupné od mnoha výrobců v tloušťce od 0,1 do 10 mm. [1]

V RTD je keramika nejčastěji používaná jako nosný materiál, tedy jako substrát. Nejvyužívanějším materiálem pro tvorbu substrátu jsou Al₂O₃ či LTCC. [13]

Alumina neboli oxid hlinitý (Al₂O₃) je keramika využívaná v různých úrovních čistoty pro nespočet aplikací, kde je zapotřebí keramického materiálu. Pro RTD a jejich substráty se využívá nejčastěji Rubalit[®], kterému se dají modifikovat různé vlastnosti dle požadavků zákazníka jako je např. velká mechanická odolnost, tepelná vodivost nebo mimořádně jemný povrch pro využití v technologii tenkých vrstev. [14]

Dalším keramickým materiálem je Rubalit[®] C799 nebo Dimulit[®] C610, pro něž je charakterizující výborná elektrická izolace a mechanická odolnost. Dále pak Pormulit[®] C530, který nabízí mírně porézní materiál. Tyto materiály jsou vyráběny podle standardů DIN 40680 společností CeramTec. Tyto druhy keramiky jsou výhradně vytvářeny pro RTD a využívají se ve speciálních aplikacích při měření teploty. Nejčastěji se z Pormulitu vyrábí trubice. Trubice jsou využívány jako izolační nebo ochranné prvky v RTD, které mají velkou odolnost vůči agresivnímu prostředí a to i v nejnáročnějších podmínkách, kde teploty mohou dosahovat až 1700 °C. Tato vlastnost dělá z tohoto typu keramiky jedničku na trhu pro náročné podmínky. [14]

LTCC je materiál pro vícevrstvé substráty tvořené spojením keramických a skleněných částic. Taková to směs se dále pojí polymerním pojivem. Tento substrát se vypaluje zároveň s nanosenou funkční vrstvou, což umožňuje vyrábět různě tvarované struktury RTD. Důvodem využívání vícevrstvého substrátu je miniaturizace. Velké využití mají v automobilovém průmyslu a vyznačují se vysokou spolehlivostí. [15,13]

1.3.5 Skla

Sklo je amorfni pevný materiál vyrobený tavením oxidu křemičitého a kyslíku. Sklo je charakteristické průhledností, dostupností v mnoha barvách, tvrdostí a odolností vůči většině chemikálií, mimo kyseliny fluorovodíkové. Základem většiny skel je křemičitanový systém a jsou vyráběna ze tří hlavních složek: oxid křemičitý (SiO), vápno (CaCO₃) a karbonit sodný

(NaCO_3). Skla se využívají v RTD technice kvůli jejich velké tepelné a chemické odolnosti, malé povrchové rezistivitě a dobré pevnosti v tahu, nejčastěji jako nosné jádro, nebo jako ochrana rezistivního materiálu.

Bez křemičitanová skla zahrnují fosfátová skla, jež odolávají kyselině fluorovodíkové a teplo absorbující skla vyrobená z FeO a systémy založené na oxidu hliníku, vanadu, germania a dalších kovech. Kovy se přidávají do skel z důvodu úpravy teplotní roztažnosti.

Borosilikátové sklo je nejstarší typ skla nahrazující křemičité, které je v zásadě odolné proti tepelnému šoku. Některé molekuly SiO_2 jsou nahrazeny oxidem boritým. Toto sklo má nízký koeficient tepelné roztažnosti a řadí se mezi tvrdá skla. V RTD se používá jako nosná složka, na které je navinut odporový materiál. [1]

1.3.6 Nanomateriály

Před několika lety byli nanotechnologie zbožné přání než skutečnost. V současné době se tato technologie rozvíjí velmi rychle.

Uhlíkové trubičky patří mezi nanomateriály, které mají velký význam pro snímací technologie. Jsou uspořádány do trubkovitého tvaru s pozoruhodným poměrem délka-průměr. Průměr nanotrubiček je jen několik nanometrů, zatímco délka je několik milimetrů. Mají pevnost v tahu 100 krát větší než ocel a disponují jedinečnými elektrickými vlastnostmi, jsou účinné tepelné vodiče. Patří mezi nejlepší tepelné vodiče, jejich teoretická tepelná vodivost je 20 krát větší než u mědi. Nanotrubičky se staly atraktivní pro výrobu teplotních a infračervených senzorů, mohou přenášet elektrický proud tisíckrát silněji než měď. Jejich finální využití může být omezeno jejich možnou toxicitou. Při měření teploty se chovají jako NTC prvky, což znamená, že při vzrůstající teplotě se měrný odpor snižuje. Tento materiál je dodáván ve formě prášku o velikosti 1,2 až 1,7 nm, který je nanášen na tenkovrstvý materiál. Uhlíkové nanotrubičky mají jedinečné elektrické vlastnosti. Jde o klíčovou technologii budoucnosti a její využití se nabízí téměř v každém oboru jako např. v biomedicínských aplikacích, v integrovaných obvodech či v kompozitních materiálech. RTD senzory s nanomateriály jsou pouze experimentální, ale velmi ambiciózní. [1, 16]

1.4 Charakteristické parametry a vlastnosti RTD

Většina podnětů nejsou elektrické povahy a senzor může vykonat několik energetických transformací, než na výstupu vytvoří elektrický signál. U RTD je podnětem teplota, která je požadovaným výstupem. Teplota se získává pomocí předem definované odporové vlastnosti

kovů. Kde na kov působí teplota, rozkmitávají se strukturové mřížky kovu a zvětšuje se měrný odpor. Tento odpor poté měříme a následně se dopočítává požadovaná teplota. Příkladem je tlak, který působí na optická vlákna tlakového senzoru, deformace ve vláknu způsobuje ohyb v indexu lomu, jenž má za následek celkovou změnu v optickém přenosu a modulaci hustoty fotonu. Tok fotonů je detekován fotodiodou a převeden na elektrický proud.

V následující kapitole se budu věnovat celkové charakteristice senzorů, nebudu brát v úvahu fyzickou povahu či kroky nezbytné k vytvoření energetické přeměně. [1]

1.4.1 Stabilita

Stabilita je schopnost senzoru udržet stejnou odolnost proti teplotní závislosti za stejných podmínek v průběhu času. Typický popis stability určuje posun na méně než $0,1^{\circ}\text{C}$ za rok při normálním provozu.

Mnoho stejných faktorů, které ovlivňují posun termočláneků, budou též ovlivňovat posun u RTD senzorů. Obecně platí, že posun rezistence vůči teplotní charakteristice je obecně důsledkem výběru prvku materiálu (platina je nejstabilnější), obalový či izolační materiál a mechanické zatížení působí na prvek materiálu.

Fyzické či teplotní šoky mohou též ovlivňovat malý jednorázový posun R vs T .

Posun způsobený znečištěním a mechanickým namáháním lze odstranit pečlivým výběrem izolačního materiálu s ohledem na rozsah provozních teplot v daném prostředí, ve kterém je senzor použit. Obecně platí, že RTD bude mít mnohem větší stabilitu než termočlánek, především pokud je dobře použit v rámci svého rozsahu v normálním provozním prostředí.

Charakteristické parametry pro RTD posun jsou řádově kolem $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ či $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ za rok pro normální provoz, ale za normálních podmínek v rámci pracovního rozsahu. Skutečný posun bude podstatně menší možná $\leq \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ za 5 a více let. Posun je definován těmito specifickými diskrétními úrovněmi z důvodu použitého materiálu během výroby (platina, nikl, či slitiny niklu), které jsou nelineární a mají sklon k posunu v čase.

Stabilita platinových RTD senzorů je největší s charakteristickým posunem $\leq 0,05^{\circ}\text{C}$ za více než pěti letou dobu. [17]

1.4.2 Opakovatelnost

Opakovatelnost (reprodukovatelnost) je chyba způsobená neschopností senzoru zobrazit stejnou hodnotu při téměř stejných podmínkách. Opakovatelnost je vyjádřena jako maximální rozdíl mezi výstupními snímáními, jak stanovují dva kalibrační cykly, pokud není uvedeno jinak.

Obvykle je vyjádřena jako % z FS: $\delta_r = \frac{\Delta}{FS} 100\%$

Možnými příčinami chyby opakovatelnosti může být tepelný šum.

Možné zdroje chyby opakovatelnosti může být tepelný šum, vybudovat náboj, materiálová plasticita, zvýšené zatížení, atd. [1]

1.4.3 Hystereze

Hystereze je odchylka výstupu snímače v určitém bodě vstupního signálu, když se přiblíží z opačného směru.

$$h_{\Delta} = x - y$$

Například přenastavení senzoru, když se objekt pohybuje zleva doprava, v určitém bodě vytvoří napětí, jenž se liší o 20 mV od vytvořeného napětí, když se objekt pohybuje zprava doleva. Jestliže je citlivost senzoru 10 mV/mm, činí chyba hystereze z hlediska přemístění jednotek 2 mm.

Charakteristické příčiny hystereze jsou geometrie provedení, tření a strukturální změny v materiálu. [1]

1.4.4 Dynamika

Jakmile se vstupní podnět změní se znatelnou intenzitou, je odezva senzoru zpomalená. Důvodem je, že snímač a vazba na zdroj stimulu nemohou pokaždé okamžitě reagovat. Jinak řečeno, senzor může být charakterizován s časově závislou vlastností, která je nazývána dynamickou vlastností. Pokud snímač nereaguje okamžitě, může zobrazovat podnět trochu odlišně od skutečnosti, to znamená, že senzor reaguje s dynamickou chybou. Rozdíl mezi statickou a dynamickou chybou je, že dynamická chyba je časově závislá a vyjadřuje se teplotní časovou konstantou.

Pokud je senzor součástí řídicího systému, jenž má vlastní dynamické vlastnosti, kombinace těchto dynamických vlastností může v nejlepším případě způsobit zpoždění představující skutečnou hodnotu podnětu nebo v nejhorším způsobit nežádoucí oscilace.

V teorii řídicího systému se běžně popisuje vstupně-výstupní závislost pomocí konstantního koeficientu lineární diferenciální rovnice. Následně lze takovou rovnici vyhodnocovat dynamické vlastnosti senzoru. V závislosti na provedení snímače, může být diferenciální rovnice několik řádů.

Snímač nultého řádu je charakterizován přenosovou funkcí, která je časově nezávislá, reaguje okamžitě. Neobsahuje žádný zásobník energie – kondenzátor.

