

Návrh a realizace experimentální úlohy na dotykové měření teploty

Design and implementation of experimental exercise for contact
temperature measurement

Michal Zajíc

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal ZAJÍC**
Osobní číslo: **A10256**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh a realizace experimentální úlohy na dotykové měření teploty**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor vybraných senzorů určených na měření teploty dotykovým způsobem.
2. Navrhněte experimentální úlohu pro výukové účely s využitím vybraných senzorů.
3. Realizujte a ověřte funkčnost experimentální úlohy.
4. Navrhněte vhodné zadání měření s vytvořenou úlohou.
5. Vypracujte vzorový protokol z měření.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. HRUŠKA, František. **Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití (e-book)**. 2. rozš. vyd. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, [202] s. ISBN 978-80-7454-096-7.
2. KREIDL, Marcel. **Měření teploty: senzory a měřicí obvody**. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 239 s. ISBN 8073001454.
3. SENSIT: **snímače teploty, Pt 100, sondy, převodníky, digitální teploměry** [online]. 2010 [cit. 2013-02-06]. Dostupné z: <http://www.sensit.cz/>
4. MARTINEK, Radislav. **Senzory v průmyslové praxi**. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2004, 199 s. ISBN 8073001144.
5. ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. **Senzory a měřicí obvody**. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1999, 315 s., 351 obr. ISBN 800102057.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Skočík

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

30. května 2013

Ve Zlíně dne 25. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou a praktickou ukázkou senzorů na dotykové měření teploty. V úvodu teoretické části práce jsou zmíněny základní pojmy týkající se dané problematiky. Dále jsou zde popsány jednotlivé typy senzorů a jejich principy, na kterých pracují. Praktická část práce je pak zaměřena na návrh, realizaci a ověření správné funkčnosti experimentální úlohy, určené pro výukové účely předmětu Sensory. Část práce je také věnována výběru vhodných senzorů teploty a konstrukčním prvkům úlohy. Samotné ověření realizované úlohy bylo provedeno měřením základních statických charakteristik vybraných senzorů. Měření je zpracováno do vzorového protokolu vytvořeného na základě požadavků kladených laboratoří daného předmětu. Součástí praktického výstupu práce je také příloha obsahující návrh zadání k měření vzniklé laboratorní úlohy.

Klíčová slova: měření teploty, senzory, termistor, termočlánek

ABSTRACT

This work deals with a practical demonstration of the sensors for contact measuring temperature. In the beginning of the theoretical part of the thesis are discussed basic concepts related to the issue. It further describes the various types of sensors and their principles on which they work. The practical part is focused on the design, implementation and verification of appropriate functionality of experimental exercise designed for educational purposes of subject Sensors. Part of the work is devoted to the selection of suitable temperature sensors and structural elements of the work. The actual verification task was carried out by measuring the basic static characteristics of selected sensors. Measurement is processed into a standard protocol created on the base of the requirements imposed laboratories of the subject. The practical outcome of this work is also a list containing the instruction resulting measurement laboratory exercise.

Keywords: temperature measurement, sensors, thermistors, thermocouples

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Skočíkovi za jeho odborné vedení, rady a připomínky.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TEPLOTA A TEPLOTNÍ STUPNICE	11
1.1 TEPLOTA	11
1.2 TEPLOTNÍ STUPNICE	11
2 MĚŘENÍ TEPLoty	15
2.1 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	16
2.2 DOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	18
3 ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty	20
3.1 KOVOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty	20
3.1.1 Platinové odporové senzory teploty	20
3.1.2 Niklové odporové senzory teploty	22
3.1.3 Měděné odporové senzory teploty	22
3.1.4 Ostatní kovové odporové senzory teploty	23
4 POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty	24
4.1 TERMISTORY	24
4.1.1 NTC termistory - negistory	25
4.1.2 PTC termistory - pozistory	25
4.2 MONOKRYSTALICKÉ POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty	26
4.2.1 Monokrystalické křemíkové senzory teploty	26
5 MONOLITICKÉ SENZORY TEPLoty S PN PŘECHODEM	28
5.1 POLOVODIČOVÉ PN DIODY PRO MĚŘENÍ TEPLoty	29
5.2 TRANZISTORY PRO MĚŘENÍ TEPLoty	29
5.3 INTEGROVANÉ PN SENZORY PRO MĚŘENÍ TEPLoty	30
6 TERMOELEKTRICKÉ ČLÁNKY	31
6.1 SEEBECKŮV JEV.....	31
6.2 TYPY TERMOELEKTRICKÝCH ČLÁNKŮ	32
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
7 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI	35
8 VÝBĚR VHODNÝCH SENZORŮ NA MĚŘENÍ TEPLoty DOTYKOVÝM ZPŮSOBEM	36
8.1 NTC TERMISTOR EPCOS	37
8.2 PTC TERMISTOR NXP	38
8.3 TERMOČLÁNKY GUENTHER.....	40
8.4 PLATINOVÉ ODPOROVÉ SENZORY	42
9 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY	44
10 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY	47
11 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	51
ZÁVĚR	55
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	56

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	57
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	59
SEZNAM OBRÁZKŮ	60
SEZNAM TABULEK.....	61
SEZNAM PŘÍLOH.....	62

ÚVOD

Teplota patří v dnešní době mezi jednu z nejvíce měřených veličin. Měření teploty má svou významnou roli jak v průmyslu, tak i v domácnostech. Mnohdy si to možná ani neuvědomujeme, ale měření teploty se využívá všude kolem nás. Vezměme si například rodinný dům. Určitě ve většině rodinných domů je zařízení, které slouží k měření teploty, ať už se jedná o teploměry pro měření tělesné teploty nebo termostaty pro řízení vytápění a další. Většinou se jedná o malá zařízení, bez kterých bychom si pomalu ani nedovedli život představit. Je tomu tak i při využívání v průmyslu, kde je měření teploty často nezbytnou součástí. Například při technologických procesech, kdy je potřeba hlídat přesně stanovenou teplotu, nebo tak i při zacházení se samotnými stroji pro výrobu. Při nedodržení správné provozní teploty by u většiny strojů mohlo dojít k jejich poruše nebo dokonce zničení, což je nežádoucí. Další možné využití senzorů teploty se naskýtá v průmyslu komerční bezpečnosti, kde se senzory nachází např. v teplotních hlásičích, které bývají v kombinaci s hlásičem kouřovým. Tyto hlásiče se využívají pro rozšíření poplachového zabezpečovacího systému. K měření teploty se může využívat jak senzorů mechanických, tak elektrických. V případě mechanických senzorů se jedná o dilatační teploměry. Jedná se o teploměry založené na objemové nebo délkové roztažnosti látek. K samotnému měření se v případě elektrických zařízení využívá elektrických senzorů teploty. Senzorů teploty je nepřehledné množství pracujících na různých principech. Ať už se jedná třeba o elektrické odporové senzory nebo termoelektrické články. V případě použitých principů se senzory liší hlavně ve výstupním signálu, kde se jedná o odpor nebo napětí. Výrobou senzorů teploty se v dnešní době zabývá spousta firem, které vyrábějí senzory v mnoha různých tvarových provedeních. Výše popsané senzory se týkají spíše dotykového měření teploty. Samotné měření se ale může provádět i bezdotykovým způsobem, což sebou přináší další výhody. Bezdotykové měření umožňuje měřit teplotu z bezpečných vzdáleností, nebo na rychle se pohybujících předmětech a dalších. Bezdotykové měření má samozřejmě i své nevýhody. Ty se většinou týkají nejistoty měření způsobenou neznalostí např. správné emisivity tělesa atd.

Níže uvedená práce se zabývá dotykovým způsobem měření teploty využívající principu elektrických senzorů teploty, návrhem a realizací experimentální úlohy s využitím příslušných senzorů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEPLOTA A TEPLOTNÍ STUPNICE

1.1 Teplota

Teplota je fyzikální veličina, která určuje stav termodynamické rovnováhy. Přičemž jako termodynamická rovnováha je brán stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, kterými je stav soustavy popsán nezávisí na čase. Jako termodynamická teplota je brána charakteristika tohoto stavu termodynamické rovnováhy a ta musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Fyzikální veličina teplota se nesmí zaměňovat za fyzikální veličinu teplo. Protože teplo je forma energie, která souvisí s pohybem částic dané soustavy těles. Teplotu nemůžeme měřit přímo, ale její měření musí probíhat prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Z toho plyne, že měření teploty je měření nepřímé [2].

1.2 Teplotní stupnice

Jak už bylo zmíněno dříve, teplota je termodynamická stavová veličina. Tato veličina je definována na základě vratného Carnotova cyklu. Princip Carnotova cyklu je založen na změnách skupenství. Jedná se o jakoukoli látku, která může měnit své skupenství z kapalného na plynné a naopak. Teplota, kdy jednotlivá látka přechází z kapalného skupenství na plynné a zpět, se u jednotlivých látek liší. Na těchto teplotách je závislá účinnost vratných Carnotových cyklů, které pracují mezi stejnými lázněmi určitých teplot a přičemž je účinnost nezávislá na teploměrné látce, která je použita [3]. Poté platí vztah, dle [3]:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} [-] \quad (1)$$

kde

η je účinnost cyklu [-]

Q_2 je odebrané teplo [J] teploměrovou látkou z lázně s teplotou T_2 [K]

Q_1 je odevzdané teplo [J] teploměrovou látkou do lázně s teplotou T_1 [K]

Ze vztahu 1 poté vyplívá, dle [3]:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2)$$

Ideální tepelný stroj, který by pracoval na principu vratného Carnotova cyklu, nelze sestavit. Jako teploměrná látka může být dokonalý plyn. Pro tento plyn platí následující vztah, který je v souladu s Carnotovým cyklem. Tento vztah se nazývá termodynamická teplota, dle [3]:

$$pV = R_m T \quad (3)$$

kde

R_m je molární plynová konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$]

V je objem plynu [m^3]

T je teplota plynu [K]

Kelvinova teplotní stupnice

Tato teplotní stupnice je pojmenována po britském matematikovi a fyzikovi Williamu Thomsovi Kelvinovi. Termodynamická teplotní stupnice, jak se také nazývá Kelvinova teplotní stupnice, patří mezi absolutní teplotní stupnice. To znamená, že počátek stupnice je v absolutní nule. Jako další bod stupnice je definována teplota trojného bodu vody, což je rovnovážný stav tří skupenství vody. Jednotlivé skupenství jsou led, voda a sytá pára. Tento trojný bod vody má hodnotu 273,16 K. Jeden Kelvin je tedy 273,16tý díl termodynamické teploty trojného bodu vody [4].

Celsiova teplotní stupnice

Anders Celsius navrhl roku 1736 teplotní stupnici, které je pojmenována jako Celsiova teplotní stupnice. Ten zvolil jako základní body teplotní stupnice teplotu 100°C pro teplotu rovnovážného stavu vody a jejího ledu a teplotu 0°C pro teplotu rovnovážného stavu vody a její syté páry. Tyto teploty jsou brány při normálním atmosférickém tlaku, který je 1013,25hPa. Tato teplotní stupnice je mezi těmito základními body rozdělena na 100 stejných dílů, z nichž jeden díl představuje jeden °C. To ale ještě nebyla podoba teplotní stupnice, jak ji známe dnes. V roce 1739 Carl von Linne tuto teplotní stupnici obrátil

a v této podobě ji známe a používáme dodnes. Tato stupnice je ve světě nejpoužívanější [4].

Fahrenheitova teplotní stupnice

Roku 1724 navrhl tuto teplotní stupnici německý fyzik Daniel Gabriel Fahrenheit. Jako základní body zvolil teplotu zdravého lidského těla, která odpovídá teplotě 96°F a teplotu směsi vody, ledu a chloridu amonného (salmiaku). O této teplotě se domníval, že je to nejnižší teplota, kterou lze uměle vyrobit. Při porovnání s Celsiovou stupnicí platí pro nulovou teplotu $0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$. Tato stupnice není tolik používaná jako stupnice Celsiova. Dříve se využívala i v Evropě, ale v dnešní době se používá většinou v Americe [4].

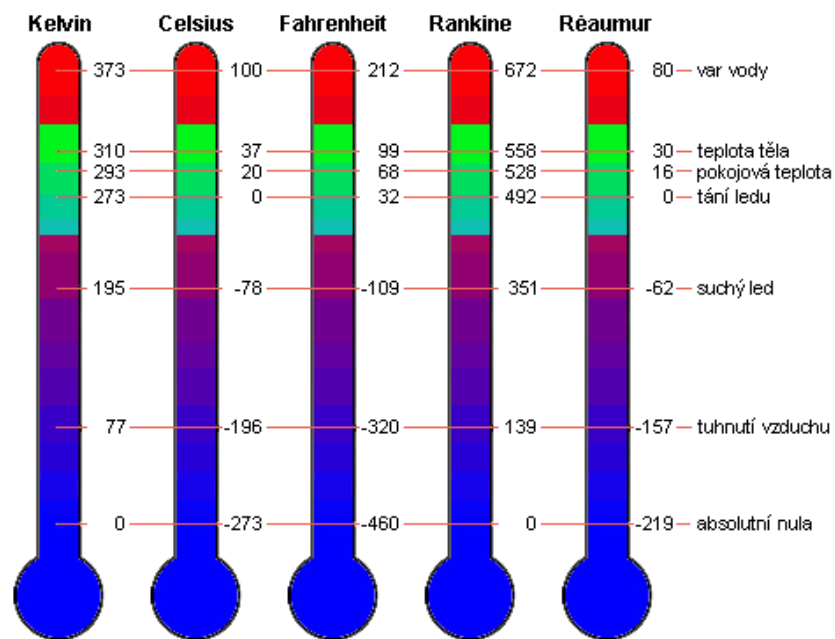
Rankinova teplotní stupnice

Po skotském inženýrovi Williamu Johnu Macquomu Rankinovi je pojmenována tato teplotní stupnice. Teplotní stupnice má stejný jednotkový interval jako Fahrenheitova teplotní stupnice. Na rozdíl od Fahrenheitovy teplotní stupnice má ale počátek v absolutní nule, tj. $0^{\circ}\text{R} = 0\text{K} = -273,15^{\circ}\text{C}$ [4].

Réaumurova teplotní stupnice

Roku 1730 navrhl francouzský přírodovědec René Antoine Ferchault de Réaumur tuto teplotní stupnici. Jako jeden bod stupnice zvolil stejný bod jako v případě Celsiovy teplotní stupnice. Jednalo se o nulovou teplotu, a tedy platilo, že $0^{\circ}\text{R} = 0^{\circ}\text{C} = 273,15\text{K}$. Na rozdíl od Celsiovy teplotní stupnice je tato stupnice dělena na 80 dílů, z nichž jeden díl určuje jeden $^{\circ}\text{R}$. Těchto 80 dílů bylo rozděleno mezi interval teploty tání ledu a teploty varu vody. Tudíž tedy platilo, že $80^{\circ}\text{R} = 100^{\circ}\text{C} = 373,15\text{K}$. Srovnání jednotlivých teplotních stupnic je nejlépe vidět na obrázku 1 [4].

V dnešní době se při měření teploty nejvíce využívá Celsiovy a Fahrenheitovy teplotní stupnice. Fahrenheitova teplotní stupnice se využívá převážně v Americe. Nejrozšířenější teplotní stupnice ve světě je Celsiova teplotní stupnice, kterou využíváme i v České republice.



Obrázek 1: Srovnání teplotních stupnic [4]

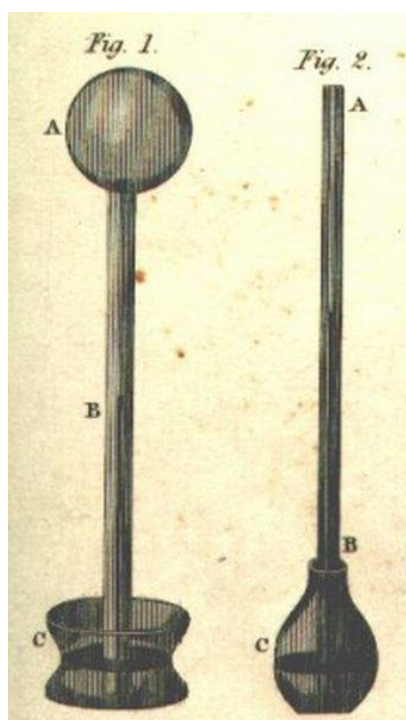
Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90

Z důvodu náročnosti plynové termometrie, což je nejpřesnější metrologická metoda, byla v roce 1927 stanovena Mezinárodní praktická teplotní stupnice. Později byla tato stupnice generálními konferencemi pro míry a váhy postupně upravována a doplňována až do současné podoby z roku 1990. ITS-90 stanovuje 17 pevně definovaných teplotních bodů. Zkratka ITS-90 vyplývá z anglických slov The International Temperatour Scale of 1990 [2].