Snímač diferenciální rovnice prvního řádu obsahuje jednu součást akumulace energie. Vztah mezi vstupním $s(t)$ a výstupní $S(t)$ je diferenciální rovnice:

$$b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t) = s(t)$$

Typickým příkladem senzoru prvního řádu je teplotní čidlo, kde akumulátorem energie je teplotní kapacita.

Frekvenční charakteristika určuje, jak rychle snímač prvního řádu reaguje na změny vstupního podnětu. Je vyjádřena v Hz nebo rad/s k určení relativního snížení výstupního signálu na určité frekvenci. Frekvenční odezva se přímo vztahuje k rychlosti odezvy, jež je stanovena v jednotkách vstupního podnětu za jednotku času. Stanovení frekvence nebo rychlosti ve zvláštních případech je závislé na typu snímače, jeho použití.

Další způsob, jak určit rychlost odezvy je dle času, jenž je požadován senzorem k dosažení 90% ustáleného stavu. Pro odezvu prvního řádu je velmi výhodné využít konstantní čas. Časová konstanta je měřítko nečinnosti snímače. Prakticky, je časová konstanta snadno měřitelná.

Tlumení je postupné omezování či potlačování oscilace ve snímači, jež je větší než odezva prvního řádu. Pokud je odezva snímače rychlá, ale bez překročení, jedná se o kritické tlumení.

Podtlumení odezvy je, když překročení nastane a přetlumení odezvy je nižší než kritické.

Tlumicí poměr je číslo vyjadřující podíl skutečného tlumení lineárního převodníku druhého řádu a jeho kritického tlumení.

Pro oscilační odezvu, je tlumicí faktor mírou tlumení, vyjádřenou jako podíl většího od nejmenšího ze dvou po sobě následujících výkyvů v opačných směrech výstupního signálu, přibližně na konci ustáleného stavu hodnoty.

Tlumicí faktor může být měřen jako: $\text{tlumicí faktor} = \frac{F}{A} = \frac{A}{B} = \frac{B}{C} = atd. [1]$

1.4.5 Citlivost

RTD snímač je citlivý na teplotní odpor. Údaj o citlivosti snímače udává, jak se mění odpor s měnící se teplotou. Některé diskuze radí, jednoduše používat hodnotu alfa z prvku naznačující citlivost RTD, to může být zavádějící, protože přímo neukazuje hodnotu změny odporu při 1 stupni.

Pokud budeme zkoumat, jak je alfa vypočítaná $d = [(R_{100^{\circ}\text{C}} - R_{0^{\circ}\text{C}})/R_{0^{\circ}\text{C}}]/100^{\circ}\text{C}$, uvidíme, že alfa skutečně představuje nepatrný nárůst odporu nad 100°C . Jinak řečeno, $\alpha = 0,00385$, odpor se zvyšuje 38,5% od $0-100^{\circ}\text{C}$, nebo 0,385% pro každý $^{\circ}\text{C}$. Proto můžeme použít $0,385\%/^{\circ}\text{C}$ pro označení citlivosti snímače.

Jednoduše řečeno, můžeme vypočítat citlivost odporu teploměru vynásobením odporu RTD referenční teploty R_0 (kalibrační teplotě) a koeficientu teplotního odporu (TCR nebo hodnota alfa). $\text{Citlivost} = K_{RTD} = R_0 * \alpha$

Pro 100Ω platinový RTD s $\alpha = 0,00385 \text{ z/z}^{\circ}\text{C}$ a $R_0 = 100 \Omega$, koeficient citlivosti se vypočítá pomocí výrazu $100 \Omega \cdot 0,00385 \text{ z/z}^{\circ}\text{C} = 0,385 \Omega/^{\circ}\text{C}$. 100Ω snímač při 0°C bude zvyšovat odpor $0,385 \Omega$ při 1°C .

Čím vyšší je hodnota alfa, tím je snímač citlivější. Niklový snímač má hodnotu $\alpha = 0,00672 \text{ z/z}^{\circ}\text{C}$ a je citlivější na teplotní změnu než platinový snímač.

Citlivost RTD snímače poukazuje na změnu odporu v závislosti na teplotě. Je to i funkce základního odporu a koeficientu teplotního odporu (TCR). Snímač s vyšší citlivostí nemusí být nutně přesnější, ale větší signál vytváří tendenci být méně náchylný k elektrickému šumu, protože se obecně zlepšuje poměr signálu k šumu v rozhraní snímače. Větší odpor vytváří stejné výstupní napětí s nižším proudem, což pomáhá zmírnit vlastní tepelný účinek ve snímacím prvku. [17]

1.4.6 Přesnost a tolerance RTD

Platinové RTD senzory se vyrábí ve čtyřech základních třídách přesnosti, které mají svá toleranční pásma. Jednotlivé třídy přesnosti se od sebe liší velikostmi odchylek odporu od jmenovitých hodnot. U platinových čidel se využívá třídy AA a A pro velmi přesné měřicí přístroje určené pro přesná kontrolní měření a k výrobě provozních etanolů. Zbývající dvě třídy (B, C) jsou často používány pro běžné provozní měření. [18]

Třídy jsou znázorněny charakteristickými rovnicemi:

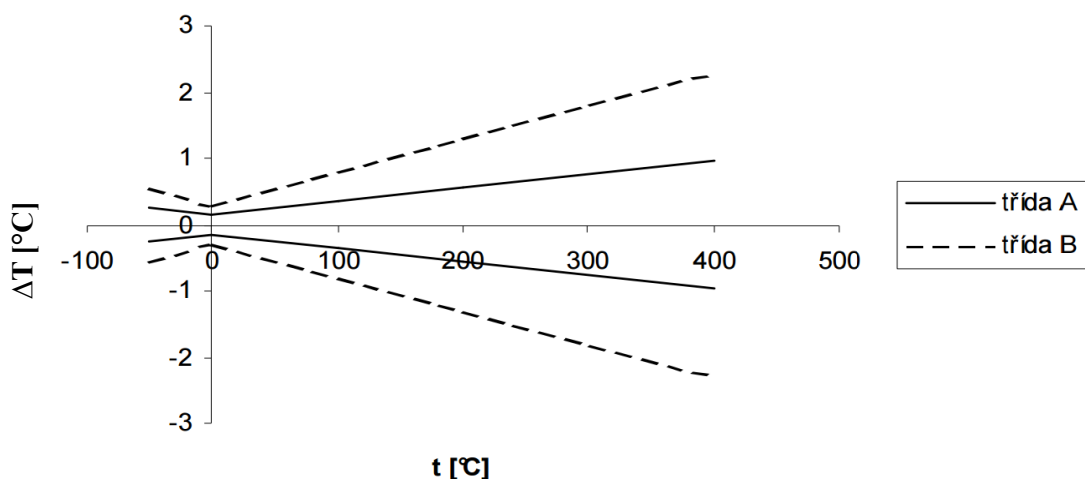
- Třída AA: $\Delta T = \pm (0,10 + 0,0017 | t |) [^{\circ}\text{C}]$
- Třída A: $\Delta T = \pm (0,15 + 0,002 | t |) [^{\circ}\text{C}]$
- Třída B: $\Delta T = \pm (0,10 + 0,005 | t |) [^{\circ}\text{C}]$
- Třída C: $\Delta T = \pm (0,10 + 0,010 | t |) [^{\circ}\text{C}]$

$| t |$ - absolutní hodnota teploty s jednotkou $^{\circ}\text{C}$

Pro srovnání uvedu příklad přesnosti tříd A a B pro Pt 100:

Tabulka 1: Dovolené tolerance tříd A a B pro Pt100

Třída přesnosti	Rozsah teplot [$^{\circ}\text{C}$]	Tolerance [$^{\circ}\text{C}$]
A	-50 ÷ 400	$\Delta T = \pm (0,15 + 0,002 t)$
B	-50 ÷ 400	$\Delta T = \pm (0,10 + 0,005 t)$



Graf 1: Dovolené tolerance tříd A a B pro Pt100

1.4.7 Samo-ohřev (Self-heating)

Důsledkem principu RTD, kde při průchodu měřícího proudu senzorem se část energie přeměňuje na teplo, a vznikají tzv. Jouleovy ztráty, se senzor začne ohřívat. Tento jev je v senzorové technice nežádoucí a nesmí být zanedbán. Změna teploty je tedy závislá na velikosti provozního proudu, prostředí a na konstrukci senzoru. Z tohoto důvodu výrobci RTD uvádějí maximální nominální proud, aby nedocházelo k chybám a zkreslení měření. Stanovení teplotní chyby docílíme za pomoci koeficientu samoohřevu. Tento koeficient se mění podle prostředí a typu senzoru. [18]

$$\Delta t = RI^2 \cdot S$$

R – odpor [kΩ]

I – měřící proud [mA]

S – koeficient samoohřevu [°C · mW⁻¹]

Jako příklad bych uvedl RTD senzor Pt 100, u kterého je výrobcem daný nominální proud 1 mA. Průchodem proudu senzorem při běžných provozních podmínkách vznikne chyba maximálně 0,05 °C. Někteří výrobci ale uvádějí u stejného typu senzoru maximální nominální proud 10 mA, kde se chyba za stejných podmínek může zvětšit až na 2 °C. [18]

Této nežádoucí vlastnosti se dá předejít využitím pulzního měření. Principem pulzního měření je, že se do senzoru pouští nominální měřící proud pouze po krátkou dobu, kde vytvořené Jouleovo teplo je schopno se rozptýlit a neovlivní tak měřící výsledky. [18]

1.5 Srovnání RTD snímačů s ostatními teplotními snímači

1.5.1 Odporové teploměry

Jsou založeny na fyzikálních vlastnostech elektricky vodivých látek a polovodičů. Jejich odpor projevuje závislost na teplotě, kterou je možné ve stanoveném rozsahu substituovat přímkou. Polynomy vyšších stupňů nahrazují vztah odporu a teploty z důvodu vyšší přesnosti a velkých rozsahů. Pro vyšší teploty bývají odporové teploměry nejčastěji vyrobeny z platiny, pro nižší teploty je možné využít nikl, zlato, stříbro či slitiny zlata a stříbra a jiné. [1]

RTD teploměry

Čidlo RTD teploměru se vyrábí z drátku o průměru 0,01 až 0,1 mm. Přívody k čidlu jsou z materiálu, jenž s odporovým drátem netvoří galvanický či termoelektrický článek.

Použití RTD teploměrů je výhodné pro využití naměřených signálů k dalšímu elektrickému zpracování změřených hodnot (v oblasti regulace, automatizace apod.). [19]

Termistory

Termistory se podle struktury člení na amorfí a polykrystalické. Teplotní rozsah termistorů je odlišný v závislosti na použitém materiálu.

- NTC termistory – disponují záporným teplotním součinitelem odporu. Vytvářejí se práškovou technologií ze směsi oxidů kovů. Teplotní rozsah – 50 °C až 150 °C.
- PTC termistory – disponují kladným teplotním součinitelem odporu. Vytvářejí se z polykrytalické feroelektrické keramiky. Rezistence pozistoru se rostoucí teplotou zprvu mírně klesá. Velikost ϑ_j je volitelná podle chemického složení od 60 °C do 180 °C. [3]

1.5.2 Termoelektrické teploměry

Jsou opatřeny termočlánky - termoelektrickými čidly. Termočlánek jsou dva rozdílné vodiče, jež jsou na jednom konci vodivě spojeny pomocí pájení či sváření a druhým koncem jsou zapojeny do svorkovnice. Využívá se Seebeckova jevu. Pokud měřicí spoj různých kovových materiálů bude mít odlišnou teplotu než spoj na, kterém držíme konstantní teplotu, vzniká termoelektrické napětí. Relativně malé rozměry termočlánekového spoje je možné použít i k měření teplot povrchů či dynamickému měření.

Použijeme-li termočlánek s větším pracovním rozsahem, než je nezbytné, pouze tak zvýšíme nepřesnost měření, jelikož chyba měření se stanovuje z pracovního rozsahu.

Termoelektrické teploměry se využívají, je-li třeba využít naměřených signálů k dalšímu elektrickému zpracování zmařených hodnot v oblasti automatizace a měření s použitím počítačů. Měření termoelektrického napětí se činí za pomoci odchytky či vyrovnávací metody měření malého stejnosměrného napětí. [19]

1.5.3 Zařízení pro infračervené měření teploty

Jedná se o snímače, jenž měří teplotu bezdotykově. Teplota je odvozena z měřené tepelné radiace, kterou vyzařuje měřený materiál.

Infračervený teploměr je zařízení, které je tvořeno čočkou k zaměření infračerveného paprsku na detektor, který jej převádí na elektrický signál, jenž může být zobrazován v teplotních jednotkách poté, co bylo vykompenzováno kolísání teploty okolního prostředí. Tato konfigurace usnadňuje měření teploty bez přímého kontaktu s měřeným objektem. Infračervený teploměr je vhodný pro měření teploty v případech, kdy nelze použít termoelektrické články nebo jiný typ senzorů. Jedná se o měření, kdy je předmět v pohybu, je obklopen EM polem, je umístěn ve vakuu či v aplikaci vyžadující rychlou odezvu. [20]

1.5.4 Bimetalové (dvojkovové) teploměry

Teploměry využívají přednosti tepelné roztažnosti mezi různorodými materiály. Pásky dvou materiálů jsou k sobě spojeny válcováním. Jakmile se tento pásek ohřívá, jedna strana se prostřednictvím tepelné roztažnosti roztahuje více než druhá a konečné ohýbání je transformováno na teplotní údaj prostřednictvím mechanického převodu na ručičku přístroje.

Aparáty jsou přenosné a nevyžadují zdroje napájení, ale nejsou tak přesné oproti termočládkům či odporovým teploměřům, nehodí se k okamžitému měření teploty. [20]

1.5.5 Teploměry využívající roztažitelnosti kapalin

Teploměry pracují na principu tepelné roztažnosti látek. Medium je uzavřeno do skleněné trubičky (kapiláry), vedle které je vyznačena normalizovaná stupnice k odečítání hodnot. Objem media se mění s teplotou, jako medium se nejčastěji využívá rtuť nebo obarvený líh. Rtuť je velmi škodlivá k životnímu prostředí a prosazují se přísné předpisy i pro přepravu přístrojů a zařízení s obsahem rtuti. Jsou též používány i plynové náplně. Mezi plynové náplně můžeme zařadit xylen určený pro rozsah teplot -40 až 400 °C nebo methanol -40 až 150 °C

Výhody: nevyžadují zdroj elektrického napájení, nehrozí riziko výbuchu a jsou stabilní při opakovaném cyklování.

Nevýhody: není možné s nimi provádět bodová či plošná měření, nepředávají data k snadnému zaznamenání či přenosu. [20]

1.5.6 Teploměry měřící změnu stavu

Do této skupiny teploměrů náleží nálepky, tužky (krajony), laky či tekuté krystaly, jež dosažením určité teploty zaznamenají změnu. Používají se například s parním sifonem, jakmile sifon překročí určitou teplotu, bílý bod na štítku snímače připojeného k sifonu zčerná.

Využívají se pro aplikace, kde je třeba pouze indikovat změnu předem stanovené teploty nebo její dosažení. Materiály citlivé na teplo v podobě tužek, štítků a jiných variant jsou levnou formou měření teploty s dostatečnou přesností pro většinu průmyslových aplikací. Skládají se z krystalicky pevných látek, při zahřátí dosažené teploty se pevná látka změní na kapalinu.

Výhody: jednoduchá aplikace a měření,

Nevýhoda: nižší přesnost v porovnání s jinými typy snímačů. Změna stavu je nevratná, mimo provedení teploměrů s tekutými krystaly. Čas odezvy je většinou několik minut, tudíž nezachytí dočasné změny teploty.

I přesto jsou vhodné, je-li potřeba ověřit, že teplota části přístroje či materiálu nepřekročila stanovenou hodnotu, např. pro technické i právní argumenty při doručování výrobku. [20]

Tabulka 2: Srovnání vlastností senzorů měřících teplotu

	Odporové	Termoelektrické	Infračervené	Bimetalové	Kapalinové	Stavové
Výhody	Velmi vysoká přesnost Stabilita Odezva Teplotní rozsah	Dynamika Bodové měření	Odezva Bez kontaktní Jednoduchost měření Citlivost	Bez napájení	Bez napájení Stabilita Opakovatelnost Cena	Lehce použitelné Bez napájení Cena
Nevýhody	Vyžaduje napájení Cena	Nutnost dalších přístrojů pro měření Chyba měření z velikosti rozsahu	Vyžaduje napájení Cena Vliv okolí	Doba zotavení Odezva	Odezva Křehkost	Přesnost Měří skokově Odezva

2 Použití a měření pomocí RTD

2.1 Metody charakterizace a kalibrace RTD

2.1.1 Charakterizace RTD

Charakterizace je typ kalibrace, při které je jednotka testována a odpor je stanoven v několika teplotních místech a data jsou vyjádřena matematicky. Tato metoda se nejčastěji používá pro střední a vysokou přesnost. Touto metodou se nový odpor v závislosti na teplotě určuje každou teplotou.

Pět základních kroků charakterizace:

1. Umístění referenční sondy a testovaného snímače do měřené teploty.
2. Připojení pro odečítání měřených hodnot.
3. Provedení měření referenční sondou a stanovená referenční teploty.

4. Provedení měření testovaným snímačem.
5. Vyhodnocení dat

Krok 1: Umístění

Všechny teplotní zdroje jsou nestabilní a mají teplotní sklon. To se odráží v kalibračních chybách a nejistotách. Pro minimalizaci těchto dopadů by měly být snímače umístěny co nejbližší k sobě. Referenční sonda a kalibrovaný snímač by měly být umístěny ve stejné vzdálenosti od středu tepelného zdroje, aby bylo dosaženo nejlepších výsledků. Snímače by též měly být ve stejné horizontální rovině, protože snímače jsou různých délek.[18]

Pro kalibrace se využívá několik druhů pecí podle druhu RTD senzoru. Sensory jsou vystavovány mechanickému, tepelnému a chemickému namáhání pro zjištění požadovaných vlastností senzoru. Tyto pece se vyrábějí jako mobilní stanice pro kalibraci teplotního senzoru v různých, ale využívají se i v laboratorních podmínkách. Jako příklad uvedu kalibrační pece od firmy Sika, které dělí své pece dle využití. [21]

TP Basic – přenosná pec pro základní kalibrování zaměřená na mobilitu a odolnost vůči častým změnám prostředí

TP Solid – pece třídy solid se vyznačují svou jednoduchostí a flexibilitou. Zajišťuje intuitivní ovládání a jednoduchý provoz

TP Premium – jsou pece tvořeny pro vysokou přesnost díky optimálnímu výkonu.

Mezi jeden z nejvíce využívaných druhů pecí patří tzv. suchý blok. Ten je využíván pro kalibraci stonkových teplotních snímačů, kde kvůli své konstrukci zajišťuje optimální tepelnou vazbu. Jako druhý typ pece se řadí mikrolázeň, kde se jako medium využívá kapaliny, která je v přímém kontaktu se senzorem a díky plynulému řízení míchadel se v kapalině rozkládá teplota rovnoměrně. Pomocí těchto pecí lze kalibrovat nejrůznější tvary senzorů. Třetí nejzákladnější druh pece jsou ty se speciálním tělesem. Využívají se pro kalibraci povrchových senzorů. Na senzor působí těleso přitlačnou silou a není třeba teplovodivých past. [21]

Krok 2: Zapojení pro odečítání dat

Připojení musí odpovídat správné technické konfiguraci a technickému provedení snímačů, tedy dvěma, třemi nebo čtyřmi vodiči. Při čtyř drátové konfiguraci je nutné zajistit,

aby bylo správně zapojeno napájení snímačů. Senzory se připojí k A/D převodníku, který je propojen s počítači nejčastěji přes USB s příslušným měřicím softwarem a vloží se do kalibrační pece.

Krok 3: Měření a stanovení referenční teploty

Měřit a stanovit referenční teplotu lze dvěma způsoby. Obě metody mají stejný potenciál přesnosti, a pokud se provádějí správně, nelze říct, která z nich je přesnější.