2 MĚŘENÍ TEPLoty

Potřebu určovat teplotu měli lidé již před několika staletími. V té době se teplota určovala podle tělesných pocitů. Například při výrobě kovů se lidé řídili barvou rozžhaveného kovu. Stejným principem se řídili i u výroby keramiky.

Héron Alexandrijský byl pravděpodobně autorem nejstaršího teploměru. Toto zařízení pocházelo ze starověku a pracovalo na principu roztažnosti vzduchu. Později bylo nazýváno vzduchovým termoskopem. Později sestrojili Galileo Galilei se svými žáky známější vzduchový termoskop, který pracoval na stejném principu tepelné roztažnosti vzduchu. Tento vzduchový termoskop byl tvořen tenkou skleněnou trubičkou, která byla asi 30 cm dlouhá a byla zakončená baňkou. Realizace vzduchového termoskopu lze vidět na obrázku 2. Princip termoskopu spočíval v tom, že skleněná baňka se v ruku zahřála a otevřený konec skleněné trubičky byl ponořen do nádoby s obarvenou vodou. Při chladnutí baňky vzduch uvnitř začal zmenšovat svůj objem a vlivem okolního tlaku, který působil na hladinu vody, začala voda z nádoby vnikat do trubičky. Jakmile baňka vychladla a přijímala teplotu okolí, se výška vodní hladiny v trubičce měnila podle teploty okolí, která měnila objem vzduchu v baňce. Tento vzduchový termoskop ještě neměl teplotní stupnici a na rozdíl od dnešních teploměrů výška hladiny stoupala při ochlazení okolního vzduchu a naopak [1].



Obrázek 2: Vzduchový termoskop [1]

Vzduchový termoskop, který vynalezl Galileo Galilei, vylepšil později Otto von Guericke. Jeho vylepšení spočívalo v tom, že použil U-trubičku, ve které uzavřel vzduch za pomoci sloupce obarveného lihu. Jedno rameno trubičky bylo otevřeno a na lihový sloupec mohl působit atmosférický tlak. Ve stejném století, kdy byli objeveny vzduchové termoskopy, se začínaly objevovat teploměry, ve kterých jako teploměrná látka byla použita voda. Roku 1631 byl sestrojen zřejmě první teploměr tohoto typu, jehož autorem byl francouzský lékař Jean Rey, který jako teploměrnou látku použil vodu. Nevýhodou byla malá roztažnost vody, a proto se museli hledat jiné, vhodnější tekutiny. Jako jedny z nejvhodnějších tekutin se ukázaly líh a rtuť. V roce 1641 sestrojil toskánský velkovévoda Ferdinand II. první lihový teploměr. V této době se už na teploměrech začaly objevovat stupnice, avšak nejednalo se o stupnice jednotné, které znemožňovali porovnání teplot mezi jednotlivými teploměry. Až kolem roku 1650 se začaly objevovat teploměry s jednotnou stupnicí [1].

Stanovením jednotné stupnice bylo nutné taky stanovit její počátek. V roce 1664 stanovil anglický fyzik Robert Boyle u svého teploměru jako základní bod stupnice teplotu tajícího ledu. O rok později stanovil holandský vědec Christian Huygens další bod stupnice a to bod varu vody. Jednalo se o bod varu při normálním tlaku ovzduší, neboť při klesajícím tlaku klesá také bod varu vody. Poté Huygens navrhl, aby se jako počáteční bod stupnice použila buď teplota tání ledu nebo teplota varu vody [1].

V dnešní době se k měření teploty využívá dvou různých způsobů, tj. dotykový a bezdotykový. V případě bezdotykového měření nemusí být teploměr v přímém kontaktu s měřeným tělesem. U dotykového způsobu musí být senzor teploty v přímém kontaktu s měřeným tělesem. Následující práce je prioritně zaměřená na senzory dotykového měření teploty.

2.1 Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření teploty se využívá k měření teploty v případech, kdy není možné nebo je dokonce nebezpečné provést měření za pomoci dotykového měření. Můžeme tedy říct, že měření teploty se provádí z bezpečné vzdálenosti. Provádí se většinou u předmětů s vysokou teplotou, ke kterým je nebezpečné se přiblížit kvůli vysoké teplotě nebo např. k měření teploty čerstvě nalakovaných předmětů, kde by dotykové měření poškodilo čerstvý lak a mnoho dalších způsobů využití bezdotykového měření. Pomocí bezdotykového měření lze také provádět měření teploty na rychle se pohybujících nebo rotujících předmětech, kam není možné připevnit dotykový teploměr.

Bezdotykové měření teploty, je způsob měření povrchové teploty těles na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem, které přijme senzor bezdotykového teploměru. Toto elektromagnetické záření se pohybuje v rozmezí od 0,4 μm do 25 μm vlnové délky. Přičemž záření s vlnovou délkou od 2 μm do 25 μm se označuje jako tepelné záření. Tyto rozsahy elektromagnetického záření slouží k měření teplot od -40°C do $+10000^{\circ}\text{C}$ [2].

Základní dvě skupiny senzorů pro bezdotykové měření teploty se dělí na tepelné a kvantové. U tepelných senzorů dochází k pohlcování fotonů a při tom dochází k oteplení citlivé části senzoru. Tato skupina se dále dělí na senzory termoelektrické, bolometrické a pyroelektrické. Kvantové senzory pracují na fyzikálním jevu, při kterém při vzájemném působení dopadajících fotonů dochází ke generaci párů elektron - díra. Kvantové senzory jsou senzory polovodičové a na základě použitého polovodiče se dále dělí na senzory intrinsické a extrinsické. K výrobě intrinsických senzorů se využívá vlastního polovodiče a pro výrobu extrinsických senzorů se využívá PN struktury nevlastních polovodičů [2].

Výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty

Mezi výhody měření teploty bezdotykovým způsobem patří zejména:

- možnost měření teploty z bezpečné vzdálenosti
- možnost měření teploty na rychle se pohybujících nebo rotujících předmětech
- možnost měření velmi rychlých změn teploty
- možnost měření a následného číslicového zpracování teploty celých povrchů těles

Bezdotykové měření teploty má ale i své nevýhody. Jedny z nevýhod jsou:

- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty prostupnosti prostředí mezi senzorem a objektem
- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa
- nejistoty měření způsobené nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt [2].

2.2 Dotykové měření teploty

Při měření teploty dotykovým způsobem je nutné, aby senzor teploty byl v přímém kontaktu s měřeným tělesem. K tomuto měření se využívá senzorů, které pracují na principu změny odporu v závislosti na teplotě nebo na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. U prvního zmíněného principu se jedná o odporové senzory teploty, které se dále dělí na kovové a polovodičové odporové senzory. Senzory, pracující na druhém zmíněném principu, se nazývají PN senzory a dělí se na diodové, tranzistorové a integrované PN senzory. Dále se ještě může jednat o termočlánky, které pracují na Seebeckově jevu. Seebeckův jev je převod tepelné energie na energii elektrickou. Jednotlivými druhy dotykových senzorů se budu podrobněji zabývat později, neboť se jedná o téma mé bakalářské práce.

Dalším možným způsobem dotykového měření teploty jsou dilatační teploměry. U těchto teploměrů je charakteristickým parametrem objemová nebo délková roztažnost. To závisí na druhu použitého měřicího materiálu. Pro měření se využívá plyných, kapalných a pevných látek. U plyných a kapalných látek se využívá objemové roztažnosti a u pevných látek se využívá délkové roztažnosti [6].

U kapalinových dilatačních teploměrů využívá jako měřicí materiál rtuť, etylalkohol, toluen a další. Použitý materiál ovlivňuje teplotní rozsah teploměru, např. u rtuťového dilatačního teploměru je teplotní rozsah od -3°C do 300°C . Součástí teploměru je teplotní stupnice vyrábí se v provedení např. stonkové, tyčinkové a jiné [6].

Dalšími dilatačními teploměry jsou kovové dilatační teploměry. V tomto případě se jako měřicí materiál používá kov a tyto teploměry pracují na délkové roztažnosti použitých kovů. Jako měřicí materiál se využívá hliník, nikl, ocel, zinek nebo mosaz, které jsou uloženy do obalu ze skla, porcelánu nebo invaru. Kovové dilatační teploměry můžeme použít pro měření teplot od -30°C až do 1000°C [6].

Kovové dilatační teploměry se dále vyrábějí s dvojkovým (bimetalovým) páskem. Tyto bimetalové teploměry využívají pásku, který je tvořen dvěma různými kovy, z nichž každý má jinou teplotní roztažnost. Při zvýšení teploty se začne bimetalový pásek prohýbat na stranu, kde je umístěn kov s menší roztažností. Tyto teploměry se využívají pro měření teploty v rozsahu od -40°C až do 500°C [6].

Pro měření teploty lze také využít tlakové teploměry. Tyto tlakové teploměry pracují na principu převodu objemové nebo délkové roztažnosti na změnu tlaku v deformačním členu. Pokud dojde ke zvětšení objemu nebo délky měřícího materiálu, dojde k působení materiálu na deformační člen a tím i ke zvětšení tlaku. Deformační člen je poté spojen se stupnicí [6].

3 ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty

Odporové senzory teploty pracují na fyzikálním principu, který popisuje závislost elektrického odporu kovů nebo polovodičů na teplotě. Změna odporu senzoru je ovlivňována teplotou okolí, jemuž je senzor vystaven. Při vystavení senzoru teplotě, se tato veličina přenáší do materiálu senzoru a tím se mění jeho odpor. Senzory jsou vyráběny nejčastěji z kovových nebo polovodičových materiálů, přičemž tento materiál musí být chemicky i fyzikálně stálý, aby byla zajištěna správná funkce senzoru.

Jev změny odporu v závislosti na teplotě využívá argumentu, že při zvyšující se teplotě se zvětšuje amplituda termických kmitů krystalové mřížky materiálu a zvětšuje se pravděpodobnost srážek elektronů a iontů. Tím se zkracuje volná dráha elektronů a doba zrychlování částic elektrickým polem [5].

3.1 Kovové odporové senzory teploty

Kovové odporové senzory pracují na principu změny odporu kovu v závislosti na teplotě. V krystalové mřížce kovu jsou obsaženy kladné ionty a chaoticky se pohybující elektrony. Toto poté ovlivňuje odpor kovu. K výrobě se používají nejčastěji čisté kovy. Tyto kovy musí mít konstantní teplotní součinitel v čase, nulovou hysterezi a vysoký měrný odpor. Jako nejčastější materiály se využívají měď, nikl, platina, slitiny stříbra a zlata a jiné kovy, které splňují dané podmínky [5].

3.1.1 Platinové odporové senzory teploty

Jako jeden z materiálů na výrobu odporových senzorů teploty se využívá platina, která se vyznačuje časovou stálostí, chemickou netečností a také vysokou teplotou tání. Platinové senzory jsou vyrobeny buď z platinového drátu, který má průměr 0,045mm, nebo z platinové folie, která je umístěna na keramické podložce. U drátových senzorů je pak vinutí jednoduché nebo dvojité. Senzory se vyrábějí se dvěma nebo čtyřmi vývody a tvar senzorů je buď plochý nebo válcovitý. Na výrobu obalů a nosných destiček senzorů se používá keramika, sklo, slída nebo umělá hmota. Dále se senzory vyrábějí metodou napařování kovu na podložku. Při tomto způsobu se využívá buď tenkovrstvé nebo tlustovrstvé technologie. Vrstva kovu se nanese na nosnou podložku a následně se vyhodnocuje změna odporu této vrstvy [3], [5],[13].

Při výrobě se musí využívat platina se správnou čistotou. Čistota je určena normou a předepisuje poměr elektrického odporu $W_{100} = 1,385$. Platina, která se využívá pro metrologické účely, musí mít čistotu 99,999%. Pro posouzení čistoty kovu se vyhodnocuje poměr odporů při teplotě tání galia a trojného bodu vody.

Platinové odporové senzory teploty pro průmyslové použití se dělí do dvou tolerančních tříd. Senzory jsou rozděleny do toleranční třídy A a B na základě standartu IEC-751. Toleranční třída A stanovuje rozsah teploty od -200°C do 650°C a toleranční třída B je pro rozsah teploty od -200°C do 850°C . Vyrábějí se také senzory, které nesplňují rozsah tolerančních tříd dle IEC-751 a ty jsou nazývány vysokoteplotními senzory a jejich rozsah teploty sahá až do 1100°C [2]. Výpočet teplotní závislosti měřícího odporu pro rozsah teploty od -200°C do 0°C je dán vztahem, dle [2]:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)] [\Omega] \quad (4)$$

kde

R_0 je odpor [Ω] při 0°C

t je teplota [$^{\circ}\text{C}$]

$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

$B = -5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$

$C = -4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$ pro $t < 0^{\circ}\text{C}$

Dále pro výpočet pro rozsah teploty od 0°C do 850°C platí vztah, dle [2]:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) [\Omega] \quad (5)$$

Platinové odporové senzory se vyrábějí s různou hodnotou odporu při teplotě 0°C . Hodnota odporu R_0 může být 50, 100, 200, 500, 1000 a 2000 Ω , ale už jsou i senzory s hodnotou odporu 10 000 Ω .

3.1.2 Niklové odporové senzory teploty

Nikl patří mezi významný kov pro výrobu odporových senzorů teploty. Senzory se vyrábějí pro rozsah měření teploty od -60°C do 150°C . Krátkodobě lze měřit teploty dosahující hodnoty 180°C , ale při teplotách nad 300°C dochází na senzoru ke strukturním nezvratným změnám a tudíž ke zničení senzoru. Využití niklu v senzorech je hlavně z důvodu, že je levnější než platina. Tyto senzory teploty se nejčastěji vyrábějí tenkovrstvou technologií, která spočívá v napařování tenké vrstvy kovu na nosnou destičku. Mezi výhody niklových senzorů teploty patří rychlá odezva, velká citlivost a malé rozměry. Niklové senzory mají ale i své nevýhody a těmi jsou zejména malý teplotní rozsah oproti platině, horší dlouhodobá stabilita a nelinearita. Další nevýhodou niklových senzorů teploty je špatná odolnost vůči prostředí, protože nikl je napadán čpavkem a kyselinami. Niklové senzory teploty se vyrábějí s několika základními hodnotami odporu R_0 při teplotě 0°C . Jako základní hodnota je brán odpor $100\ \Omega$, ale vyrábějí se i senzory s hodnotou odporu 200, 500, 1000 a $2000\ \Omega$ [2],[5],[13]. Výpočet teplotní závislosti měřicího odporu je dán vztahem, dle [2]:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^4 + Dt^6) [\Omega] \quad (6)$$

kde

R_0 je odpor [Ω] při 0°C

t je teplota [$^{\circ}\text{C}$]

$A = 5,485 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$

$B = 6,65 \cdot 10^{-6}\ \text{K}^{-2}$

$C = 2,805 \cdot 10^{-11}\ \text{K}^{-4}$

$D = 2,0 \cdot 10^{-17}\ \text{K}^{-6}$

3.1.3 Měděné odporové senzory teploty

Měděné odporové senzory teploty jsou prakticky využitelné pro měření teploty v rozsahu od -200°C do 200°C . Měď jako kov má malý měrný odpor a velkou citlivost na reakci se vzduchem, čímž dochází k oxidaci kovu. Kvůli těmto nevýhodám se měděné odporové

senzory běžně nevyrábějí, ale měď se dá jako měrný materiál využít. Zejména se jí může využívat při měření teploty vinutí elektromotoru, kde se na vinutích při odpojeném napájení, měří odpor a z něj se následně určuje teplota [2],[5]. Výpočet teplotní závislosti měřicího odporu v rozsahu od -50°C do 200°C je dán vztahem, dle [5]:

$$R_t = R_0(1 + At) [\Omega] \quad (7)$$

kde

R_0 je odpor [Ω] při 0°C

t je teplota [$^{\circ}\text{C}$]

$A = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

3.1.4 Ostatní kovové odporové senzory teploty

Mimo základních kovů, které jsou používány k výrobě senzorů teploty, jako je platina a nikl se využívá i dalších kovů. Jako jeden z novějších kovů pro výrobu senzorů se využívá molybden. Jeho výhodou je malá roztažnost vůči keramickým podložkám a dobrá linearita. K výrobě se využívá moderní technologie a jako povrchová úprava je použitý barevný polymer. Využívají se pro teplotní rozsah od -200°C do 200°C . Jako další kovy se výjimečně využívá stříbro a zlato. Senzory v provedení se stříbrem se využívají do teploty 200°C a v provedení se zlatem do teploty 400°C . Dále se jako náhrada za platinu využívá slitiny zlata a stříbra, přičemž tato slitina vykazuje stejnou závislost změny odporu do 120°C jako platina [5].