První metoda je použití sofistikovaného odečtu údajů pro navrzení pracovní teploty. Metoda je postavena na kalibračních koeficientech, které před měřením musí být zadány. Odměřený odpor se následně pomocí zadaných kalibračních koeficientů přepočte na teplotu. Po zadání těchto kalibračních koeficientů, jsou teplotní výpočty prováděny interně a údaje se zobrazují v teplotních jednotkách. [18]

Teplotní data jsou k dispozici v reálném čase. Novodobé údaje se zobrazují jako data v grafickém formátu, umožňující určení referenční teploty na první pohled. Obě tyto funkce urychlují proces a eliminují možné chyby nesprávné interpolace, neboli proložení křivek v grafu z naměřených tabulkových hodnot. [18]

Druhá metoda se používá, když údaje není možné využít pro správný výpočet teploty dle předem daných kalibračních koeficientů. Metoda se nejčastěji využívá při měření senzorů teploty pomocí digitálních multimetrů (DMM). V tomto případě je odpor odměřený a teplota je stanovena buď z kalibrační tabulky, nebo pomocí počítače, případně výpočetním programem. [18]

Teplota musí být vypočtena po odměření odporu, proces je pomalejší a neposkytuje okamžité údaje o teplotě v reálném čase. Touto metodou nejsme schopni dosáhnout vysoké přesnosti kalibrace a je zde značná pravděpodobnost případných chyb při kalibraci. [18]

Krok 4: Měření testovaným snímačem

Testované snímače jsou podobné referenčním sondám, které jsou odměřovány podobným způsobem. Pokud testované snímače procházejí kalibrací, zajistěte, že pokud jsou připojené nebo zapnuté, dostatečný čas pro provozní zahřátí snímačů před zaznamenáváním dat. Také zajistěte, že údaj je nastaven ve správném rozsahu mezi měřeními při různých teplotách. Typicky jsou měření prováděna od největší kalibrační teploty a postupně se snižuje. Navíc se

zvyšuje přesnost kalibrace využitím střední (průměrné) hodnoty vypočtené z více měření při stejné teplotě. Často je údaj navržen se statickými funkcemi s cílem usnadnit proces.

Je mnoho proměnných, které se musí brát v úvahu při návrhu měřicího systému:

- Přesnost – vyšší přesnost je žádoucí.
- Stabilní teplota zdroje – stabilnější zdroj vyžaduje více času k provedení měření před teplotní změnou, způsobující nechtěné chyby.
- Počet testovaných snímačů – vyšší počet snímačů znamená delší čas měření.
- Počet údajů – bude referenční sonda a testované snímače měřit stejné údaje nebo rozdílné údaje.
- Typ údajů – údaje navržené pro teplotní kalibraci často mají funkce, které umožňují flexibilitu v měřicím systému.
- Charakteristiky testovaných snímačů – čas vlastního zahřívání, zdroj současných požadavků, stabilita a celková kvalita ovlivňují proces měření.

Krok 5: Vhodná kalibrační křivka

Získat vyhovující data je teoreticky snadné, ale složité je to v praxi. V podstatě se jedná o proces řešící soubor simultánních rovnic, které obsahují kalibrační údaje, které vedou k sadě koeficientů jedinečným ke kalibraci. K dispozici je několik komerčních softwarů určených plnění těchto úkolů. Některé mají omezené funkce a neřeší víc než základní funkce teploty. Jiné jsou flexibilnější a umožňují volby týkající se počtu a umístění kalibračních bodů a poskytují analýzy týkající se přesnosti výsledné vhodnosti. [18]

2.1.2 Kalibrace

Pokud tolerance výrobce senzoru a tolerance obvodu rozhraní jsou více mimo než požadovaná přesnost systému, je nutná kalibrace snímače nebo snímače a obvodu rozhraní, aby se minimalizovali chyby.

Příklad: Je nutné měřit teplotu s přesností 0,1 °C, k dispozici je snímač, jehož přesnost je hodnocena na 1 °C, to neznamená, že snímač nelze použít. Snímač vyžaduje kalibraci.

To znamená, že jeho specifické přenosové vlastnosti je třeba najít, aby se přizpůsobili skutečné odezvě snímače, nebo specifické přenosové vlastnosti je třeba upravit tak, aby umožňovali přesnější výpočet podnětů od odezvy snímače.

Účelem kalibrace je nalezení neznámých koeficientů (parametrů) pro inverzní přenosovou funkci, aby plně definovaná funkce mohla být použita během měření k výpočtu podnětů v požadované rozmezí, a to nejen v kalibračních bodech, ale i kdekoli jinde.

Kalibraci snímače je možné provést několika možnými způsoby:

1. Výpočtem přenosové funkce nebo její aproximace, aby odpovídala zvoleným kalibračním bodům.
2. Seřízením systému sběru dat k úpravě naměřených dat, aby se odpovídali normální nebo „ideální“ přenosové funkci.
3. Úpravou vlastností snímače, aby odpovídali předem určené přenosové funkci
4. Vytvořením referenčního přístroje s odpovídajícími vlastnostmi v určitých kalibračních bodech. [1]

2.2 Matematické vyjádření teplotní závislosti a standardy

Zkoumáme-li závislost nějaké veličiny na teplotě, zpravidla očekáváme, že je definována matematickou funkcí určitého typu. Výsledky měření lze znázornit jako množinu bodů $[x_1, y_1], [x_2, y_2] \dots [x_n, y_n]$ v rovině grafu, kde na osu x (vodorovná osa) vyneseme v přiměřeném měřítku teploty měření jako hodnoty proměnné veličiny nezávislé a na osu y (svislá osa) vyneseme v jiném přiměřeném měřítku naměřené hodnoty veličiny, u které zkoumáme teplotní závislost. Z výsledků měření potřebujeme spočítat hodnoty koeficientů v předpisu funkce $y = f(x)$ a stanovit průběh grafu, jenž funkci zobrazuje.

Pokud by měření bylo absolutně přesné, všechny body zobrazující výsledky měření by ležely na grafu funkce. Pro každý bod by platilo $y_i = f(x_i)$. Měření vždy disponuje chybami a vynášené body jsou dle jeho přesnosti více či méně rozptýleny kolem grafu, jenž charakterizuje reálnou teplotní závislost. Jeho exaktní průběh však neznáme. Ze všech případných funkcí daného typu proto hledáme takovou, jejíž graf bude mít průběh co nejbližší k vynášeným bodům.

Pro tuto úlohu se nejlépe jeví statistická metoda nejmenších čtverců. Hledáme průběh grafu, při kterém suma druhých mocnin svislých anomálií všech vynášených bodů od grafu bude minimální. Výpočet metodou nejmenších čtverců je nazýván regrese a jeho výsledkem je empirická regresní funkce.

Jako všechny statistické výpočty potřebuje i regrese využití výpočetní techniky. Je komponentou softwarové výbavy vědeckých kalkulaček, větší pohodlí však nabízejí matematické programy pro PC, z nichž nejznámější je MS Excel.

Běžné regresní programy se orientují především na tyto funkce jedné proměnné x :

- lineární regrese $y = a + bx$
- logaritmická regrese $y = a + b \ln x$
- exponenciální regrese $y = ae^{bx}$
- mocninná regrese $y = ax^b$
- polynomická regrese $y = b_0 + b_1x + \dots + b_nx^n$

Krom toho dovolují provádět lineární regresi funkce více nezávislých proměnných x_1, x_2, \dots, x_n , jenž můžeme charakterizovat vztahem $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$. [22]

Při kalibrování platinových čidel se nejčastěji využívá standardizovaného senzoru Pt 100, který se vyznačuje hodnotou 100Ω při teplotě 0°C . Dále se pro kalibrace používají Pt senzory s velikostí odporu $200, 500$ a 1000Ω . [23]

Platinové RTD jsou obvykle kalibrovány v určitých teplotních bodech, ale běžně senzory měří i mezi kalibračními body a je vyžadována korelace mezi odporem a teplotou. Tuto záležitost popisuje polynomickými rovnicemi Standard Callendar-Van Dusen, které jsou použity v DIN EN IEC 60751 a byly využity pro vytvoření standardu Mezinárodního teplotního měřítka ITS-27 v roce 1927, které se vyvinuly v roce 1990 ve standard ITS-90. Pro teploty pohybující se od -200 do 0°C se používá rovnice:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)]$$

R_0 – odpor senzoru při 0 °C

T – teplota v °C

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$$

$$B = - 5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$$

$$C = - 4,183 \cdot 10^{-12} \text{ °C}^{-4} \text{ pro teploty menší než } 0 \text{ °C}$$

Pro teploty od 0 do 850 °C se tvar rovnice zjednoduší kvůli absenci koeficientu C :

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

Kde A , B , C jsou koeficienty udávající vlastnosti platiny, v tomto případě jde hlavně o čistotu platiny a jsou udávány ve standardu EN 60751:1995. Na čistotu platiny se v těchto normách klade velký důraz. [23]

2.3 Přesnost určování teploty a typické chyby měření

Přesnost

Velmi důležitou vlastností senzorů je přesnost. Nepřesnost je největší naměřená odchylka senzorem od ideální nebo skutečné hodnoty podnětu. Odchylku lze popsat jako rozdíl mezi vypočtenou hodnotou výstupního napětí a skutečnou hodnotou vstupního napětí. [1]

Chyby měření

Rozdíly mezi naměřenou hodnotou teploty a skutečnou teplotou se nazývají chyby měření. [24]

U měření teploty pomocí RTD se musí dodržovat určitých opatření pro eliminaci, případně zmenšení chyb při měření. Mezi hlavní opatření, na které se musí dbát, patří:

Zabránění samo-ohřevu, vznikajícího průchodem nominálního pracovního proudu, a tím zahřívání samostatného čidla více v kapitole 1.4.7. [25]

Jako další se musí brát v úvahu odpor měřicího vedení, kde odpor vedení může způsobit ovlivňování výsledných hodnot a to především u vedení většího než několik cm. Tato chyba se odstraňuje pomocí tří nebo ještě lépe čtyřvodičového vedení viz. kapitola 1.2. [25]

Dalším opařením je správná volba senzoru pro určitý teplotní rozsah, který chceme měřit. Platinový senzor je vhodný pro teploty pohybující se od -240 do 649 °C. Dále platinový tenkovrstvý senzor pro -196 až 538 °C nebo niklový senzor, který má větší změnu odporu než platinové senzory s teplotou v rozmezí -350 až 316 °C. [25]

Neposledně také správný výběr měřicího zařízení. Jelikož RTD senzory samy o sobě měří velice přesně, změny odporu jsou malé a pro správné zachycení hodnot je potřeba citlivých přístrojů měřících odpor minimálně v řádech tisícin Ω . [25]

Chyby měření se skládají ze dvou složek a to náhodné a systematické chyby.