Jako další materiály, které lze využít, se naskytují tzv. pevné elektrolyty. Mezi pevné elektrolyty patří např. bromid kademnatý a jodid kademnatý. Tyto pevné elektrolyty mají zajímavou vlastnost a tou je skoková změna odporu při změně teploty v určitém rozsahu. Tyto materiály je možné využít k výrobě limitních senzorů teploty [5].

4 POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty

Polovodičové odporové senzory teploty jsou další senzory pro měření teploty. Pracují na stejném principu změny odporu v závislosti na teplotě. Na rozdíl od kovových odporových senzorů se neměří změna odporu kovu ale polovodiče. Pro polovodiče je důležitý jev, který popisuje teplotní závislost koncentrace nosiče náboje. Tento polovodičový jev lze přibližně vyjádřit vztahem, dle [5]:

$$n \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} [-] \quad (8)$$

kde:

n je počet elektronů v jednotkovém objemu [-]

E je rozdíl mezi energetickými hladinami mřížky

k je Boltzmannova konstanta [$J \cdot K^{-1}$]

T je teplota [K]

Odporové polovodičové senzory teploty se v závislosti na použitém materiálu dělí do dvou skupin senzorů a těmi jsou:

- polykrystalické senzory
- monokrystalické senzory

4.1 Termistory

Termistory jsou polovodičové odporové senzory pro měření teploty. Termistory mají velkou nelinearitu závislosti odporu na teplotě. Jedná se tedy o nelineární prvek. Pro výrobu termistoru se využívá ferroelektrických keramických materiálů, což umožňuje výrobu termistorů v různých tvarech, kterými jsou např. destička, váleček, kapka, disk a další tvary. Termistory dosahují v určité oblasti vysoké citlivosti, což znamená, že mají velkou změnu odporu na jednotku teploty.

Termistory můžeme podle použitého materiálu rozdělit na termistory:

- s amorfni (beztvarou) strukturou
- s polykrystalickou strukturou

Další dělení termistorů je z hlediska teplotního součinitele. Termistory mohou mít buď záporný nebo kladný teplotní součinitel. Z tohoto hlediska se poté termistory dělí na termistory se záporným teplotním součinitelem, tzv. negastory (NTC termistory) a termistory s kladným teplotním součinitelem, tzv. pozistory (PTC termistory) [2],[5].

4.1.1 NTC termistory - negastory

Negastory jsou jeden typ termistoru. V dnešní době se ale většinou setkáme s označením negastoru jako termistor, popřípadě NTC termistor. Termistory mají záporný součinitel odporu, což znamená, že při zvyšování teploty odpor termistoru klesá. Termistory se vyrábí práškovou technologií, která spočívá v lisování a následným slinováním ve vysokých teplotách, ze směsi oxidů kovů. Teplotní rozsahy termistorů pro běžné použití jsou od -80°C do 200°C . Vyrábějí se také termistory pro speciální použití, u nichž je teplotní rozsah od velmi nízkých teplot jako je 4,2 K až do 1000°C . Termistory mají pětkrát až padesátkrát větší teplotní součinitel než kovy, ale zároveň jejich závislost odporu na teplotě je značně nelineární. Tato nelinearita má za následek velkou citlivost senzoru v určité oblasti [5]. Závislost odporu na teplotě lze vyjádřit vztahem dle [5]:

$$R = Ae^{\frac{B}{T}} [\Omega] \quad (9)$$

kde

A je konstanta daná geometrickým tvarem a použitým materiálem

B je teplotní konstanta

T je teplota [K]

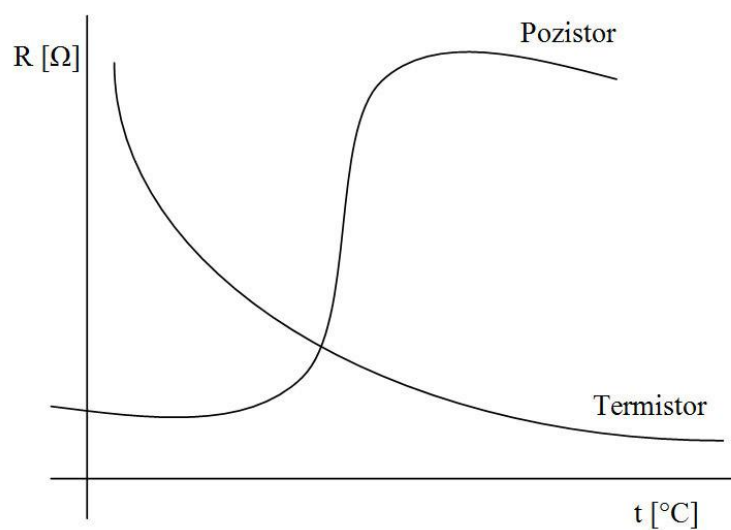
Při skokových změnách proudu, který protéká termistorem, nenastane okamžitá změna odporu. Nejprve se musí termistor ohřát vlivem protékajícího proudu a následně poté změni svůj odpor. Stejně to funguje i při zmenšení protékajícího proudu pouze s rozdílem, že odpor termistoru se zvětší. Termistory se vyrábějí v mnoho různých tvarových provedení, jako jsou tvary disku, destičky, kapky a jiných a v dnešní době se vyrábí taky v provedení SMD [8].

4.1.2 PTC termistory - pozistory

Pozistor je stejně tak jako termistor nelineární součástka. Jeho teplotní součinitel odporu je ale kladný, což má za následek růst odporu při růstu teploty. Při růstu teploty od záporných

hodnot nejprve odpor mírně klesá. V další části při dosažení tzv. Curierovy teploty, která bývá od 60°C do 180°C podle druhu materiálu, odpor prudce roste až do dosažení další tepelné hranice, kdy dojde k zastavení růstu odporu a následnému mírnému poklesu. Celý průběh změny odporu je na obrázku 3. Využití pozistorů je časté v limitních snímačích a u snímačů pro spojitě měření teplot v úzkém pásmu teplot. Na výrobu se využívá polykrystalické feroelektrické keramiky, kterou je např. titaničitan barnatý. Stejně jako termistory se pozistory vyrábí v různých tvarových provedeních [2],[5].

Na obrázku 3 můžeme vidět změny odporu v závislosti na teplotě pro termistor a pozistor.



Obrázek 3: Charakteristiky pro termistor a pozistor [5]

4.2 Monokrystalické polovodičové odporové senzory teploty

Monokrystalické polovodičové odporové senzory jsou vyráběny z polovodičového materiálu, kterým může být čistý polovodičový materiál, který je dotovaný dalším prvkem typu P a nebo N. V tomto případě se ale jedná o senzory bez PN přechodů. Dalším polovodičovým materiálem může být např. germanium, křemík, indium a další včetně jejich slitin. Nejčastěji se v praxi využívají monokrystalické křemíkové senzory teploty [5].

4.2.1 Monokrystalické křemíkové senzory teploty

Křemíkové senzory teploty jsou nejčastěji využívané monokrystalické senzory teploty. Využívají se pro měření teploty v rozsahu od -50°C do 150°C. Tyto senzory jsou založeny na nevlastním polovodiči typu N. Nevlastní polovodiče jsou takové polovodiče, ke kterým

bylo přidáno velmi malé množství příměsí. U nevlastního polovodiče typu N se přidá taková příměs, aby způsobila elektronovou vodivost polovodiče [3]. Pro tuto elektronovou vodivost poté platí dva následující vztahy, dle [3]:

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (10)$$

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (11)$$

kde

σ je konduktivita (tj. měrná elektrická vodivost) [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$]

e je elementární náboj [C]

n je koncentrace elektronů

p je koncentrace děr

n_i je vlastní koncentrace nosičů nábojů

μ_n je pohyblivost elektronů

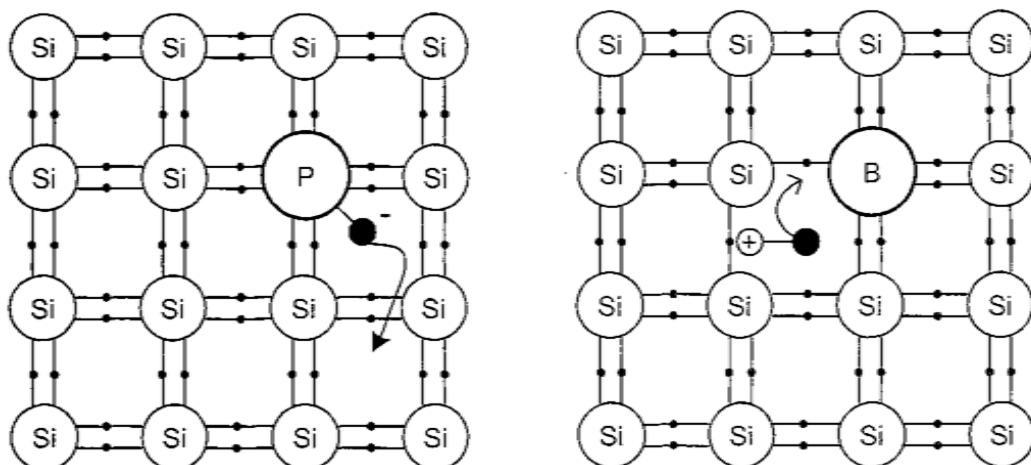
μ_p je pohyblivost děr

5 MONOLITICKÉ SENZORY TEPLoty S PN PŘECHODEM

V případě senzorů teploty s PN přechodem se využívá pro jejich výrobu polovodič s PN přechodem. V těchto polovodičích se využívá pro vznik volných elektronů příměsí, tedy přítomnost atomů jiného prvku v krystalové mřížce polovodiče. Podle druhu příměsi poté vznikají dva typy polovodičů a těmi jsou polovodič typu N a typu P.

Pro vznik polovodiče typu N se musí do krystalové mřížky přidat prvek s větším počtem elektronů, než má polovodič. To znamená, že např. do křemíku, který obsahuje ve vnější slupce 4 elektrony, se přidá příměs v podobě pětimocného kovu, kterým je např. antimon. Ve struktuře polovodiče poté vzniká přebytek elektronů. Z tohoto důvodu se výsledný polovodič nazývá typu N a přidaná příměs se nazývá donor. U polovodiče typu N jsou jako většinové nosiče elektrony. V případě polovodiče typu P se musí přidat do čistého polovodiče příměs s menším počtem elektronů. Pokud použijeme jako čistý polovodič opět germanium, tak musíme jako příměs použít prvek s menším počtem elektronů. Takovýmto třímocným prvkem je např. indium. Po vložení příměsi do polovodiče poté vzniká místo, kde naopak od polovodiče typu N elektron chybí. Tento typ polovodiče se poté nazývá polovodič typu P a přidaná příměs se nazývá akceptor. U polovodiče typu P jsou jako většinové nosiče zastoupeny díry [5].

Vznik polovodiče typu N a polovodiče typu P je znázorněn na obrázku 4. Zde je použit jako polovodič křemík, jako donor je použit fosfor a jako akceptor je použit bor.



Obrázek 4: Vznik polovodiče typu N a typu P [9]

Výroba přechodu PN spočívá v tom, že za pomoci vhodné technologie lze v polovodiči vytvořit dvě oblasti s různým typem vodivosti. Mezi těmito dvěma oblastmi vznikne velmi

tenká vrstva. Tato vrstva se nazývá PN přechod. V PN přechodu přechází vodivost typu N ve vodivost typu P. V oblasti přechodu nesmí být porušena souvislost krystalové mřížky, aby mohlo docházet k přechodu elektronů přes PN přechod z oblasti typu N do oblasti typu P. Protože neexistuje ideálně čistý polovodič, tak se v jednotlivých oblastech vyskytují také menšinové nosiče, které mají opačnou vodivost než většinové nosiče v dané oblasti. Ihned po vytvoření přechodu PN vznikne mezi těmito dvěma oblastmi přitažlivá elektrostatická síla, která způsobuje v blízkosti PN přechodu přecházení většinových nosičů z oblasti N do oblasti P a většinových nosičů z oblasti P do oblasti N [9].

5.1 Polovodičové PN diody pro měření teploty

Jedním ze senzorů pro měření teploty, které mají PN přechod jsou polovodičové PN diody. Tyto diody využívají změnu vodivosti PN přechodu v závislosti na teplotě. Polovodiče, které se využívají pro výrobu diod, mají při nízké teplotě velmi malou vodivost. Takovými polovodiči jsou křemík a germanium. Tato malá vodivost je způsobena tím, že všechny elektrony jsou vázány jako valenční elektrony v krystalové mřížce. Pokud se zvýší teplota diody, dojde ke zvýšení energie elektronů, ty začnou překonávat bariéru valenční oblasti a přecházet do vodivé oblasti. Pokud se zvýší teplota diody tak se zmenší ΔU_D na přechodu v propustné oblasti a zvětší se zbytkový proud v závěrné oblasti [5].

5.2 Tranzistory pro měření teploty

Jako další senzor s PN přechodem pro měření teploty se dají využít tranzistory. Pracují na podobném principu jako PN diody. Tyto senzory využívají závislosti změny napětí přechodu báze - emitor na teplotě. Při změně teploty dochází k posunutí vstupní charakteristiky a to k menšímu napětí U_{BE} [5]. Tuto závislost vyjadřuje vztah, dle [5]:

$$\Delta U_{BE} = \pm d_t (T - T_0) \text{ [V]} \quad (12)$$

kde

U_{BE} je napětí báze - emitor [V]

d je teplotní průnik (+ pro PNP, - pro NPN)

T je nová absolutní teplota [K]

T_0 je stávající absolutní teplota [K]

5.3 Integrované PN senzory pro měření teploty

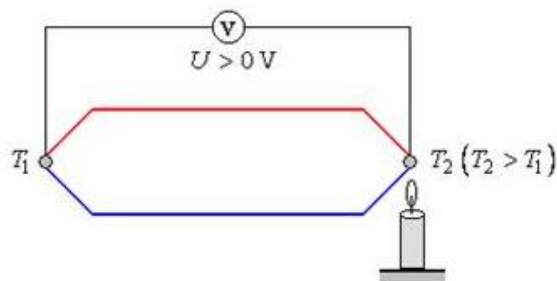
Monolitické integrované teplotní senzory jsou tvořeny z několika polovodičových prvků. Tyto senzory se většinou skládají ze dvou bipolárních tranzistorů, přičemž jeden z tranzistorů obsahuje více emitorů. Dalším možným způsobem je využití CMOS technologie místo bipolárních tranzistorů. V dnešní době se integrované PN senzory vyrábějí v provedení se strukturou, která odpovídá charakteristice Zenerovy diody, dále v provedení s integrovaným zesilovačem a také jako senzory s mikroprocesorem. Další typ senzorů mohou být senzory s digitálním výstupem [2].

6 TERMOELEKTRICKÉ ČLÁNKY

Termoelektrické články neboli termočlánky jsou dalšími senzory pro měření teploty. Termoelektrické články se skládají se dvou kovů nebo polovodičů, které jsou uvnitř termočlánku spojeny ve dvou bodech. Při změně teploty v místě spoje začne vznikat napětí, které je závislé na teplotě. Na výstupu termoelektrického článku, nebo také termočlánku máme tedy výstupní napětí, které se pohybuje v řádu mV. Termočlánky jsou založeny na principu Seebeckova jevu.

6.1 Seebeckův jev

V termoelektrických člancích se využívá principu Seebeckova jevu, což je převod tepelné energie na energii elektrickou. Uvnitř termočlánku jsou dva různé kovy nebo polovodiče, které jsou ve dvou bodech spojeny. Můžeme si to představit jako dva kusy drátu, které jsou na svých koncích vzájemně spojeny. Princip termoelektrického článku potom spočívá v tom, že pokud budeme jeden spoj těchto dvou kovů zahřívat, bude se měnit tzv. termoelektrické napětí mezi dvěma spoji. Princip termoelektrického článku je znázorněn na obrázku 5 [10].



Obrázek 5: Princip termoelektrického článku [10]

Princip Seebeckova jevu spočívá v tom, že v teplejší části vodiče nebo polovodiče mají nositelé nábojů větší energii. Z důvodu větší energie začnou tyto náboje pronikat do chladnější části. Po proniknutí nábojů vznikne na jedné straně vodiče jednostranná převaha nábojů a to buď kladných nebo záporných. Mezi jednotlivými spoji poté vznikne termoelektrické napětí [2].

Pro popis elektromotorické síly Seebeckova jevu se využívá Seebeckova vztahu, dle [7]:

$$dU_{A,B} = S_{A,B} \cdot dT \text{ [V]} \quad (13)$$

kde

$$S_{A,B} = S_A - S_B \text{ (Seebeckovy koeficienty) [V/K]}$$

T je teplota [K]

Pro Seebeckovy koeficienty platí vztah, dle [7]:

$$S_i = \int_0^T \frac{\delta_i}{T} dT \text{ [V/K]} \quad (14)$$

kde

δ_i jsou Thomsonovy koeficienty

6.2 Typy termoelektrických článků

Termoelektrické články se dělí do několika typů. Jednotlivé typy termoelektrických článků jsou označeny písmeny, např. K, N, E a jiné. Jednotlivé materiály pro výrobu termoelektrických článků jsou ve světě normalizovány. Používané materiály pro jednotlivé termoelektrické články včetně teplotních rozsahů jsou uvedeny v tabulce 1.

<i>Typ</i>	<i>Materiál</i>	<i>Teplotní rozsah dlouhodobý [°C]</i>	<i>Teplotní rozsah krátkodobý [°C]</i>
K	NiCr - NiAl	0 až 1100	- 180 až 1350
T	Cu - CuNi	- 185 až 300	- 250 až 400
J	Fe - CuNi	20 až 700	- 180 až 750
E	NiCr - CuNi	0 až 800	- 40 až 900
N	NiCrSi - NiSiMg	0 až 1100	- 270 až 1300
R	PtRh13 - Pt	0 až 1600	- 50 až 1700
S	PtRh10 - Pt	0 až 1550	- 50 až 1750
B	PtRh30 - PtRh6	100 až 1000	100 až 1820
C	WRh5 - WRh26	50 až 1820	20 až 2300
G	W - WRh	20 až 2320	0 až 2600

Tabulka 1: Typy termoelektrických článků [2]

Ze Seebeckova jevu vyplývá, že na výstupu termočlánku je napětí. Toto napětí se pohybuje v řádech setin mV/°C. Pro měření termočlánekového napětí se tedy musí využívat citlivých

milivoltmetrů. Pro zvýšení termočlánekového napětí lze využít sériového zapojení více termočláneků. Toto sériové zapojení se nazývá termočláneková baterie. Při tomto zapojení jsou všechny spoje brány jako měřící. Na výstupu termočlánekové baterie je součet napětí jednotlivých termočláneků, které baterie obsahuje. Tím se výstupní napětí zvýší a není tedy nutné při měření využívat velmi citlivých milivoltmetrů [7].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části této práce je navrhnout a následně vhodným způsobem realizovat laboratorní úlohu určenou na dotykové měření teploty. Experimentální úloha pak bude sloužit k laboratorním účelům předmětu *Senzory*, který je součástí studijního plánu Fakulty aplikované informatiky, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Předmět, jak již jeho název napovídá, je zaměřen na výuku senzorů všech možných druhů využívaných v oboru automatizace, který je v dnešní době využíván snad ve všech odvětvích průmyslu. Student získá znalosti z pohledu využívaných principů a seznámí se s jejich fyzikální podstatou. Jedná se tedy o velmi širokou a náročnou oblast. Proto pro usnadnění studia je využívána i laboratoř, která doplňuje a zefektivňuje přednášky daného předmětu. Stávající laboratoř nyní vyžaduje aktualizaci svých úloh s cílem obsáhnout aktuálnost vývoje tohoto rychle rozvíjejícího se oboru. Součástí tohoto celku bude i výše zmíněná úloha na měření teploty dotykovým způsobem. Výstupy této úlohy budou zaměřeny na vyhodnocování základních statických charakteristik vybraných senzorů teploty s ukázkou jejich praktického provedení a reálnými výstupními signály, které vznikají vlivem působení vnějšího podnětu. Výstupními signály jsou na mysli signály bez dalšího zpracování, tj. zesílení, převod, atd.

Na jednotlivé experimentální úlohy je kladena jednoduchost provedení s možností rozšíření a úpravy, dle aktuálnosti. Podmínkou je také dodržet jednotvárný vzhled a způsob konstrukce základny u všech nově vznikajících úloh. Z toho vyplývá také nutnost komunikace a spolupráce s ostatními řešiteli experimentálních úloh v dané laboratoři.

8 VÝBĚR VHODNÝCH SENZORŮ NA MĚŘENÍ TEPLoty DOTYKOVÝM ZPŮSOBEM

Teplota patří mezi jednu z nejčastěji měřených veličin. Měření teploty se využívá jak v průmyslu, tak i v domácnostech a dalších odvětvích. Proto se také v dnešní době vývojem a výrobou senzorů určených na měření teploty zabývá spousta firem, které pak na trhu nabízí velké množství různých typů těchto součástek. Díky této široké nabídce a horší tak orientaci, se samotný proces výběru vhodných senzorů určených na dotykové měření teploty stává komplikovanější. Bylo tedy nutné si stanovit priority, podle kterých bude výběr proveden. Po konzultaci s vedoucím bakalářské práce byla jako priorita stanovena cena, dostupnost a běžné konstrukční provedení pro případ jednoduché náhrady.

Z prezentovaných principů využívaných u těchto senzorů (viz kap. 3, 4, 5, 6) byly vybrány dle požadavku vedoucího práce následující:

- odporové elektrické - kovové, polovodičové
- termoelektrické

Také byl kladen požadavek na možné srovnání senzorů, které využívají stejného principu. Z toho důvodu jsou zvoleny některé senzory, které pracují na stejném principu. Liší se pouze výstupními hodnotami. Z výše uvedených zvolených principů byly zvoleny následující senzory:

- NTC termistor
- PTC termistor
- Termočlánek typ K
- Termočlánek typ J
- Platinový odporový senzor Pt100
- Platinový odporový senzor Pt1000

Dále byl záměr použít i odporový senzor typu Ni500 nebo Ni1000, ale nepodařilo se nám sehnat samotný senzor. Většinou se jednalo o senzory zabudované do plastových krabiček, které byly určeny pro použití v domácnosti. Tudíž jsme se tedy rozhodli tento senzor nepoužít.

Vybrané teplotní senzory patří mezi základní typy teplotních senzorů. Tyto senzory jsou běžně dostupné a jejich cena není vysoká. U odporových senzorů se cena pohybuje v řádu desítek korun a u termočlánků v řádu stovek korun. Z důvodu cenové dostupnosti tedy

bylo možné zvolit více senzorů tak, aby pokryly běžně používané senzory. Výběr veškerých senzorů jsem konzultoval s vedoucím bakalářské práce.

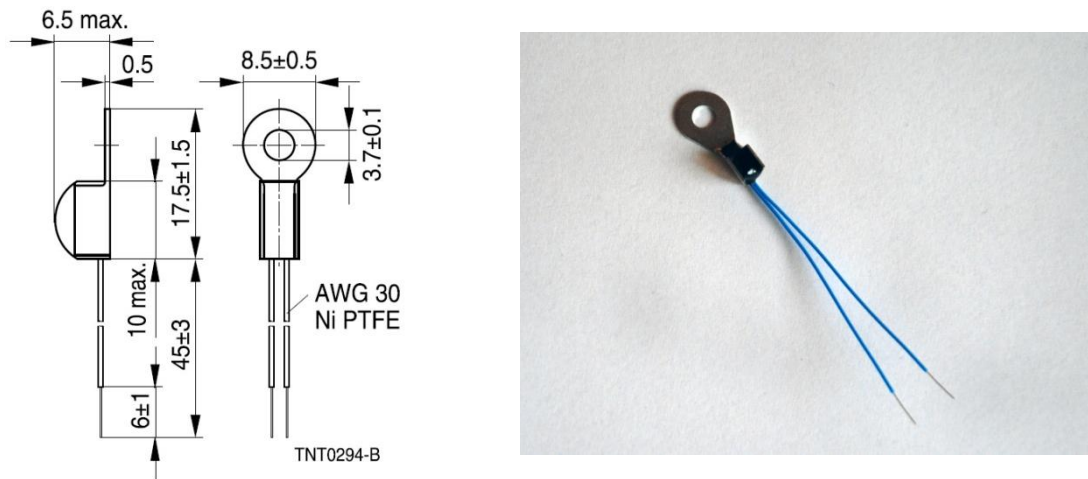
8.1 NTC termistor Epcos

NTC termistory patří mezi běžně dostupné senzory na měření teploty. Tyto senzory mají záporný teplotní součinitel odporu, což znamená, že při zvyšování teploty odpor klesá nelineárně. Zvolený NTC termistor vyrábí firma Epcos pod označením B57703M0103G040. NTC termistory se nabízí s různými hodnotami odporu, které jsou např. 3k Ω , 6,8k Ω , 10k Ω a další. Pro potřebu experimentální úlohy byl zvolen NTC termistor s hodnotou odporu 10k Ω . NTC termistory se vyrábějí v různém tvarovém provedení, ať už se jedná o disk, kapku a jiné tvary. Z důvodu, že bude potřeba daný senzor připevnit přímo na vyhřívané těleso, nebyly předchozí jmenované tvary vhodné. Rozhodl jsem se tedy podívat po termistorech s jiným tvarem, které umožňují jednodušší připevnění senzoru. Nabízely se možnosti provedení senzoru s přichytným očkem, se závitem, nebo zápusťné senzory ve tvaru válce. Po zvážení všech možností byl zvolen senzor s přichytným očkem. Bylo tak rozhodnuto z důvodu jednoduché montáže na vyhřívané těleso. Rozměry a vzhled senzoru lze vidět na obrázku 6. Na obrázku 7 je znázorněna závislost změny odporu na teplotě. Tato charakteristika byla vytvořena na základě tabulkových hodnot uvedených v datasheetu NTC termistoru, který je součástí přílohy číslo P1, uvedené v Návrhu zadání na měření laboratorní úlohy (dále jen P1 - NZ, atd.) Tento návrh je veden jako externí příloha k této práci.

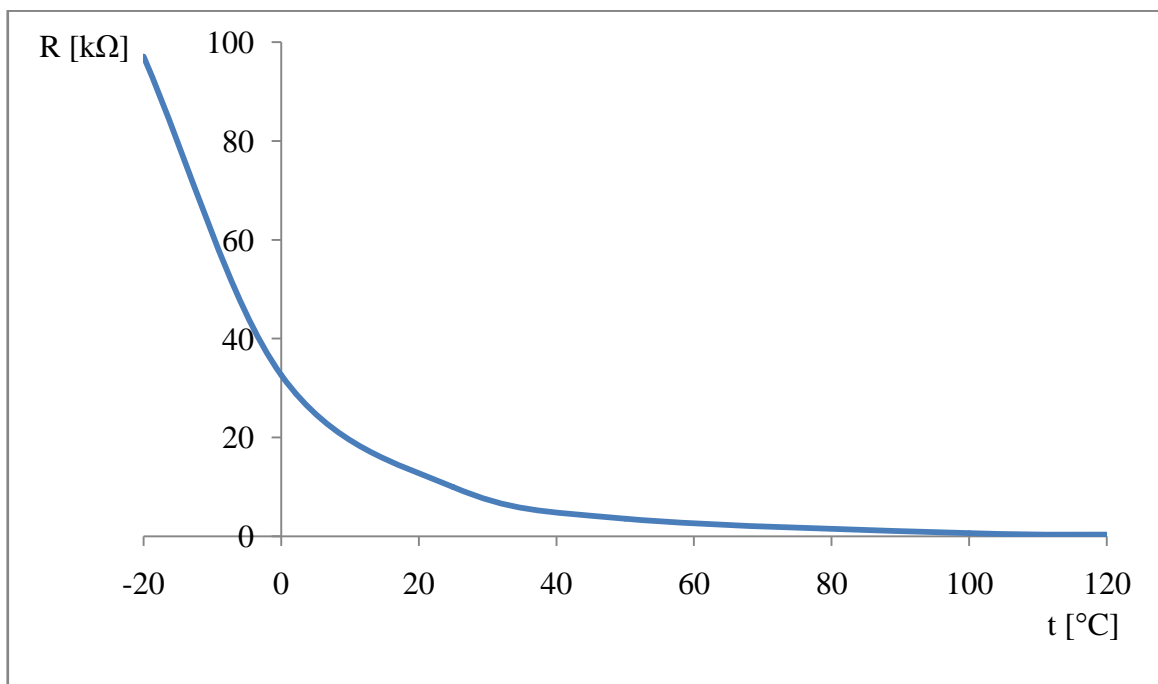
Vlastnosti NTC termistoru:

- Teplotní rozsah: -20°C až 125°C
- Spínaný výkon: 150mW
- Hodnota odporu při 25°C R_{25} : 10k Ω

Podrobnější technická specifikace je uvedena v P1 - NZ. Pro účely práce jsou vypsány podstatné informace, viz výše.



Obrázek 6: Rozměry [11] a vzhled NTC termistoru

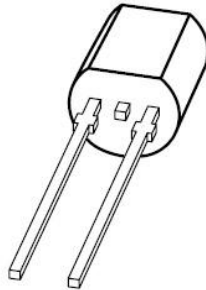


Obrázek 7: Charakteristika NTC termistoru

8.2 PTC termistor NXP

PTC termistor má na rozdíl od NTC termistoru kladný teplotní součinitel odporu, což znamená, že odpor se stoupající teplotou roste nelineárně (viz kap. 4.1.2). Závislost odporu na teplotě je na obrázku 10. Tato charakteristika byla vytvořena na základě tabulkových hodnot uvedených v datasheetu PTC termistoru, který je uveden v P2 - NZ. Zvolený PTC termistory vyrábí firma NXP pod označením KTY 81-210. Tyto senzory se stejně jako NTC termistory vyrábějí v různých tvarech, jako jsou kapka, disk a jiné. U těchto tvarů by

ale bylo obtížné senzor připevnit k vyhřívanému tělesu, proto byl zvolen PTC termistor v pouzdru SOD70, viz obrázek 8. Senzor v tomto pouzdru bude možné zavrtat do vyhřívaného tělesa.

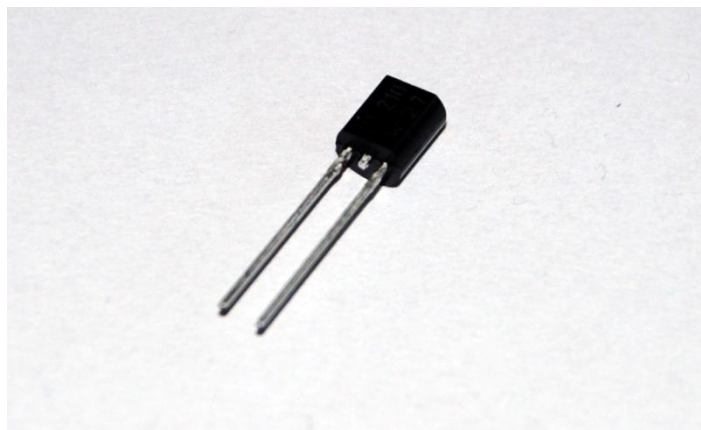


Obrázek 8: Ukázka
pouzdra SOD70 [12]

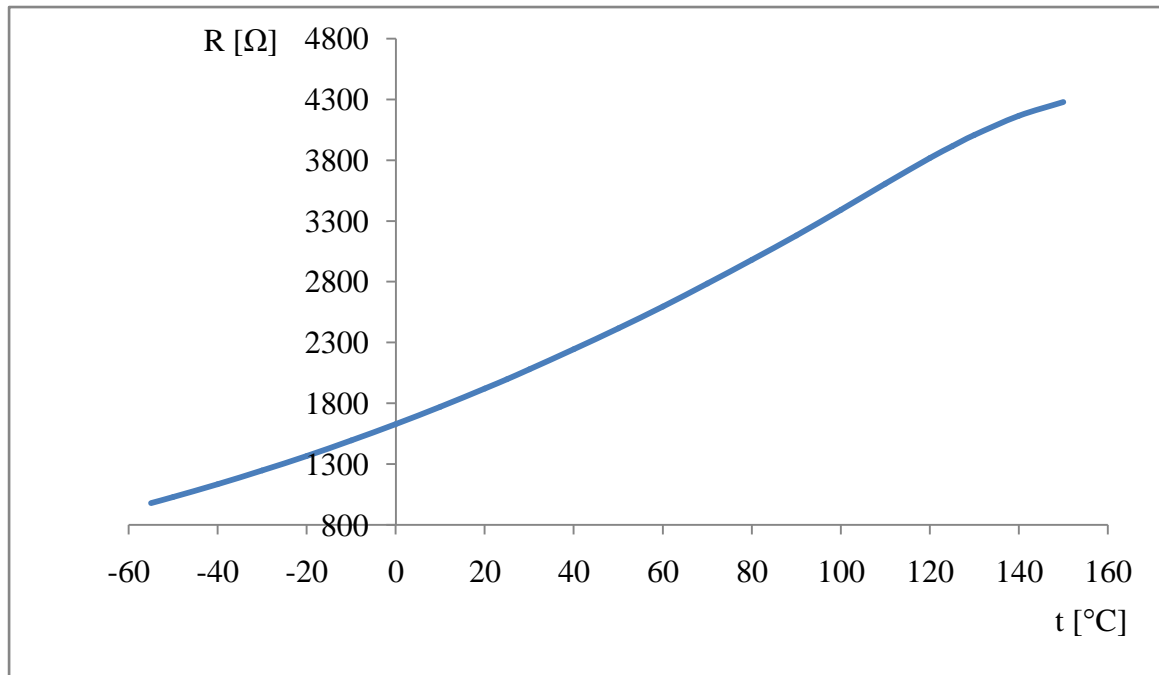
PTC termistory se vyrábějí s různými hodnotami odporu při teplotě 25°C. Zvolený PTC termistor má následující vlastnosti:

- Hodnota odporu při 25°C R_{25} : 2k Ω
- Teplotní rozsah: -55°C až 150°C

Podrobnější parametry jsou vypsány v technické dokumentaci, která je uvedena v P2 - NZ.