Náhodná chyba

Je tvořena z nepředvídatelných či náhodně dočasných a prostorových fluktuací ovlivňujících veličin. Přestože nelze vyrovnat náhodnou chybu výsledku měření, lze ji obvykle zredukovat zvýšením měření; její střední hodnota je rovna nule. [26]

Systematická chyba

Shodně jako náhodnou chybu, nelze ji eliminovat, avšak lze jí velmi často snížit. Pokud byla systematická chyba vytvořena vlivem jedné ovlivňující veličiny na výsledek měření, pak lze tento vliv kvantifikován. Je-li významný, co do rozsahu v souvislosti k žádané přesnosti měření, lze tento vliv kompenzovat aplikací korekce či korekčního činitele. Je možné předpokládat, že po korekci bude očekávaná hodnota chyby, způsobená ovlivňující veličinou, nulová. [26]

Nejistoty při měření

V pokynu GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (ÚNMZ Sborníky technické normalizace 2012) jsou vymezeny základní zásady pro posuzování a formulování nejistoty při měření, jenž je možné využívat pro rozdílné úrovně přesnosti a v mnoha odvětvích – od obchodu a výroby, po základní výzkum. [26]

Nejistota

Pojem „nejistota“ vyjadřuje pochyby, v širším významu vyjadřuje „nejistota měření“ pochybování o validitě výsledku měření. Formuluje skutečnost, že pro stanovenou měřenou

veličinu a stanovený výsledek měření, neexistuje pouze jedna hodnota, avšak nekonečný počet hodnot rozptýlených okolo výsledku, jenž jsou ve shodě e všemi pozorováními a s daty.

Tyto hodnoty s rozdílným stupněm spolehlivosti mohou být připisovány měřené veličině.

Standardní nejistota

Nejistota výsledku měření zobrazená směrodatnou odchylkou.

Kombinovaná standardní nejistota

Standardní nejistota výsledku měření, je-li výsledek dosažen z hodnot několika dalších veličin, shodující se s kladnou hodnotou druhé odmocniny součtu výrazů. Výrazy jsou rozptýly či kovariance těchto dalších veličin porovnáváné dle toho, jak se výsledek měření obměňuje se transformacemi těchto veličin.

Rozšířená nejistota

Veličina určující interval kolem výsledku měření, jenž připouští očekávat zajištění velkého podílu rozdělení hodnot, jenž mohou být přidruženy k měřené veličině. [26]

3 RTD realizovaná na flexibilních substrátech

Účelem vrstevových technologií je zhotovení filmu konkrétního materiálu (v případě snímacího senzoru) na příhodné nosné podložce – tak zvaném substrátu. [27]

3.1 Specifické vlastnosti

Proporcionální stabilita – flexibilní substrát musí být rozměrově stabilní. Rozpínání či smršťování základního materiálu je během zpracování problémem jak pro výrobce, tak i pro uživatele. Těmto vlivům je nutné se vyvarovat, poněvadž není-li změna predikovatelná, může ovlivnit kompletní postup výroby obvodu a jeho montáž. V realitě mohou být substráty využity v rozdílných oblastech, než v kterých byly testovány výrobcem. Rozsah využití a v jaké oblasti budou umístěny, může být klíčovým kritériem pro výběr materiálu. [28]

Pružnost – je dána pevností v ohybu. Flexibilita materiálu je velmi často mezní vlastností. Flexibilní obvody mohou být podrobeny extrémním rozsahům teplot. Velmi podstatné je zaručit především pružnost během nízkých teplot, kdy má materiál dispozice křehnout a následně se rozlomit. Mnoho materiálů může vykazovat pružnost, jsou-li dostatečně tenké. Nároky na pružnost závisejí na aplikaci, ve které budou materiály využity. [28]

Dle rozsahu pružnosti lze materiály rozčlenit na:

- Flexibilní
- Permanentně tvarované
- Flexibilně roztažitelné [29]

Teplotní odolnost – během montáže elektronických částí se využívají procesy se zvýšenou teplotou (například pájení přetavením), musí být pro flexibilní obvod vybrán takový materiál, jenž bude bezpečně vzdorovat těmto výrobním teplotám a nebude nastávat žádné poškození. To nutí uživatele, aby volil dražší materiály, či pájky s nižším bodem tání. [28]

Pevnost - během konstrukce flexibilních obvodů se využívají tenké nevyztužené základní materiály, jež disponují náchylností k protržení. Upřednostňovaným základním materiálem pro výrobu flexibilních obvodů je takový materiál, jenž bude vysoce rezistentní proti jakémukoliv protržení. Rezistence proti roztržení je u těchto substrátů cenný atribut vzhledem k jejich tenkému a jemnému složení. [28]

Elektrické vlastnosti – elektrické atributy jsou jedním z podstatných měřítek, na něž se zaměřuje pozornost a jsou na ně kladeny značně vysoké požadavky. Elektrické atributy jsou nezbytné pro nové produkty. Bude nutné nadále zlepšovat jejich kvalitu a parametry pro růst rychlostí analogových a digitálních signálů. Materiály stanovené pro flexibilní obvodové aplikace musí disponovat elektrickými vlastnostmi adaptované výkonu a požadavkům výrobku. Se zvětšující se přenosovou rychlostí by použité materiály měli disponovat nízkým ztrátovým činitelem a dielektrickou konstantou. Izolační odpor patří mezi další požadovaný atributy v oblasti vysokého napětí. Avšak u některých aplikací mohou být nároky rozdílné – jako například vysoká dielektrická konstanta a současně tudíž i velká kapacita. Naštěstí je mnoho eventuálních materiálů, jež splňují různé potřeby. [28]

Pohlcování vlhkosti – úroveň vlhkosti negativně působí na materiál už během výroby. Může například zapříčinit oddělení vzájemně spojených vrstev a znehodnocení vlastností zhotoveného produktu. Atributy, jež mohou být porušeny, jsou kupříkladu dielektrická konstanta a nárůst ztráty signálu. Vlhkost klima je v rozdílných částech světa různá. Je podstatné modifikovat návrh a výrobu žádaného materiálu tak, aby se mohl materiál se svými atributy správně přizpůsobit v konkrétním klimatu. Řízení vlhkosti je složitý a nákladný proces, proto je nutné porozumět aspektům materiálů. [28]

Chemická odolnost – schopnost flexibilního substrátu čelit různorodým chemickým látkám je nesmírně zásadní jak pro výrobce, tak i pro koncové spotřebitele. Materiál musí být rezistentní vůči různorodým chemickým látkám a rozpouštědlům, které jsou využívány během montáže a čištění. [28]

3.2 Typická konstrukční provedení

Existují dva hlavní přístupy k zhotovení vrstvy požadovaného materiálu:

1. Tenkovrstvá technologie – nanášení funkčních částic některou z fyzikálních či chemických depozičních technik.
2. Tlustovrstvá technologie – nanášení „pasty“ vytvořené z funkčních, pojivových, vazebních a přizpůsobivých prvků a její následující vytvrzení prostřednictvím tepelného procesu. Pasta (vodivá, odporová či dielektrická) je vytvořena rozdrčením funkčního materiálu (například u termistorových past to jsou speciálně vytvořené směsi oxidů některých kovů) na prášek a přimísením do pojivové matrice (polymery, rozpouštědla), jenž zahrnuje i další modifikační prvky (přísady pro změnu vlastností pasty) a prvky pro zformování vazby na substrát (nízkotavná skla, keramika, polymery). Tato směs je náležitým vhodným postupem nanášena na požadovanou podložku (nejčastěji technikou sítotisku, aplikuje se však i spousta jiných nanášecích technik). Následuje teplotní výpal s exaktně určeným časovým průběhem. Z hlediska materiálového základu je možné nanášené pasty rozčlenit na: cermetové a polymerní. Pro výrobu teplotních senzorů se používá obvyklejších i speciálních vodivých a odporových past, dielektrické materiály slouží k ochranným účelům. [27]

3.2.1 Plastové substráty

PI folie – patří mezi nejběžněji používaný materiál pro flexibilní elektroniku.

Vyrábějí se polykondenzací z aromatického dianhydridu a aromatického diaminu. Vytvořený prepolymer se buď roztaví v určitém rozpouštědle a vyrobí se tak lak nebo lepidlo, či se vytvrdí za vyšší teploty, čímž se vytvoří folie. Disponují vynikající tepelnou stálostí, vysokou tvarovou stabilitou, jsou rezistentní vůči různorodým rozpouštědlům a olejům. Své fyzikální a mechanické vlastnosti si zachovávají v širokém rozsahu teplot (-269 °C až +400 °C). Jsou vysoce rezistentní vůči alfa, beta, gama a ultrafialovému záření.

Hlavními negativy PI folie jsou její velké výrobní náklady a obtížná výroba. [30]

PET folie – silný, čirý termoplast s nízkou hmotností náležící do skupiny polyesterů. V závislosti na výrobním procesu a navazujícím zpracování lze připravit průhledný (amorfní) či mléčně zakalený (polokrystalický) PET. Tenká folie je biaxiálně orientovaná PET folie s povrchovou úpravou, potahovaná tenkou kovovou hliníku prostřednictvím technologie odpařování. Je transparentní, pružná a se zvyšující se tloušťkou se jeví mléčně zakalená. [31]

Díky vyrovnanosti elektrických, chemických a mechanických atributů poskytuje elektrotechnickému průmyslu unikátní konstrukční možnosti. Je odolná vůči obvyklým rozpouštědlům a vlhkosti. Je možné ji využívat v teplotním rozsahu od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. PET folie nedisponuje žádným změkčovadlem, proto se nedrolí během stárnutí za obvyklých podmínek. [32]

PEN folie – polyester s výbornými bariérovými vlastnostmi (kvalitnější než PET), především s kyslíkovou bariérou. Svoji houževnatostí a pevností převyšuje typická polymerní vlákna polyamidová a polyesterová. Využívá se jako lacinější náhrada aramidových vláken kupříkladu pro výztuž pneumatik či pro plachty plachetnic. [33]

PEN folie má ve srovnání s PET lepší pevnost, tepelnou odolnost a rozměrovou. Využívá se kupříkladu pro flexibilní obvody v automobilových aplikacích, elektrická izolace a pro optické účely. [34]