Obrázek 9: PTC termistor KTY 81-210



Obrázek 10: Charakteristika PTC termistoru

8.3 Termočlánky Guenther

Mezi senzory pro experimentální úlohu byly zvoleny také termočlánky. Jelikož je termočlánků více typů, viz tabulka 1, musely být podle teplotního rozsahu zvoleny vhodné typy. Dalším aspektem výběru vhodných termočlánků byla jejich dostupnost. Po dohodě s vedoucím bakalářské práce byly vybrány dva typy termočlánků. Podle teplotních rozsahů byly zvoleny termočlánky typu K a J. Zvolené typy termočlánků jsou nejvíce používané. Vybrané termočlánky vyrábí firma Guenther pod označením 72-21301141-0300-0060.GGP-K pro typ K a 72-21301142-0300-0060.GGP-J pro typ J. Tyto termočlánky se liší jak v použitém materiálu, tak i v teplotním rozsahu. Podle teplotních rozsahů by sice byl téměř jakýkoliv typ termočlánku vhodný pro experimentální úlohu, ale pro typy K a J bylo rozhodnuto také z důvodu lepší dostupnosti. Materiál a teplotní rozsahy pro zvolené typy termočlánků:

Termočlánek typ K:

- Použitý materiál: NiCr - NiAl
- Krátkodobý teplotní rozsah: -180°C až 1350°C
- Dlouhodobý teplotní rozsah: 0°C až 1100°C

Termočlánek typ J:

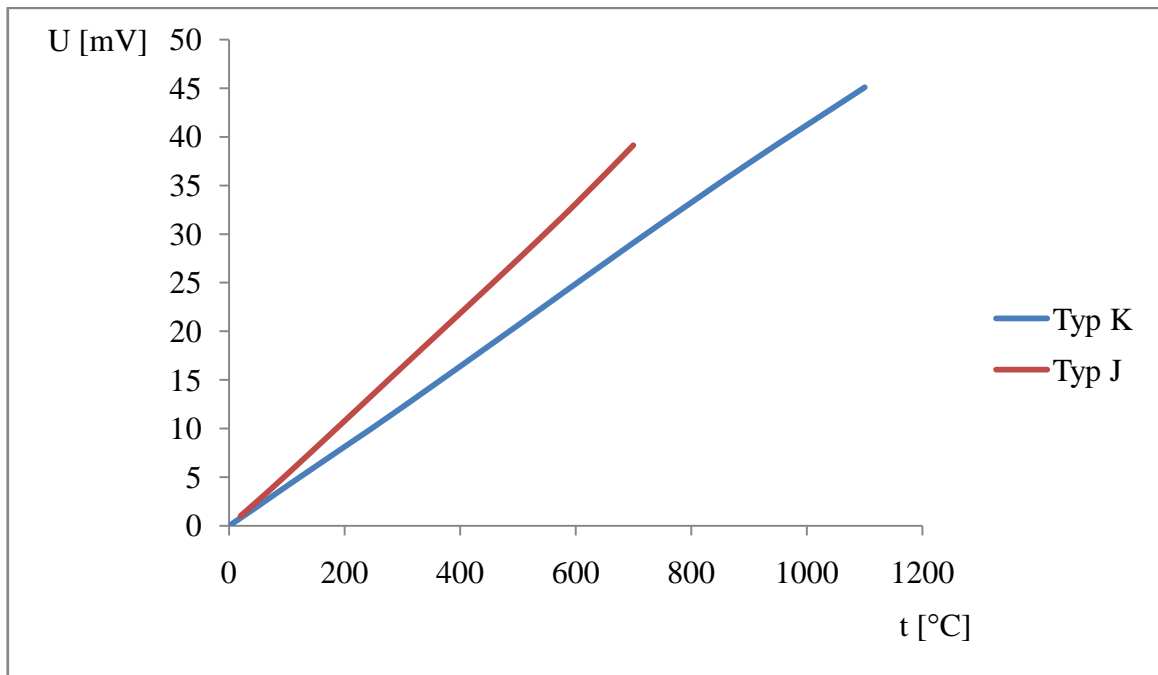
- Použitý materiál: Fe - CuNi
- Krátkodobý teplotní rozsah: -180°C až 750°C
- Dlouhodobý teplotní rozsah: 20°C až 700°C

Jak je vidět z výše uvedených teplotních rozsahů, tak pro měření na experimentální úloze jsou typy termočláneků K a J plně dostačující a pokryjí celý rozsah teplot, při kterých se měření bude provádět. Termočláanky se nejčastěji vyrábějí ve válcovém provedení. Tudíž i v tomto případě bylo zvoleno toto provedení termočláneků. Termočláanky se ale vyrábějí v různých rozměrech, a tak musel být zvolen optimální rozměr pro danou úlohu. Bylo rozhodnuto pro termočlánek o průměru 6mm a délce 50mm a to jak pro typ K tak i pro typ J. Pro tento rozměr jsem se rozhodl z důvodu, že bude potřeba termočlánek zavrtat do vyhřívaného tělesa a tudíž delší termočlánek by byl zbytečný. Vybrané termočláanky disponují přípojným kabelem o délce 3m. Provedení termočláneků je na obrázku 11.

Na výstupu termočláanky je termoelektrické napětí, které roste při zvyšující se teplotě. Závislost termoelektrického napětí na teplotě je na obrázku 12 a to pro oba zvolené typy termočláneků. Výstupní charakteristika byla vytvořena z tabulkových hodnot uváděných pro termočláanky, které jsou součástí P3, P4 - NZ.



Obrázek 11: Provedení termočláneků, vlevo typ K a vpravo typ J



Obrázek 12: Charakteristika termočlánku typu K a J

8.4 Platinové odporové senzory

Platinové senzory jsou běžně dostupnými senzory pro měření teploty. Vyrábějí se ve dvou vodičovém provedení. Pro potřebu experimentální úlohy byly zvoleny dva platinové odporové senzory a to senzory Pt100 a Pt1000. Vlastnosti jednotlivých platinových senzorů:

Pt100:

- Jmenovitý odpor: 100Ω
- Pracovní teplota: -50°C až 500°C

Pt1000:

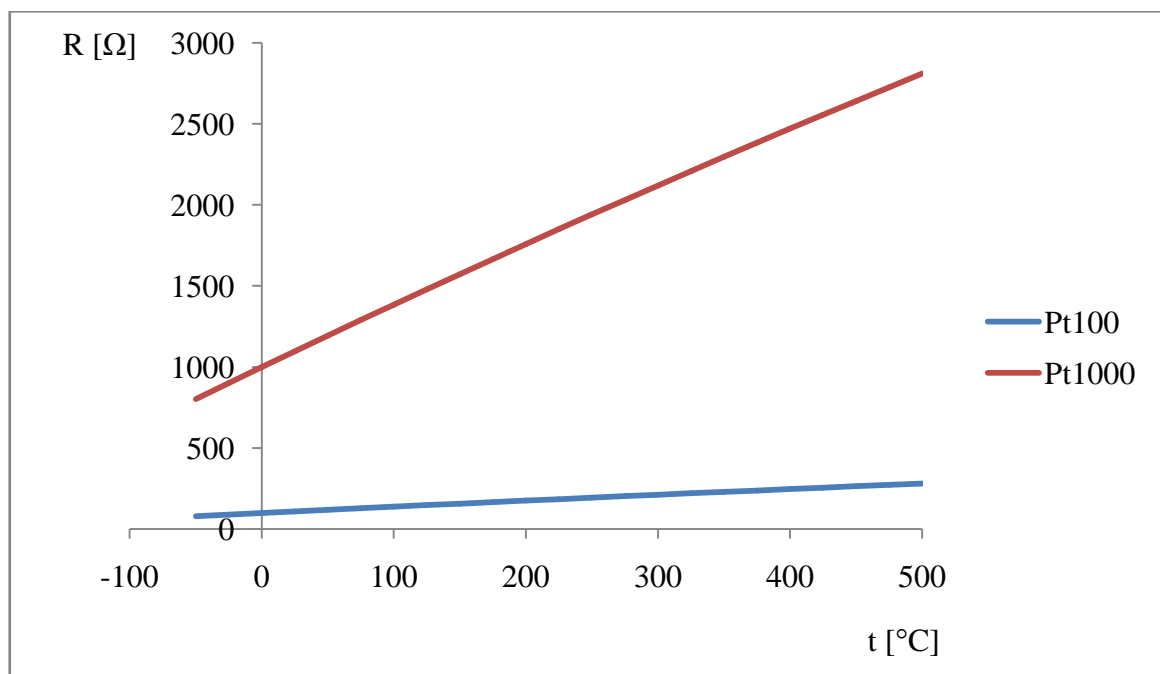
- Jmenovitý odpor: 1000Ω
- Pracovní teplota: -50°C až 500°C

Platinové odporové senzory teploty se vyrábějí ve více tvarech. Základním tvarem je senzor ve tvaru destičky. Dále se vyrábějí senzory ve tvaru válce a jiné tvary. Jelikož tvar destičky nebyl vhodný pro připevnění senzoru na vyhřívané těleso, rozhodl jsem se pro tvar válce. Připevnění se bude provádět formou zavrtání do vyhřívaného tělesa, tak jako u termočlánků. Platinový senzor má průměr 3mm a délku 6mm. Zvolené senzory mají délku vývodů 8mm. Provedení senzorů je na obrázku 13. Závislost odporu na teplotě je na

obrázku 14. Charakteristika byla vytvořena z tabulkových hodnot uvedených v datasheetu, které jsou uvedeny v P5, P6 - NZ. Taktéž je v této příloze uvedena podrobnější technická specifikace, která není potřebná pro úlohu.



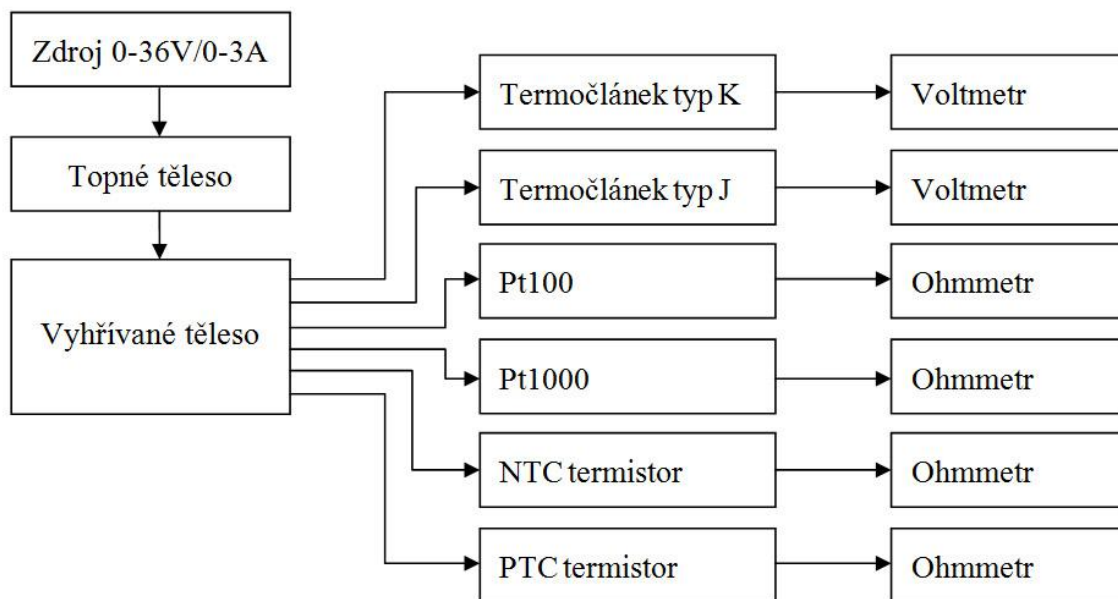
Obrázek 13: Sensory Pt100 (vlevo) a Pt1000 (vpravo)



Obrázek 14: Charakteristika platinového odporového senzoru Pt100 a Pt1000

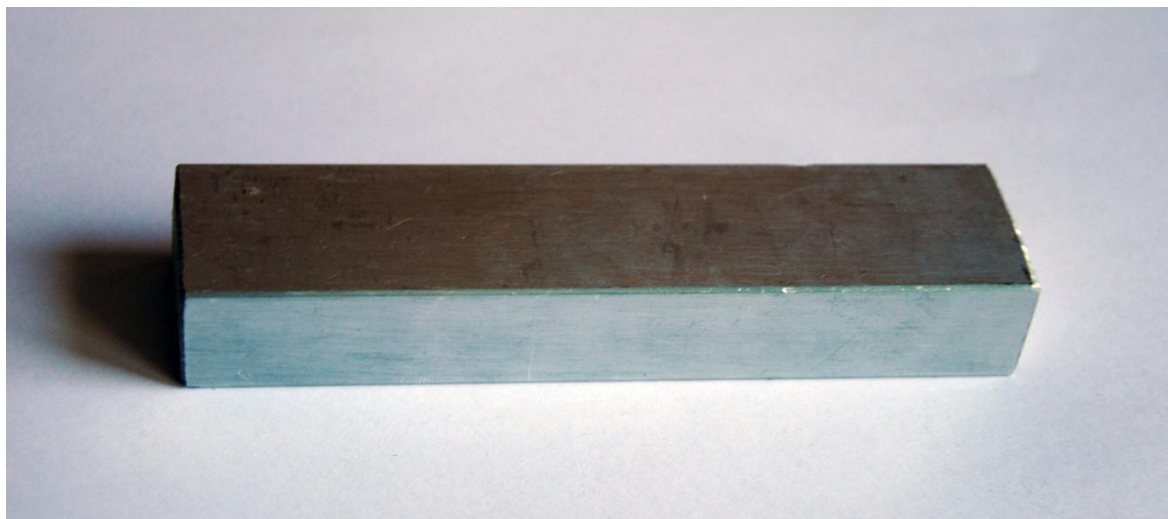
9 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY

Jako první bylo při návrhu vytvořeno blokové schéma, viz obrázek 15, od kterého se bude celá úloha odvíjet. Z blokového schématu vyplývá, že jednotlivé senzory teploty (dále senzory) budou umístěny přímo na vyhřívaném tělese. Následně se na senzorech budou měřit výstupní signály za pomoci příslušných měřících zařízení.