Polykarbonát (PC) - amorfní polymer, syntetizovaný prostřednictvím polykondenzace bisfenolu A a fosgenu. Teplotní tání je kolem $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota skelného mezistupně $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je výborným substrátem z pohledu pevnosti, rezistence vůči nárazu a elektroizolačních atributů. Negativem je nedostatečná chemická rezistence. Vzhledem k tomu, že je amorfní, jsou jeho optické vlastnosti mnohem kvalitnější proti krystalickým polymerům, jako je PET. Z těchto důvodů je PC velmi často využíván především v LCD substrátech. Přesto disponuje velkým součinitelem fotoelasticimetrie a mnohdy vykazuje nerovnoměrné zkreslení. [35]

Polyarylát (PAR) - s 50 % podílem kopolymerů disponuje teplotou skelného přechodu $193\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je více tepelně rezistentní než polykarbonát, jenž má analogickou strukturu. Shodně jako polykarbonát, i polyarylát je výborným polymerem z pohledu pevnosti, rezistence vůči nárazu, elektroizolačních atributů, rozměrové stability a rezistenci vůči hoření. [35]

Aromatická polyetherketonová vlákna (PEEK) – Teplota tání je $334\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota skelného mezistupně je $143\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vykazuje nejvyšší teplotní rezistenci mezi aromatickými

polyethery. Jsou velice tvrdá a výborná z pohledu chemické, teplotní rezistence a rezistence vůči hoření. Jsou využívána zejména ve vícevrstvých deskách s plošnými spoji. Jelikož se PEEK řadí mezi termoplasty, lze vyrábět vícevrstvé desky plošného spoje jen prostřednictvím tepelného lisu. [35]

Aromatické polyethersulfony (PES) - vykazuje nejvyšší teplotní rezistenci ($T_g = 223\text{ °C}$) mezi ne-polyamidovými pryskyřicemi. Další atributy jsou též výborné, především rezistence vůči hoření a rozměrová stabilita. S PES je možné se setkat v relativně náročných aplikacích. Shodně jako polykarbonát je tento polymer též amorfní a využívá se v LCD substrátech v kombinaci s výše uvedeným polykarbonátem. Vlivem relativně vysokého součinitele fotoelasticimetrie trpí také nerovnoměrným zkreslením. [35]

3.2.2 Skleněné substráty

Skleněný plát je bezpochyby nejběžněji využívaným substrátem u panelů v zobrazovací technice. Předpokladem, aby skleněný substrát byl flexibilní, je dopracovat se tloušťky pod $100\text{ }\mu\text{m}$.

Výhodami jsou vysoká optická permeabilita větší než 90 %, nízký součinitel tepelné dilatace (ΔCTE) $\sim 4 \cdot 10^{-6}\text{ °C}$, nepropustnost vůči vodě a kyslíku a chemická rezistence. Jedná se též o výborný elektrický izolant a teplotní rezistence je až 600 °C .

K nevýhodám patří křehkost a obtížná manipulace. Pro zlepšení pevnosti a redukci rizika poškození během manipulaci a případného šíření trhlin je možné tyto folie obohatit jedním ze tří postupů:

- Laminací plastovou folií
- Nanesením slabé tvrdé vrstvy
- Nanesením silné polymerní vrstvy. [29]

3.2.3 Flexibilní kovový substrát

I kovové materiály je možné ve flexibilní elektronice využívat jako substráty. Předpokladem pro docílení flexibility kovového substrátu je tloušťka pod $125\text{ }\mu\text{m}$. Zásluhou výborných atributů, jako vysoká rezistence vůči korozi a pronikání chemikálií, rozměrová a teplotní stálost a velká teplotní odolnost ($\sim 1000\text{ °C}$), jsou vhodnými substráty pro emisní či reflexní displeje, které nepotřebují průsvitný substrát.

K nejběžněji používaným kovovým materiálům pro potřeby výzkumu patří nerezová ocel. Obecně je možné nepochybně říci, že nerezové ocelové substráty jsou ve srovnání se skleněnými foliemi a plastovými substráty mnohem odolnější. Avšak jejich negativem je jejich povrchová drsnost, která je u nejdůkladněji válcované oceli kolem 100 nm, oproti skelnému substrátu s povrchovou drsností pod 1 nm.

Kovové substráty disponují elektrickou vodivostí. U některých aplikací musí být kov modifikován pomocí izolační vrstvy na povrchu, aby bylo docíleno galvanické separace, u jiných aplikací může být využit jako kontakt (kupříkladu jako u solárních článků). Elektrická izolace plní funkci adhezivní vrstvy a současně skýtá ochranu před chemikáliemi. Tloušťka bariérové vrstvy o velikosti 0,2 – 0,4 μm je postačující pro elektrickou izolaci, protože redukuje svodový proud při diferencii potenciálu 50 V na 1 nA/cm². [29]

3.2.4 Textilní substrát

Textilie jsou nezbytným prvkem našeho každodenního života. Nejsou ohraničeny jen na oděv z tkaniny, pleteniny a rouna, nýbrž též začleňují technické textilie a kompozitní materiály. Odolávají extrémním tlakům během praní a disponují mnoha různými funkcemi, přičemž je lehká a vysoce flexibilní.

Díky integraci elektronických komponentů mohou být textilie rozšířeny o mnoho různých funkcí, jako jsou senzory a osvětlení. To poskytuje pro textilie zcela nové aplikační oblasti.

Dostupná velká rozmanitost elektronických textilií umožňuje využití v mnoha aplikacích mimo jiné v odvětví módy, medicínského inženýrství, logistiky, ochrany, stavebnictví:

- Senzory integrovány do oblečení jako součást osobních bezpečnostních aplikací,
- Velkoplošné tkaniny s integrovanými senzory pro zabezpečovací systémy,
- Osvětlení a displeje na textiliích,
- Textilní bezdrátové senzory,
- Senzory z kompozitních materiálů vyztužených vlákny pro monitoring stavu,
- Textilní RFID transpondéry pro logistiku,

- Interaktivní večerní šaty a sportovní oblečení,
- Oděvní a textilní doplňky proti krádeži a podvodům,
- Sedadla vozidel obsahující senzory. [36]

3.3 Použití flexibilních RTD

Tlustovrstvé teplotní senzory se využívají jako:

- dotykové teploměry pro bezprostřední měření teploty,
- převodníky během měření jiných fyzikálních či chemických veličin,
- integrované kompenzační prvky elektronických obvodů.
- termistory, odporové teploměry a termočlánky,

Mimo teplotní senzory se využívají pro senzory tlaku, vlhkosti, chemických látek, biosenzory a další. Nabízí se tak možnost na jednom substrátu vyrobit shodnou technologií několik senzorů odlišných fyzikálních a chemických veličin. [27]

4 Komparace dostupných flexibilních RTD

Tato kapitola se zaměřuje na porovnání dostupných flexibilních RTD senzorů a jejich výrobců. Pro prvotní orientaci jsem využil vyhledávací prohlížeč Google, avšak nebyl dostačující a v pozdější fázi jsem využíval i průmyslových vyhledávačů jako je GlobalSpec (IHS Engineering 360) nebo ThomasNET.

Pro vyhledávání specifických senzorů na flexibilním substrátu jsem používal slova jako: flexible RTD, surface RTD, Thin-film RTD, Flexible carrier, adhesive RTD, Kapton RTD. Dále také názvy jednotlivých výrobců.

Do tabulky jsem zavedl produkty, které jsou běžně k dostání od tří největších výrobců s veškerými specifikacemi, které jsem vyčetl z katalogů a datasheetů pro jednotlivé modely a pro konkrétní senzory. Mezi konkrétní specifikace, které jsem vyhledával, byla doba odezvy, cena, TCR, Teplotní rozsah počet přívodních kabelů třídu přesnosti a rezistenci senzoru. Z tabulky, dostupných RTD senzorů je zřejmé, že mezi největší společnosti, které vyrábí běžně dostupné flexibilní senzory, patří firma Minco Products, Int, Omega Engineering a RDF Corporation. Následně jsem udělal přehled senzorů firmy TE Connectivity, u které byly informace pouze k jednotlivým modelům ale ne ke konkrétním senzorům. Dále jsou také společnosti, které vyrábí flexibilní senzory, ale nemají veřejné katalogy nebo datasheety s výstižným popisem jejich produktů. Mezi takové společnosti se řadí Svel sensors a JUMO. Pokusil jsem se jednotlivé společnosti kontaktovat, abych mohl produkty těchto firem uvést do tabulky běžně dostupných RTD pro širší přehled flexibilních senzorů. Bohužel ze strany společností buď odpověď nepřišla vůbec, nebo mi nechtěli poskytnout potřebné informace.

Společnosti vyrábějící RTD senzory na flexibilním substrátu mají dlouhodobou zkušenost s odporovými senzory a prodávají většinou všechny druhy RTD senzorů. Flexibilní senzory uvedených společností jsou nejčastěji na bázi polyamidových a silikonových substrátů s funkční vrstvou tvořenou platinou. Produkty se nejčastěji vyrábí ve třídě tolerance A a B v 100 Ω provedení, méně častěji potom v 1000 Ω provedení. Po kontaktování výrobců by bylo možné vyjednat i 500 Ω senzory. Senzory se používají jako dotykové povrchové senzory velmi často s funkcí přilnout k povrchu. V praxi se používají často pro měření potrubního vedení, měření čipů nebo se zašívají do Smart textilních oděvů a jiných Smart aplikací, kam směřují flexibilní RTD.

Pro představu uvedu tabulku pro několik konkrétních senzorů od každé společnosti z celkového souhrnu:

Tab. 3: Ukázka zpracování souhrnné tabulky uvedené v plném rozsahu v příloze

Typ senzoru	Rezistence a tolerance	Počet kabelů	Délka [in]	Třída přesnosti EN60751	Rozsah [°C]		Cena [Š]	TCR [Ω/Ω/°C]	Nosný materiál	Odporový materiál	Odezva [s]
SA1-RTD	100 Ω ±0.06 @ 0°C	3	40	A	-73	260	57	0,00385	Silikon	Platina	<2
SA2C-RTD-3-100-A-120	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	120	A	-50	200	66	0,00385	Silikonová guma/Al folie	Platina	<2
22810-1-B-36	100 Ω ±0.5 @ 0°C	3	36	B	-200	232	-	0,00385	Teflon®	Platina	0,2
29230-T01-B-40	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	40	B	-200	260	-	0,00385	Kapton®/Teflon®	Platina	0,3
S17624PD XT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
S100820P DYT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	260	64	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
ESS15	100 Ω ±0.3 @ 0°C	2, 3, 4	-	B	-80	180	-	0,00385	Silikon	Platina	0,5

V tabulce první dva senzory jsou od společnosti OMEGA Engineering, kde první senzor je vyráběn jako samolepící folie a druhý je senzor na hliníkové folii potažené silikonovým tělem pro měření nejčastěji nějakého potrubí.