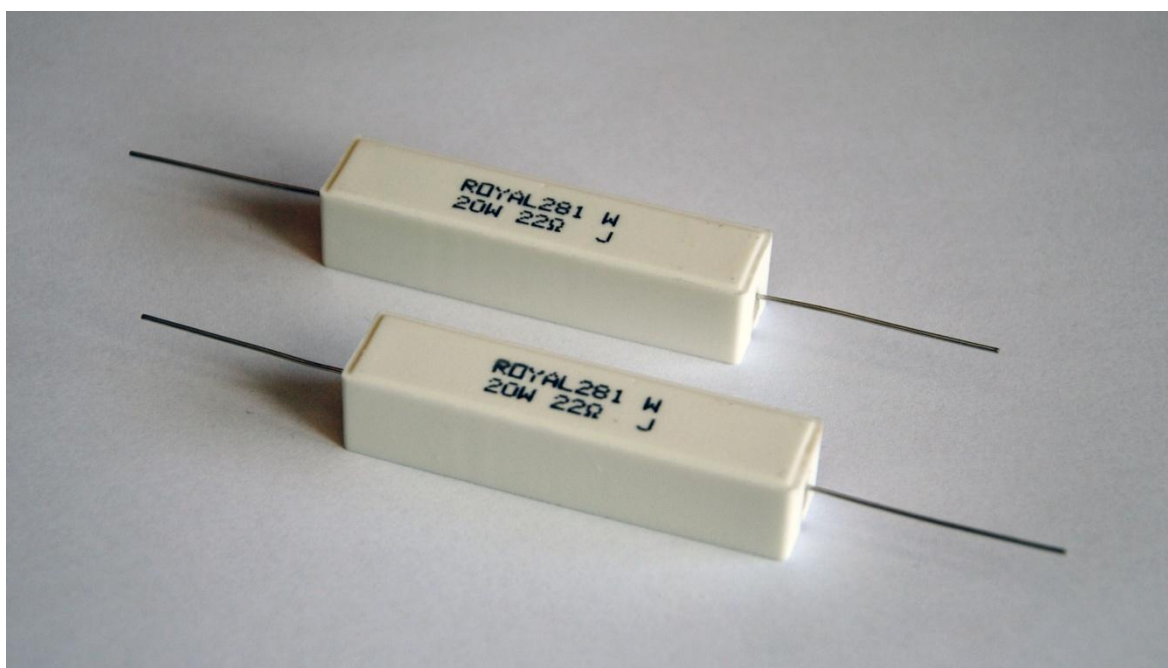


Obrázek 15: Blokové schéma experimentální úlohy

Na laboratorní úloze se bude provádět měření výstupních signálů z jednotlivých senzorů pro 7 různých teplot v rozsahu od pokojové teploty až po 80-90°C. Při každé teplotě se odečte 10 hodnot výstupního signálu, z nichž se následně určí maximální, minimální, průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Z toho důvodu je nutné jednotlivé senzory připevnit přímo na těleso, u něhož se bude zvyšovat teplota. Jako vyhřívané těleso se použije hliníková tyč obdélníkového průřezu o rozměrech 30x20x130mm, viz obrázek 16. Hliník byl vybrán pro svou dobrou tepelnou vodivost a nízkou hmotnost. K výhřevu hliníkového tělesa se využije dvou metal oxidových rezistorů, každý s výkonem 20W, viz obrázek 17, které budou paralelně spojeny a připojeny na napájecí regulovatelný zdroj s parametry 0-36V/0-3A DC. Po připojení rezistoru na napájecí zdroj se bude reálná teplota zjišťovat za pomoci vhodného dotykového teploměru. Při dosažení požadované hranice se napájení rezistorů odpojí a po ustálení teploty se provede měření. Vývody jednotlivých senzorů budou připojeny na svorkovnici, ze které se poté výstupní signál přivede na vhodné měřící zařízení.



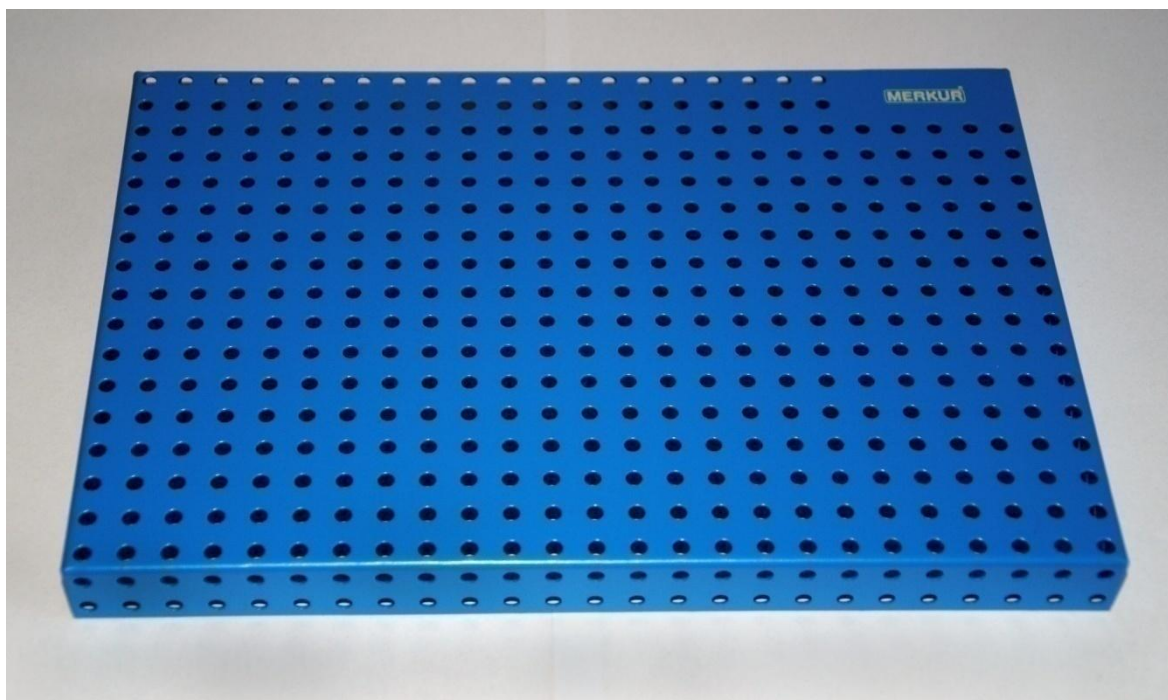
Obrázek 16: Hliníková tyč obdélníkového průřezu



Obrázek 17: Metal oxidové rezistory 20W

Jako základnu pro celou úlohu bylo nutné zvolit univerzální stavebnici, kterou by bylo možné jednoduše upravit či rozšířit. Jelikož úloh do laboratoří se připravuje více, bylo nutné se dohodnout i s ostatními řešiteli na jednotvárnou stavebnici, z důvodu jednotného vzhledu laboratoře. Po dohodě s ostatními byla jako optimální základna zvolena experimentální kovová deska stavebnice od firmy Merkur o rozměrech 250x170x20mm. Jedná se o kovovou lakovanou desku s vyvrtanými otvory, viz obrázek 18. V případě

navrhované úlohy se základna vytvoří za pomoci dvou kovových desek spojených do písmene "L".



Obrázek 18: Experimentální kovová deska

10 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY

Po předchozích etapách jako je stanovení výstupů z požadované úlohy, výběr vhodných senzorů a konstrukčních prvků, vytvoření obecné představy o samotné úloze lze přistoupit k prvním krokům realizace samotné úlohy, kterou se bude zabývat následující kapitola.

Nejprve byla nutná úprava hliníkového tělesa určeného na vyhřívání, jak již bylo zmíněno v kapitole 9. Úprava se týká způsobu ukotvení vybraných senzorů, jejichž konstrukční řešení je blíže specifikováno v kapitole 8. Nejprve bylo potřeba vhodně rozvrhnout jednotlivé senzory. Jelikož bylo nutné senzory připevnit přímo na těleso, muselo se podle rozměrů senzorů zvolit jejich vhodné umístění. V případě NTC, PTC termistoru, Pt100 a Pt1000 bylo jako nejvhodnější místo čelní strana tělesa. Ta ale nebyla vhodná pro termočlánky z důvodu jejich rozměrů, viz kapitola 8.3. Jelikož termočlánky jsou 50mm dlouhé, bylo nutné je umístit z boční strany tělesa. Pro senzory umístěné na čelní straně tělesa byla mezi nimi zvolena rozteč 20mm. Při návrhu umístění se vycházelo ze středu tělesa. Termočlánky byly umístěny vzájemně proti sobě, vždy každý z jedné boční strany, jak lze vidět i na obrázku 19. Po tomto návrhu na umístění jednotlivých senzorů následovalo vrtání otvorů.

Přesnost vrtaných otvorů je velmi důležitá z pohledu správného kontaktu zvolených senzorů s vyhříváním tělesem, na kterém bude probíhat samotné měření. Proto před samotným zahájením vrtáním bylo potřeba zvolit vhodný průměr vrtáku a hloubku vrtaného otvoru. Vycházelo se z rozměrů jednotlivých senzorů, které uvádí výrobci v příslušných technických specifikacích. Pro jistotu byla tato data ověřena měřením pomocí posuvného měřítka a z výsledků měření vyplynulo, že rozměry udávané výrobcem se shodují s reálnými rozměry senzorů. Na základě výše zmíněného byl pro senzory Pt100 a Pt1000 zvolen vrták o průměru 3mm. Dále pro PTC termistor průměr 4,5mm a pro oba typy termočlánků průměr 6mm. Konstrukce NTC termistoru, uvedená v kap. 8.1, vyžadovala jiný způsob ukotvení než výše zmiňované senzory. Bylo nutné vyvrtat otvor pro samořezný šroub. Jako vhodný šroub byl zvolen šroub o průměru 3mm a délce 5mm, který vyžadoval otvor o průměru 2mm. Hloubka vrtaných otvorů pro montáž jednotlivých typů senzorů byla opět stanovena na základě měření. Pro senzory Pt100 a Pt1000 je nutná hloubka otvoru 6mm, pro PTC termistor 5mm a pro termočlánky 50mm.

Na základě z výše zjištěných informací bylo přistoupeno k samotnému vrtání. Pro přesnost samotného vrtu bylo nutné příslušný vrták zajistit před možným sklouznutím na hladké

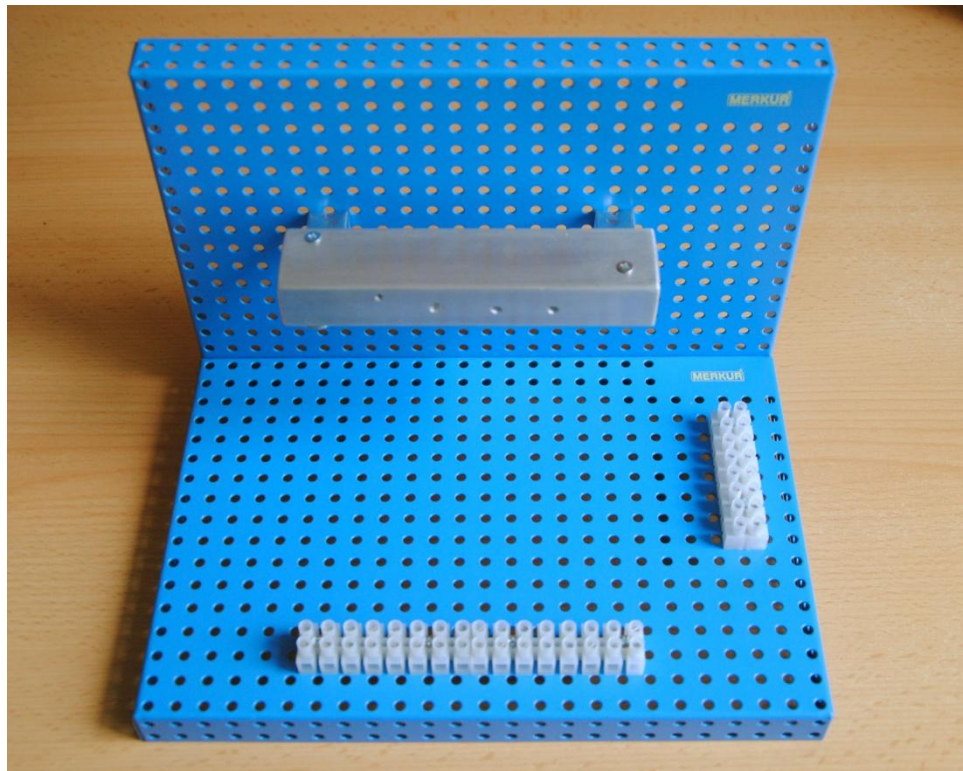
stěně zvoleného tělesa. Proto byl na označení vrtu použit důlčík a pro ukotvení samotného tělesa vhodný svěrák. Vrtání otvorů bylo provedeno za pomoci stolní vrtačky. Následně byly vyvrtány i otvory nutné pro připevnění tělesa k základní konstrukci úlohy. Tyto otvory z pohledu konstrukce vyžadovaly průměr 3mm. Po dokončení vrtacích prací proběhlo zkušební osazení senzorů za účelem ověření přesnosti práce. Výsledné rozmístění senzorů je ukázáno na obrázku 19. Umístění senzorů je (bráno z leva): termočlánek typ J, NTC termistor, PTC termistor, Pt100, Pt1000 a termočlánek typ K.



Obrázek 19: Rozmístění senzorů

Základna úlohy byla sestavena ze dvou experimentálních kovových desek, viz kapitola 9 a to do tvaru písmene "L" pomocí šroubových spojů. Tato základna byla osazena svorkovnicemi, jak lze vidět na obrázku 20, pro snazší i šetrnější způsob vyvedení výstupních signálů z použitých senzorů a přivedení napájecího napětí pro topné těleso viz obrázek 17. Svorkovnice v přední části základny budou sloužit pro senzory a svorkovnice na pravém boku pro napájení topného tělesa. Vyhřívané těleso, viz obrázek 16, bylo k základně připevněno pomocí dvou k tomu upravených montážních vinklů o rozměrech 60x60mm. Opět bylo využito pouze šroubových spojů pro případnou jednoduchou přestavbu. Mezi toto těleso a vinkle byla umístěna nylonová podložka, kvůli omezení přenosu tepla do konstrukce. Tato izolace bude mít za úkol jednak zabránit nechtěnému ochlazování vyhřívaného tělesa a také udržet konstrukci základny mimo dosah vysokých

teplot z bezpečnostních důvodů. Základna s připevněným tělesem a svorkovnicemi je ukázána na obrázku 20.

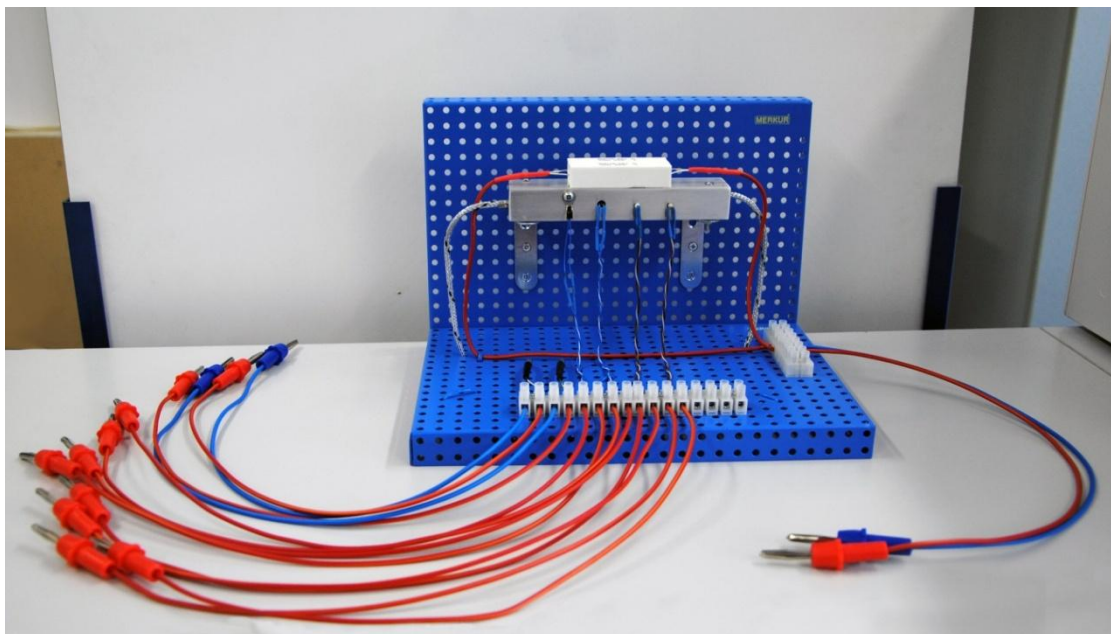


Obrázek 20: Základna včetně tělesa a svorkovnic

Těleso bylo dále osazeno potřebným výhřevem. Jako výhřev byly použity dva metal oxidové rezistory, každý o hodnotě 20W, viz obrázek 17. Tyto rezistory byly na těleso připevněny pomocí lepidla, které muselo odolávat vyšším teplotám. Pro tento případ bylo použito lepidlo do 120°C, což k vzhledem předpokládanému teplotnímu rozsahu úlohy bylo dostačující.

Po dokončení úprav tělesa bylo provedeno osazení senzorů, ke kterým byly připájeny vodiče přivádějící výstupní signál na příslušnou svorkovnici. Stejným způsobem bylo provedeno i připojení výhřevu. Dále byly ze svorkovnic vyvedeny barevně rozlišené vodiče zakončené konektory typu banán, sloužící k připojení měřících zařízení a potřebného zdroje pro napájení ohřevu. Celkový vzhled konstrukce úlohy je zobrazen na obrázku 21. Správná funkčnost této sestavené úlohy byla následně ověřena měřením základních statických charakteristik jednotlivých senzorů. Z provedeného měření byla zpracována zpráva ve formě výstupního protokolu, který byl upraven dle požadavků daného předmětu. Zpráva mimo jiné obsahuje i použité měřící zařízení a potřebný postup k provedení měření. Tato kompletní zpráva je součástí přílohy číslo P I. Výsledky

a získané zkušenosti, vč. návrhů na případné vylepšení vzniklé experimentální úlohy jsou dále konzultovány v navazující kapitole. Kompletní měřicí sestava této experimentální úlohy zaměřené na dotykové měření teploty je ukázána na obrázku 22.



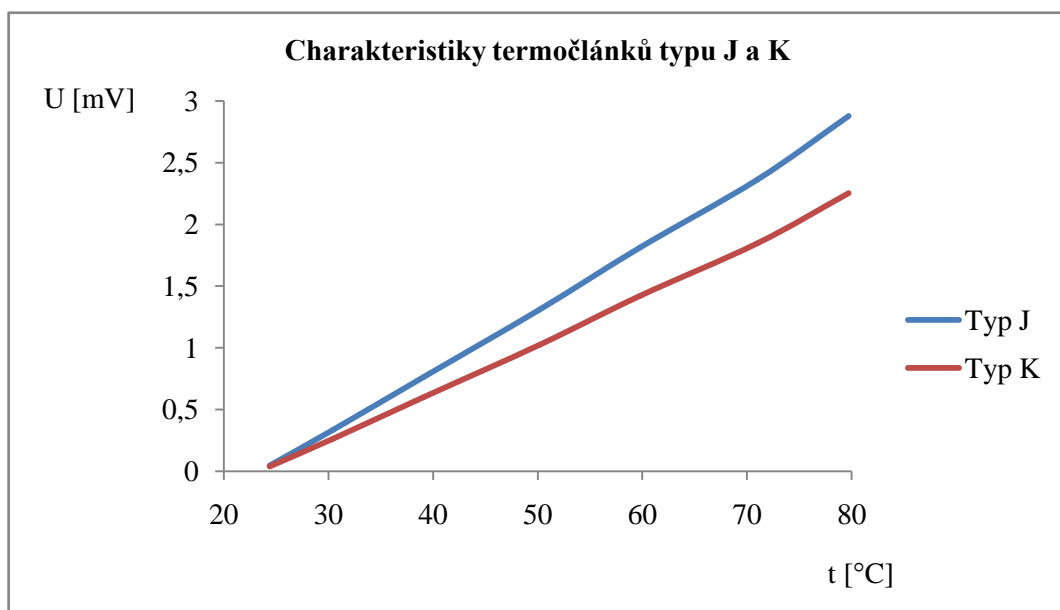
Obrázek 21: Celkový vzhled navržené konstrukce úlohy



Obrázek 22: Kompletní měřicí sestava experimentální úlohy

11 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

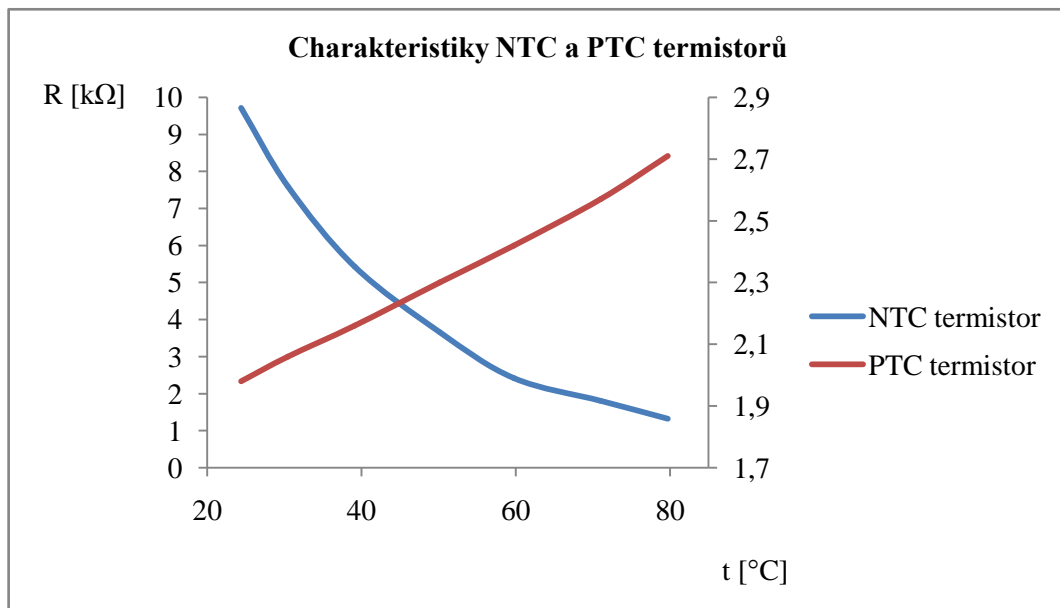
Pro ověření funkčnosti výše uvedené zrealizované experimentální úlohy byla provedena série měření zaměřených na základní výstupní statické charakteristiky jednotlivých senzorů určených na dotykové měření teploty, viz kapitola 8. Výsledky z měření, jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, jsou uvedeny v příloze číslo P I. Z této přílohy je patrné, že měření se provádělo pro 7 různých teplot měřeného tělesa a to v rozsahu od 24°C do 80°C. Pro každou zvolenou teplotu byl proveden celkem 10x odečet hodnot výstupních signálů včetně teploty a to z důvodu získání reálnější představy o měřených údajích. Hodnoty získané z měření jsou uvedeny v tab. 1 až 7, které jsou součástí přílohy P I. Z těchto hodnot byly následně stanoveny minima, maxima, průměrné hodnoty a směrodatné odchylky, které jsou uvedeny v tab. 1 až 7 přílohy P I. Z těchto průměrných hodnot byly sestaveny základní statické charakteristiky, viz obrázky 23 - 25. Z těchto uvedených výstupních charakteristik je patrné, že mají předpokládaný průběh, dle získaných teoretických poznatků, které jsou uvedeny v kapitole 3, 4, 6 a 8. Charakteristiky ověřují závislosti změn výstupních signálů na teplotě jednotlivých senzorů.



Obrázek 23: Charakteristiky termočlánků typu J a K

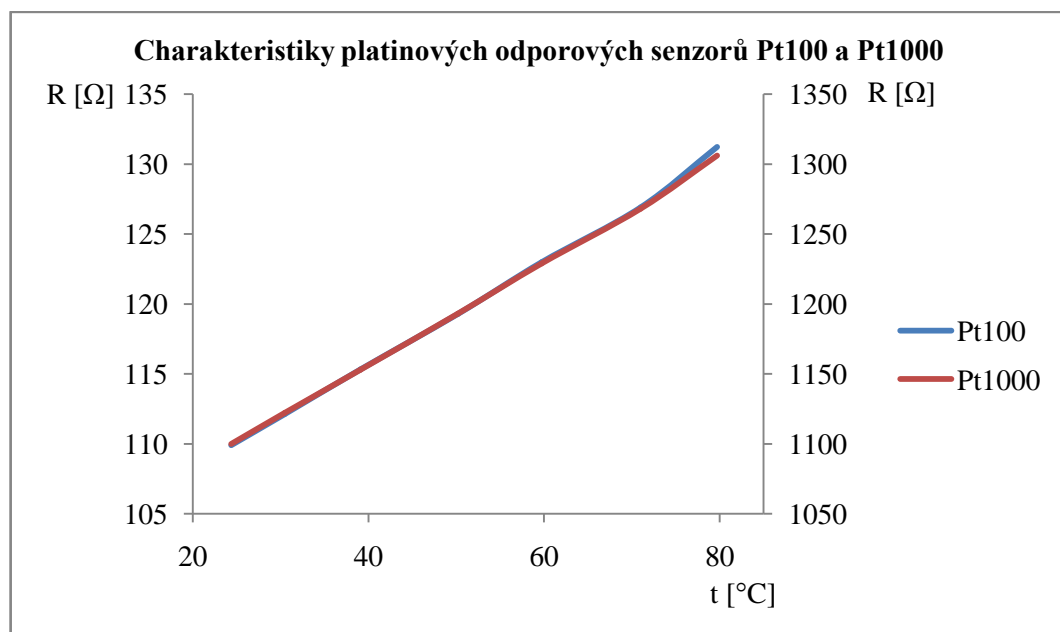
Výstupní statická charakteristika u termočlánků obou zvolených typů vyšla lineární. Případná nelineárnost charakteristiky je způsobena nepřesností měření, která je patrná i u všech dalších měření. Nejvíce je viditelná deformace charakteristik v rozsahu teplot od 60°C do 80°C. Možný důvod této nepřesnosti je popsán níže. U termočlánků

charakteristika potvrzuje, že růst výstupního napětí je strmější u typu J v porovnání s typem K.



Obrázek 24: Charakteristiky NTC a PTC termistorů

U NTC termistoru se prokázalo, že s rostoucí teplotou odpor klesá a to exponenciálně. Případná deformace charakteristiky je způsobená nepřesností měření. Z charakteristiky PTC termistoru vyplívá, že zvolený typ termistoru má v rozsahu námi měřených hodnot přibližně lineární charakteristiku s rostoucí tendencí. Pokud by se ale měření provádělo při větším rozsahu teplot, vznikla by charakteristika nelineární.



Obrázek 25: Charakteristiky platinových odporových senzorů Pt100 a Pt1000

U senzorů Pt100 a Pt1000 vyšla charakteristika téměř lineární, která se až při teplotách v rozsahu od 60°C do 80°C mírně deformuje. Oba senzory mají téměř shodný růst odporu, liší se pouze ve velikosti výstupních hodnot.

Výše uvedené statické charakteristiky potvrzují principy vybraných senzorů a výstupní signály senzorů uvedené v kapitolách 3, 4, 6 a 8.

Na základě zkušeností získaných z realizace zmiňované úlohy a z provedeního měření uvedeného v příloze P I, byl proveden můj návrh na zadání k vytvořené úloze ve formě externí přílohy vedené pod názvem „Návrh zadání na měření laboratorní úlohy“, která je součástí výstupu této práce. Mimo jiné tato příloha obsahuje i technickou dokumentaci k jednotlivým senzorům, která je nutná pro správné měření. Jelikož se jedná o objemnou část informací, tak jsem se rozhodl tyto dokumenty uvést pouze ve výše uvedené příloze a ne přímo v této práci. V práci se pouze na tyto dokumenty odkazují.

Při měření bylo zjištěno, že stávající způsob regulace vytápění není příliš vhodný. Po připojení výhřevu na napájení bylo obtížné odhadnout správnou chvíli, kdy manuálně napájení odpojit, protože po odpojení napájení výhřevu teplota ještě nějakou dobu stoupala. Bylo tedy nutné napájení odpojit přibližně 5°C před požadovanou teplotou a čekat na ustálení teploty. Na této ustálené hodnotě teprve provést sérii měření. Dalším problémem bylo, že při provádění odečtu hodnot se těleso vlivem prostředí ochlazovalo a než byly provedeny všechny odečty, tak teplota tělesa klesala řádově o 1 až 2°C. Z těchto důvodů by bylo vhodné použít pro hlídání teploty regulátor. Po konzultaci s vedoucím práce bych jako vhodný regulátor teploty doporučil např. GIR 230 Pt, viz obrázek 26. Jedná se o regulátor teploty se vstupem pro Pt100 a Pt1000. Na vstup regulátoru se připojí vhodný typ senzoru, který by byl připevněn na vyhřívané těleso, jehož prostřednictvím by regulátor reagoval na změnu teploty tělesa. V tomto případě by se na regulátor připojil senzor Pt100 nebo Pt1000, ale vyrábějí se i v provedení pro NTC termistor nebo termočlánek. Regulátor je vybaven LED displejem, pro zobrazení nastavené teploty, kterou lze nastavit s přesností desetiny stupně. Cena regulátoru se pohybuje kolem 3500Kč vč. DPH. Bohužel z finančních důvodů tento regulátor nebylo již možné dokoupit. Po konzultaci s vedoucím práce jsem byl ujištěn, že se toto bude určitě řešit dodatečně a nutné finanční prostředky byly přislíbeny vedením UEM (Ústavu elektroniky a měření) pod který daná laboratoř spadá. Celková cena úlohy byla přibližně 2200Kč vč. DPH, z toho cena za samotné senzory byla cca 1600Kč vč. DPH a za konstrukční prvky, spojovací materiál a ostatní cca 600Kč vč. DPH.



Obrázek 26: Regulátor GIR 230 Pt [15]

Dále musím podotknout, že jsem při zpracování své práce nepoužil jednu z doporučených literatur a to:

MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 199 s. ISBN 8073001144.

Zaměření této literatury je především na principy využívané u magnetických, ultrazvukových, optických a indukčních senzorů a tudíž pro problematiku, tj. dotykové měření teploty, kterou jsem se zabýval já, je nevhodná. Místo této literatury jsem použil jiné vhodnější zdroje, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

ZÁVĚR

Cíl práce pojednává o problematice senzorů na dotykové měření teploty. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá základními pojmy problematiky a především rozdělením senzorů teplot a následně jejich principy. Sensory jsou rozděleny do dvou skupin a to dilatační a elektrické. Z těchto dvou skupin se práce více zabývá elektrickými senzory teploty, které jsou dále děleny na odporové, s PN přechodem a termočláňkové. Z hlediska principu senzoru se liší jejich výstupní signály, kterými může být odpor nebo napětí. Na základě výstupních signálů se u senzorů liší základní statické charakteristiky.

V praktické části byla pro ověření principů některých senzorů vytvořena experimentální úloha. Účelem úlohy je obeznámení studentů předmětu Sensory se základními principy senzorů na dotykové měření teploty. V práci je popsán výběr vhodných senzorů, návrh, realizace a následné ověření funkčnosti včetně zhodnocení výsledků. Při výběru vhodných senzorů byl kladen požadavek na dostupnost, cenu a běžné konstrukční provedení. Jako vhodné senzory byly vybrány NTC, PTC termistor, termočláňky typu J a K, senzory Pt100 a Pt1000. Tyto senzory splňovaly dané požadavky. Z důvodu porovnání výstupních signálů senzorů byly zvoleny některé senzory pracující na stejném principu. Po výběru vhodných senzorů následuje návrh a realizace úlohy. V návrhu jsou popsány jednotlivé prvky, ze kterých je úloha složena. Obsah realizace pojednává o postupu při konstruování úlohy. Následovalo ověření funkčnosti realizované úlohy, které bylo prováděno sérií měření výstupních signálů senzorů při různých teplotách. Z naměřených hodnot byly vytvořeny základní statické charakteristiky, na jejich základě byly ověřeny principy zvolených senzorů, které jsou uvedeny v teoretické části. Po provedeném měření následuje zhodnocení výsledků, které obsahuje charakteristiky pro měřené senzory a vzniklé problémy při měření. O měření byla vytvořena zpráva, která je zpracována formou protokolu, dle požadavků daného předmětu. Tato zpráva z měření je součástí přílohy práce. Jako externí příloha práce je uveden návrh na měření laboratorní úlohy, který obsahuje pokyny pro provedení měření na laboratoři daného předmětu včetně technických specifikací zvolených senzorů.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Aim of the work deals with the problems of the touch sensors for temperature measuring. The work is divided into theoretical and practical part. The theoretical part deals with the basic concepts and issues by the transformation of temperature sensors and consequently their principles. The sensors are divided into two groups - expansion and electric. For these two groups, work more deals with electrical temperature sensors, which are further divided into resistance, with a PN junction and thermocouple. In terms of the principle of the sensor varies its output signals, which may be resistance or voltage. Based on the output signals of the sensors with different basic static characteristics.