Další dva senzory z tabulky jsou od firmy RDF Corporation. Od této společnosti jsem vybral filmové flexibilní senzory, avšak zajímavostí u druhého senzoru od této společnosti je odporový materiál, který je nanášen na velmi malé keramické tělísko a je zalaminováno do materiálu Kapton®/ Teflon® pro flexibilitu senzoru a dobrého přilnutí k povrchu měřeného materiálu.

Pátý a šestý senzor v tabulce je vyráběn společností Minco Products, Int. Tato společnost vyrábí stejné typové senzory jako OMEGA Engineering. Na rozdíl od dříve zmiňované společnosti, Minco používá u filmových senzorů především polyamidové substráty.

Jako poslední položka v tabulce je pouze model, jelikož nebyl dostatečný popis jednotlivých senzorů. Tato modelová řada je od společnosti Measurement Specialties v dnešní době spadající pod TE Connectivity. Tento typ senzoru je specifický v jeho konstrukci, která je tvořena tzv., flexibilní smyčkou pro měření válcovitých objektů po celém obvodu.

Závěr

Cílem podkladů bylo prostudovat problematiku flexibilních RTD senzorů, flexibilní substráty a provést porovnání dostupných flexibilních RTD senzorů.

Pro měření teploty v průmyslovém prostředí se velmi dobře hodí RTD prvky, jelikož jsou relativně imunní vůči elektrickému rušení. RTD prvky se využívají pro měření teploty v klimatizacích a chlazení, v krbových kamnech a krbech, v potravinářství, v textilní výrobě, při zpracování plastů, v petrochemickém průmyslu, v mikroelektronice a své uplatnění má i v medicíně.

Díky flexibilním substrátům, které se využívají ke konstrukci RTD senzorů, získávají ještě větší šíři využití. Zejména inteligentní textilie skýtají velký potenciál pro měření pomocí RTD senzorů.

Na základě provedeného srovnání dostupných flexibilních RTD senzorů bylo zjištěno, že hlavními kritérii pro volbu RTD senzoru jsou cena, přesnost, rozsah, doba odezvy, provozní prostředí senzoru.

Mezi druhotná kritéria náleží programovatelnost senzorů, automatické vypínání (stand by režim), volba měření °C/°F, forma zpracování naměřených dat (ruční odečet/ přenos do PC), a další.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 4. vyd. Springer New York: Springer Science+Business Media, 2010. ISBN 978-1-4419-6465-6.
- [2] RTD Sensors: *RTD Sensors Introduction to Resistance Temperature Detectors*. Omega [online]. 2017 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.omega.com/prodinfo/rtd.html>
- [3] SENZORY TEPELNÝCH VELIČIN. Measure.fel.cvut.cz [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze - Fakulta elektrotechnická [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/09_teploa%20text%20.pdf
- [4] Teplotní závislost odporu a polovodiče. *Remote-LAB GymKT* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://remote-lab.fyzika.net/experiment/01/experiment-1-teorie.php?lng=cs>
- [5] Resistance Temperature Detector (RTD): *Principle of Operation, Materials, Configuration and Benefits by Innovative Sensor Technology*. [online]. 2010 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5573#5>
- [6] RTD Theory. *Pyromation Inc.* [online]. Pyromation [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: http://www.pyromation.com/Downloads/Doc/Training_RTDT_Theory.pdf
- [7] Odporové snímače teploty. *Sensit.cz* [online]. Rožnov pod Radhoštěm: SENSIT, 2011 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.sensit.cz/sqlcache/prirucka-cz-a5-2012-08.pdf>
- [8] Teorie zpracování signálu platinových teplotních senzorů. *Automatizace.hw.cz* [online]. Antonín Vojáček, 2014 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/zpracovani-signalu-platinovych-senzoru>
- [9] General RTD Information. *JMS* [online]. JMS Southeast, 2007 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.jms-se.com/rtd.php>
- [10] ĎAĎO, Stanislav; KREIDL, Marcel. *Senzory a měřicí obvody*. Vydání první. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1996. 315 s. ISBN 80-01-01500-9
- [11] MAIXNER, Ladislav a kol. *Mechatronika*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2006, 280s. ISBN 80-251-1299-3.
- [12] Platinum Resistance Thermometers (PRT). *Us.fluke.com* [online]. Fluke Corporation [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://us.flukecal.com/literature/articles-and-education/temperature-calibration/papers-articles/platinum-resistance-thermo>

- [13] NOVOTNÝ, Bc. Václav. *Termomechanická spolehlivost pájených propojení v elektronice*. Brno, 2014. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D. [online] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85303
- [14] CeramTec Ceramic Expertise. *CeramTec* [online]. Mnichov: Süddeutscher Verlag, 2015 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: https://www.ceramtec.com/files/no-index/ca_manual_technical_ceramics.pdf
- [15] LTCC. *MuRata* [online]. Murata Manufacturing Co. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.murata.com/products/substrate/ltcc>
- [16] BAYAZEED, Alama. *Pristine carbon nanotubes based resistive temperature sensor* [online]. Delhi, Indie: CSIR-Central Electronics Engineering Research Institute, 2015 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/301311762_Pristine_carbon_nanotubes_based_resistive_temperature_sensor
- [17] ACROMAG, INC. *Criteria for temperature sensor selection of T/C and RTD sensors types: The Basics of Temperature Measurement Using RTDs Part 2 of 3* [online]. Wixom, USA, 2011 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: https://www.acromag.com/sites/default/files/RTD_Temperature_Measurement_917A.pdf
- [18] How to calibrate an RTD or Platinum Resistance Thermometer (PRT). Instrumart.com [online]. Fluke Corporation Hart Scientific Divisio, nedatováno [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <https://www.instrumart.com/assets/Fluke-PRT-Application-Note.pdf>
- [19] PAVELEK, Milan a Josef ŠTĚTINA. *Experimentální metody v technice prostředí*. Dot. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2001. ISBN 80-214-0970-3. Přílohy
- [20] Měření teploty. Omegaeng.cz [online]. Jakar Electronics, nedatováno [cit. 2017-2-26]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/temperaturemeasurement.html>
- [21] MaR zpravodaj. *JSP Měření a regulace* [online]. JSP.cz, 2015 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/files/jsp_mar-zpravodaj_2015-03.pdf
- [22] ŠEDIVÝ, Přemysl. *Teplotní závislosti fyzikálních veličin* [online]. Brno: Gymnázium Brno, 2011 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: https://www.jaroska.cz/fo/_media/archiv/knihovna/teplota.pdf
- [23] Callendar-Van Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers. *Wikapolska* [online]. WIKA, 2008 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: http://www.wikapolska.pl/upload/DS_IN0029_en_co_59667.pdf
- [24] CHILDS, Peter R. N. *Practical temperature measurement*. ButterworthHeinemann, 2001. ISBN 0 7506 5080 X

- [25] Měření teploty. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. Dale Cigoy, Keithley Instruments, 2012 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/mereni/id:7513/mereni-teploty-ale-spravnym-zpusobem>
- [26] Chyby a nejistoty při měření a kalibraci bezkontaktních měřidel teploty. Udrzbapodniku.cz [online]. 2016 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/chyby-a-nejistoty-pri-mereni-a-kalibraci-bezkontaktnich-meridel-teploty/>
- [27] BALOS, Michal. Teplotní senzory realizované technologií tlustých vrstev. *Elektrorevue* [online]. 2002, [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02030/index.html#lit>
- [28] FJELSTAD, Joseph. *Flexible circuit technology*. [2nd ed.]. Sunnyvale, CA: Silicon Valley Publishers Group, c1998, v, 217 p. ISBN 09-667-0750-8.
- [29] WONG, William S a Alberto SALLEO. *Flexible electronics: materials and applications*. [online]. New York: Springer, 2009 [cit. 2017-03-24]. ISBN 978-038-7743-639. Dostupné z: <http://erdinckuruoglu.files.wordpress.com/2011/03/flexible-electronics.pdf>
- [30] KAPTON, *Kapronové polyamidové lepicí pásy, topné a laminovací folie* ELCHEM Co. [online]. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/zbozi/121/kapton-polyimid/>
- [31] Pet Themoplast. *PS* [online]. plasticsystems.cz, 2014 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/PET/>
- [32] Mylar®. *Synflex Elektro GmbH* [online]. Synflex [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.synflex.com/cz/produkte/?id=18&areaid=flaechenisolierstoffe>
- [33] KOŘÍNEK, Zdeněk. Vlákna. In: KOMPOZITY [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [34] Teonex. *PEN Film - Teijin DuPont Films*. [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: http://www.tejindupontfilms.jp/english/product/pen_teo.html
- [35] Printing technology for Flexible Substrates [online]. InterLingua Publishing, 2006 [cit. 2017-03-26]. ISBN 1-884730-46-9. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=MOBBP6tGd8EC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=true>
- [36] KALLMAYER, Christine. Textile-integrated Electronics. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM [online]. 2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: http://www.izm.fraunhofer.de/en/abteilungen/system_integrationinterconnectiontechnologies/arbeitsgebiete/elektronikintegrationinalternativmaterialien/projekte/integration_von_elektronikintextilien.html

Přílohy

Tab. 4: Seznam tří největších výrobců flexibilních RTD senzorů a jejich konkrétní dostupné specifikace jednotlivých senzorů

Výrobce	Model	Typ senzoru	Rezistance a tolerance	Připojení	Délka [in]	Třída přesnosti EN60751	Rozsah [°C]		Cena [\$]	TCR [Ω/Ω/°C]	Nosný materiál	Odporový materiál	Odezva [s]
OMEGA Engineering	SA1	SA1-RTD	100 Ω ±0.06 @ 0°C	3	40	A	-73	260	57	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-80	100 Ω ±0.06 @ 0°C	3	80	A	-73	260	65	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-120	100 Ω ±0.06 @ 0°C	3	120	A	-73	260	72	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-MTP	100 Ω ±0.06 @ 0°C	3	40	A	-73	260	65	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-80-MTP	100 Ω ±0.06 @ 0°C	3	80	A	-73	260	73	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-120-MTP	100 Ω ±0.06 @ 0°C	3	120	A	-73	260	80	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-4W	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	40	A	-73	260	63	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-4W-80	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	80	A	-73	260	71	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-4W-120	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	120	A	-73	260	78	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-4W-TA4F	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	40	A	-73	260	80	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-4W-80-TA4F	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	80	A	-73	260	88	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-4W-120-TA4F	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	120	A	-73	260	97	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	40	B	-73	260	110	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-B-80	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	80	B	-73	260	133	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-B-120	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-73	260	156	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-B-MTP	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	40 s MTP	B	-73	260	133	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-B-80-MTP	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	80 s MTP	B	-73	260	157	0,00385	Silikon	Platina	<2
		SA1-RTD-B-120-MTP	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120 s MTP	B	-73	260	180	0,00385	Silikon	Platina	<2

OMEGA Engineering	SA2C	SA2C-RTD-3-100-A-40	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	40	A	-50	200	60	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2C-RTD-3-100-A-80	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	80	A	-50	200	63	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2C-RTD-3-100-A-120	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	120	A	-50	200	66	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2C-RTD-3-100-B-40	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	40	B	-50	200	52	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2C-RTD-3-100-B-80	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	80	B	-50	200	55	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2C-RTD-3-100-B-120	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	B	-50	200	58	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2C-RTD-3-100-B-240	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	240	B	-50	200	83	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2C-RTD-3-1000-A-40	1000 Ω	4	40	A	-50	200	60	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2C-RTD-3-1000-A-80	1000 Ω	4	80	A	-50	200	63	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
	SA2C-RTD-3-1000-A-120	1000 Ω	4	120	A	-50	200	66	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2	
	SA2F	SA2F-RTD-3-100-A-40	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	40	A	-50	200	60	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2F-RTD-3-100-A-80	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	80	A	-50	200	63	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2F-RTD-3-100-A-120	100 Ω ±0.06 @ 0°C	4	120	A	-50	200	66	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2F-RTD-3-100-B-40	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	40	B	-50	200	52	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2F-RTD-3-100-B-80	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	80	B	-50	200	55	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2F-RTD-3-100-B-120	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	B	-50	200	58	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2F-RTD-3-1000-A-40	1000 Ω	4	40	A	-50	200	60	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
		SA2F-RTD-3-1000-A-80	1000 Ω	4	80	A	-50	200	63	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2
SA2F-RTD-3-1000-A-120		1000 Ω	4	120	A	-50	200	66	0,00385	Silikonová guma/hliníková folie	Platina	<2	

RDF corporation	22810	22810-1-B-36	100 Ω ±0.5 @ 0°C	3	36	B	-200	232	-	0,00385	Teflon®	Platina	0,2
		22810-2-B-36	100 Ω ±0.22 @ 0°C	3	36	B	-200	232	-	0,00385	Teflon®	Platina	0,2
		22810-2-C-36	100 Ω ±0.22 @ 0°C	4	36	B	-200	232	-	0,00385	Teflon®	Platina	0,2
	29222	29222-40	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	40	B	-200	260	-	0,00385	Kapton®/Teflon®	Platina	0,3
	29223	29223-40	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	40	B	-200	260	-	0,00385	Kapton®/Teflon®	Platina	0,3
	29230	29230-T01-B-40	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	40	B	-200	260	-	0,00385	Kapton®/Teflon®	Platina	0,3
		29230-T10-A-40	1000 Ω ±1.2 @ 0°C	2	40	-	-200	260	-	0,00385	Kapton®/Teflon®	Platina	0,3
		29309-T01-C-12	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	12	B	-200	260	-	0,00385	Kapton®/Teflon®	Platina	0,3
		29280-T01-B-40	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	40	B	-200	260	-	0,00385	Kapton®/Teflon®	Platina	0,3
	Minco Products, Int	S100721	S100721PDYT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	55	0,00385	Silikonová guma	Platina
S100721PDYT120B			100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	55	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PDYT36A			100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	48	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PDYT36B			100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	48	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PDZT120A			100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	55	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PDZT120B			100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	55	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PDZT36A			100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	48	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PDZT36B			100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	48	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PFYT120B			1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	55	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PFYT120A			1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	55	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PFYT36A			1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	48	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PFYT36B			1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	48	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PFZT120A			1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	55	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PFZT120B			1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	55	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
S100721PFZT36A			1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	48	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5

Minco Products, Int	S100723	S100721PFZT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	48	0,00385	Silikonová guma	Platina	1,5
		S100723PDYT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PDYT120B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PDYT36A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PDYT36B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PDZT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PDZT120B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PDZT36A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PDZT36B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PFYT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PFYT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PFYT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PFYT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PFZT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
		S100723PFZT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9
	S100723PFZT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9	
	S100723PFZT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,9	
	S100724	S100724PDYT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PDYT120B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PDYT36A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PDYT36B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PDZT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PDZT120B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PDZT36A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PDZT36B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2

Minco Products, Int	S100724	S100724PFYT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PFYT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PFYT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PFYT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PFZT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PFZT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PFZT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
		S100724PFZT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamidový film	Platina	1,2
	S100725	S100725PDYT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	55	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PDYT120B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	55	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PDYT36A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	48	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PDYT36B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	48	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PDZT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	55	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PDZT120B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	55	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PDZT36A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	48	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PDZT36B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	48	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PFYT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	55	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PFYT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	55	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PFYT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	48	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PFYT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	48	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PFZT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	55	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PFZT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	55	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100725PFZT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	48	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6

Minco Products, Int	S100820	S100725PFZT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	48	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,6
		S100820PDYT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	260	64	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PDYT120B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	260	64	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PDYT36A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	260	57	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PDYT36B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	260	57	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PDZT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	260	64	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PDZT120B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	260	64	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PDZT36A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	260	57	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PDZT36B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	260	57	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PFYT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	260	64	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PFYT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	260	64	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PFYT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	260	57	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PFYT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	260	57	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PFZT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	260	64	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PFZT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	260	64	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PFZT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	260	57	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S100820PFZT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	260	57	0,00385	Polyamidový film	Platina	0,4
		S17624	S17624PDXT120A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina
	S17624PDXT120B		100 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
	S17624PDYT120A		100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
	S17624PDYT120B		100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
	S17624PDYT36A		100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
	S17624PDYT36B		100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
	S17624PDZT120A		100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
	S17624PDZT120B		100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1

Minco Products, Int	S17624	S17624PDZT36A	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PDZT36B	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFXT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFXT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFYT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFYT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFYT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFYT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFZT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFZT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFZT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PFZT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSXT120A	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSXT120B	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSYT120A	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSYT120B	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSYT36A	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSYT36B	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSZT120A	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSZT120B	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	43	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSZT36A	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PSZT36B	10000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	36	0,00385	Polyamid	Platina	1
		S17624PWXT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	-	-50	220	46	0,00375	Polyamid	Platina	1
		S17624PWXT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	4	120	-	-50	220	46	0,00375	Polyamid	Platina	1
		S17624PWYT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	46	0,00375	Polyamid	Platina	1
		S17624PWYT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	220	46	0,00375	Polyamid	Platina	1

Minco Products, Int		S17624PWYT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	39	0,00375	Polyamid	Platina	1
		S17624PWYT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	220	39	0,00375	Polyamid	Platina	1
		S17624PWZT120A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	46	0,00375	Polyamid	Platina	1
		S17624PWZT120B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	220	46	0,00375	Polyamid	Platina	1
		S17624PWZT36A	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	220	39	0,00375	Polyamid	Platina	1
		S17624PWZT36B	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	155	39	0,00375	Polyamid	Platina	1
	S665	S665PDY120AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	155	31	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDY120BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	155	31	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDY12AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	12	B	-50	155	22	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDY12BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	12	B	-50	155	22	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDY36AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	155	24	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDY36BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	155	24	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDZ120AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	155	31	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDZ120BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	155	31	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDZ12AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	12	B	-50	155	22	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDZ12BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	12	B	-50	155	22	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDZ36AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	155	24	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PDZ36BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	155	24	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFY120AC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	155	31	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFY120BC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	155	31	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFY12AC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	12	-	-50	155	22	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFY12BC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	12	-	-50	155	22	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFY36AC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	155	24	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFY36BC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	155	24	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFZ120AC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	155	31	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFZ120BC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	155	31	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8

Minco Products, Int		S665PFZ12AC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	12	-	-50	155	22	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFZ12BC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	12	-	-50	155	22	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFZ36AC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	155	24	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
		S665PFZ36BC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	155	24	0,00385	Polyamid/Elastomer	Platina	0,8
	S667	S667PDY120AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	155	31	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDY120BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	B	-50	155	31	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDY12AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	12	B	-50	155	22	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDY12BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	12	B	-50	155	22	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDY36AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	155	24	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDY36BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	2	36	B	-50	155	24	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDZ120AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	155	31	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDZ120BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	120	B	-50	155	31	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDZ12AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	12	B	-50	155	22	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDZ12BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	12	B	-50	155	22	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDZ36AC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	155	24	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PDZ36BC	100 Ω ±0.12 @ 0°C	3	36	B	-50	155	24	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PFY120AC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	155	31	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PFY120BC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	120	-	-50	155	31	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PFY12AC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	12	-	-50	155	22	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
		S667PFY12BC	1000 Ω ±0.12 @ 0°C	2	12	-	-50	155	22	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3

S667	S667PFY36AC	1000 Ω \pm 0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	155	24	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
	S667PFY36BC	1000 Ω \pm 0.12 @ 0°C	2	36	-	-50	155	24	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
	S667PFZ120AC	1000 Ω \pm 0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	155	31	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
	S667PFZ120BC	1000 Ω \pm 0.12 @ 0°C	3	120	-	-50	155	31	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
	S667PFZ12AC	1000 Ω \pm 0.12 @ 0°C	3	12	-	-50	155	22	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
	S667PFZ12BC	1000 Ω \pm 0.12 @ 0°C	3	12	-	-50	155	22	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
	S667PFZ36AC	1000 Ω \pm 0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	155	24	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3
	S667PFZ36BC	1000 Ω \pm 0.12 @ 0°C	3	36	-	-50	155	24	0,00385	Silikonová guma/Elastomer	Platina	1,3