In the practical part was to verify the principles of some sensors designed experimental tasks. The purpose of the role is familiarizing students enrolled Sensors with basic principles of the touch sensors measuring temperature. The paper describes the selection of suitable sensors, design, implementation, and subsequent verification of functionality including an evaluation of the results. When selecting a suitable sensors was a demand for availability, price and standard construction. Suitable sensors were chosen NTC, PTC thermistors, thermocouples type J and K, Pt100 and Pt1000 sensors. These sensors meet the requirements. For reasons of comparison output signals of the sensors were chosen some sensors operating on the same principle. After selecting the appropriate sensor follows the design and implementation tasks. The proposal describes the different elements of which it is composed task. The content deals with the implementation of a procedure for the design task. Followed by verification of functionality implemented tasks that were carried out a series of measurements of output signals of sensors at different temperatures. The measured values were established basic static characteristics, on the basis of the proven principles selected sensors that are listed in the theoretical part. After the measurement is followed by evaluation results, which contains characteristics of sensor measurements and the resulting measurement problems. The measurements were made message that is processed by the protocol, according to the article. This report is part of the measure to supplement the work. As an external enclosure work is presented a proposal for measuring laboratory work, which includes instructions for performing the laboratory measurements of the subject, including technical specifications for selected sensors.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Historie teploměru. *API - Akademie produktivity a informací s.r.o* [online]. 2011 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://e-api.cz/page/70309.historie-teplomeru/>
- [2] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. ISBN 8073001454.
- [3] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1999, 315 s., 351 obr. ISBN 8001020576.
- [4] Přehled teplotních stupnic. *Převod fyzikálních jednotek* [online]. 2000 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.prevod.cz/popis.php?str=220&parent=y>
- [5] HRUŠKA, František. *Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití (e-book)*. 2. rozš. vyd. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, [202] s. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [6] HRUŠKA, František. *Technické prostředky automatizace IV*. Vyd. 2. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2003, 107 s. ISBN 80-731-8131-2.
- [7] HRUŠKA, František. *Technické prostředky automatizace III: (senzory, jejich principy a funkce)*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2002. ISBN 80-731-8053-7.
- [8] MAĚÁTKO, Jan. *Elektronika: Učeb. text pro stř. prům. šk.* 3. vyd, 1.vyd. v Idea servis. Praha: Idea servis, 1995. ISBN 80-859-7000-7.
- [9] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: [učebnice]*. 1. vyd.. České Budějovice: Kopp, 2004, 286 s. ISBN 80-723-2171-4.
- [10] Seebeckův jev. *Fyzika :: MEF* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [11] NTC termistor Epcos - Datasheet. *TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky*[online]. 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/9a126ab33fc4dac38b4dbaab3cf96753/B57703.pdf>
- [12] KTY81-210 - Datasheet. *GM elektronik* [online]. 2008 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/530/530-019/dsh.530-019.1.pdf>

- [13] Příručka pro konstruktéry, projektanty a realizátory MaR - odporové snímače teploty. *Sensit: snímače teploty, Pt100, sondy, převodníky* [online]. 2011 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.sensit.cz/ke-stazeni/soubory/Prirucka_CZ_A5_2012_08.pdf
- [14] *TME Czech Republic s.r.o.: Elektronické součástky* [online]. 2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/>
- [15] GIR 230 Pt: Regulátor teploty se vstupem pro Pt100 a Pt1000. *GHM-GREISINGER s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://www.bartex.cz/Default3.aspx?ln=cs&guid=6dca3ece-bd63-481c-b18a-aabe4d284f6a&id=180&stm=>
- [16] Pt 1000 - Datasheet. *Sensit: Snímače teploty, Pt100, sondy, převodníky* [online]. 2008 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: http://www.sensit.cz/ke-stazeni/soubory/Pt1000_3850.pdf
- [17] Pt 100 - Datasheet. *Sensit: Snímače teploty, Pt100, sondy, převodníky* [online]. 2010 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: http://www.sensit.cz/ke-stazeni/soubory/Pt100_3911.pdf
- [18] Referenční tabulky: KC90 - Termočlánek "J". *JSP.cz - měření a regulace* [online]. 2005 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://www.jsp.cz/files/c0090kpcz.pdf>
- [19] Referenční tabulky: KC90 - Termočlánek "K". *JSP.cz - měření a regulace* [online]. 2005 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://www.jsp.cz/files/c0091kpcz.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

NTC Negative Temperature Coefficient.

PTC Positive Temperature Coefficient.

SMD Surface Mount Device.

DPH Daň z Přidané Hodnoty

NZ Návrh Zadání

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Srovnání teplotních stupnic [4]	14
Obrázek 2: Vzduchový termoskop [1]	15
Obrázek 3: Charakteristiky pro termistor a pozistor [5]	26
Obrázek 4: Vznik polovodiče typu N a typu P [9]	28
Obrázek 5: Princip termoelektrického článku [10]	31
Obrázek 7: Charakteristika NTC termistoru	38
Obrázek 6: Rozměry [11] a vzhled NTC termistoru	38
Obrázek 8: Ukázka pouzdra SOD70 [12]	39
Obrázek 9: PTC termistor KTY 81-210	39
Obrázek 10: Charakteristika PTC termistoru	40
Obrázek 11: Provedení termočlánků, vlevo typ K a vpravo typ J	41
Obrázek 12: Charakteristika termočlánku typu K a J	42
Obrázek 13: Senzory Pt100 (vlevo) a Pt1000 (vpravo)	43
Obrázek 14: Charakteristika platinového odporového senzoru Pt100 a Pt1000	43
Obrázek 15: Blokové schéma experimentální úlohy	44
Obrázek 16: Hliníková tyč obdélníkového průřezu	45
Obrázek 17: Metal oxidové rezistory 20W	45
Obrázek 18: Experimentální kovová deska	46
Obrázek 19: Rozmístění senzorů	48
Obrázek 20: Základna včetně tělesa a svorkovnic	49
Obrázek 21: Celkový vzhled navržené konstrukce úlohy	50
Obrázek 22: Kompletní měřicí sestava experimentální úlohy	50
Obrázek 23: Charakteristiky termočlánků typu J a K	51
Obrázek 24: Charakteristiky NTC a PTC termistorů	52
Obrázek 25: Charakteristiky platinových odporových senzorů Pt100 a Pt1000	52
Obrázek 26: Regulátor GIR 230 Pt [15]	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Typy termoelektrických článků [2]	32
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

P I: Zpráva z měření

P II: Návrh zadání na měření laboratorní úlohy

PŘÍLOHA P I: ZPRÁVA Z MĚŘENÍ

Níže uvedená zpráva byla zpracována ve formě protokolu a to dle požadavků laboratoří předmětu Senzory. Byla provedena za účelem ověření funkčnosti realizované experimentální úlohy

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky			
Jméno a příjmení	Michal Zajíc	Ročník	třetí
Předmět	Laboratorní cvičení z předmětu Senzory	Datum měření	21. 5. 2013
Název úlohy	Dotykové měření teploty	Hodnocení	

Cíl úlohy:

Měření a vyhodnocení základních statických charakteristik pro senzory teploty NTC, PTC termistor, Pt100, Pt1000, termočlánek typu J a K.

Teoretický úvod k daným sensorům:

Odporové senzory teploty

Odporové senzory teploty pracují na fyzikálním principu, který popisuje závislost elektrického odporu kovů nebo polovodičů na teplotě. Změna odporu senzoru je ovlivňována teplotou okolí, jemuž je senzor vystaven. Při vystavení senzoru teplotě, se tato veličina přenáší do materiálu senzoru a tím se mění jeho odpor. Senzory jsou vyráběny nejčastěji z kovových (platinové odporové senzory,...) nebo polovodičových materiálů (termistory,...), přičemž tento materiál musí být chemicky i fyzikálně stálý, aby byla zajištěna správná funkce senzoru.

Termistory

Termistory jsou polovodičové odporové senzory pro měření teploty. Termistory mají velkou nelinearitu závislosti odporu na teplotě. Jedná se tedy o nelineární prvek. Pro výrobu termistoru se využívá feroelektrických keramických materiálů, což umožňuje výrobu termistorů v různých tvarech, kterými jsou např. destička, váleček, kapka, disk a další tvary. Termistory dosahují v určité oblasti vysoké citlivosti, což znamená, že mají velkou změnu odporu na jednotku teploty.

Termistory můžeme podle použitého materiálu rozdělit na termistory:

- s amorfni (beztvarou) strukturou
- s polykrystalickou strukturou

Další dělení termistorů je z hlediska teplotního součinitele. Termistory mohou mít buď záporný, nebo kladný teplotní součinitel. Z tohoto hlediska se poté termistory dělí na termistory se záporným teplotním součinitelem, tzv. negastory (NTC termistory) a termistory s kladným teplotním součinitelem, tzv. pozistory (PTC termistory).

NTC termistory - negastory

Negastory jsou jeden typ termistoru. V dnešní době se ale většinou setkáme s označením negastoru jako termistor, popřípadě NTC termistor. Termistory mají záporný součinitel odporu, což znamená, že při zvyšování teploty odpor termistoru klesá. Termistory se vyrábí práškovou technologií, která spočívá v lisování a následným slinováním ve vysokých teplotách, ze směsi oxidů kovů. Teplotní rozsahy termistorů pro běžné použití jsou od -80°C do 200°C . Vyrábějí se také termistory pro speciální použití, u nichž je teplotní rozsah od velmi nízkých teplot jako je 4,2 K až do 1000°C . Termistory mají pětikrát až padesátkrát větší teplotní součinitel než kovy, ale zároveň jejich závislost odporu na teplotě je značně nelineární. Tato nelinearita má za následek velkou citlivost senzoru v určité oblasti.

PTC termistory - pozistory

Pozistor je stejně tak jako termistor nelineární součástka. Jeho teplotní součinitel odporu je ale kladný, což má za následek růst odporu při růstu teploty. Při růstu teploty od záporných hodnot nejprve odpor mírně klesá. V další části při dosažení tzv. Curierovy teploty, která bývá od 60°C do 180°C podle druhu materiálu, odpor prudce roste až do dosažení další tepelné hranice, kdy dojde k zastavení růstu odporu a následnému mírnému poklesu. Využití pozistorů je časté v limitních snímačích a u snímačů pro spojitě měření teplot v úzkém pásmu teplot. Na výrobu se využívá polykrystalické feroelektrické keramiky, kterou je např. titaničitan barnatý. Stejně jako termistory se pozistory vyrábí v různých tvarových provedeních.

Platinové odporové senzory teploty

Jako jeden z materiálů na výrobu odporových senzorů teploty se využívá platina, která se vyznačuje časovou stálostí, chemickou netečností a také vysokou teplotou tání. Platinové

senzory jsou vyrobeny buď z platinového drátu, který má průměr 0,045mm, nebo z platinové folie, která je umístěna na keramické podložce. U drátových senzorů je pak vinutí jednoduché nebo dvojité. Senzory se vyrábějí se dvěma nebo čtyřmi vývody a tvar senzorů je buď plochý, nebo válcovitý. Na výrobu obalů a nosných destiček senzorů se používá keramika, sklo, slída nebo umělá hmota. Dále se senzory vyrábějí metodou napařování kovu na podložku. Při tomto způsobu se využívá buď tenkovrstvé nebo tlustovrstvé technologie. Vrstva kovu se nanese na nosnou podložku a následně se vyhodnocuje změna odporu této vrstvy.

Při výrobě se musí využívat platina se správnou čistotou. Čistota je určena normou a předepisuje poměr elektrického odporu $W_{100} = 1,385$. Platina, která se využívá pro metrologické účely, musí mít čistotu 99,999%. Pro posouzení čistoty kovu se vyhodnocuje poměr odporů při teplotě tání galia a trojného bodu vody.

Platinové odporové senzory teploty pro průmyslové použití se dělí do dvou tolerančních tříd. Senzory jsou rozděleny do toleranční třídy A a B na základě standartu IEC-751. Toleranční třída A stanovuje rozsah teploty od -200°C do 650°C a toleranční třída B je pro rozsah teploty od -200°C do 850°C . Vyrábějí se také senzory, které nesplňují rozsah tolerančních tříd dle IEC-751 a ty jsou nazývány vysokoteplotními senzory a jejich rozsah teploty sahá až do 1100°C .

Termoelektrické články

Termoelektrické články neboli termočlánky jsou dalšími senzory pro měření teploty. Termoelektrické články se skládají se dvou kovů nebo polovodičů, které jsou uvnitř termočlánku spojeny ve dvou bodech. Při změně teploty v místě spoje začne vznikat napětí, které je závislé na teplotě. Na výstupu termoelektrického článku, nebo také termočlánku máme tedy výstupní napětí, které se pohybuje v řádu mV. Termočlánky jsou založeny na principu Seebeckova jevu.

Seebeckův jev

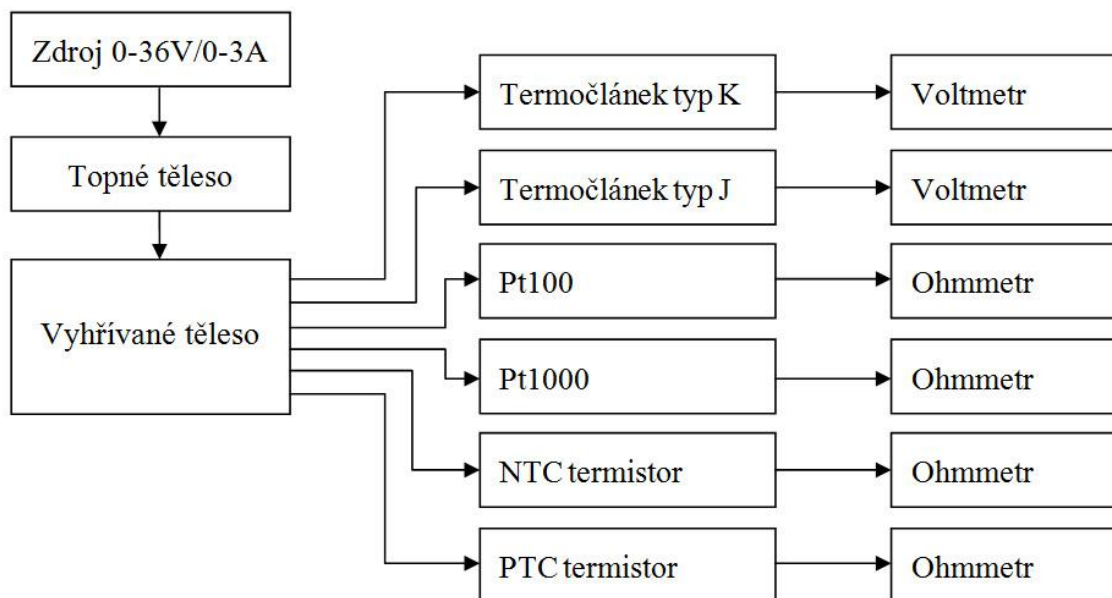
V termoelektrických člancích se využívá principu Seebeckova jevu, což je převod tepelné energie na energii elektrickou. Uvnitř termočlánku jsou dva různé kovy nebo polovodiče, které jsou ve dvou bodech spojeny. Můžeme si to představit jako dva kusy drátu, které jsou na svých koncích vzájemně spojeny. Princip termoelektrického článku potom spočívá v tom, že pokud budeme jeden spoj těchto dvou kovů zahřívat, bude se měnit tzv. termoelektrické napětí mezi dvěma spoji.

Princip Seebeckova jevu spočívá v tom, že v teplejší části vodiče nebo polovodiče mají nositelé nábojů větší energii. Z důvodu větší energie začnou tyto náboje pronikat do chladnější části. Po proniknutí nábojů vznikne na jedné straně vodiče jednostranná převaha nábojů a to buď kladných nebo záporných. Mezi jednotlivými spoji poté vznikne termoelektrické napětí.

Výše uvedené informace se týkají všeobecně senzorů teploty, které jsou využity v laboratorní úloze. Podrobnější technické specifikace týkající se jednotlivých senzorů jsou uvedeny v přílohách P1 až P6 - NZ, která je externí přílohou práce.

Obecný popis úlohy:

Hliníkové těleso je vyhříváno na teplotu od 30°C až po 80°C za pomoci dvou metal oxidových rezistorů, každý o výkonu 20W. Reálná teplota tělesa je měřena digitálním dotykovým teploměrem. Přímo na tělese jsou umístěny senzory, na nichž se měří výstupní signály za pomoci ohmmetru nebo voltmetru. Naměřené hodnoty se vyhodnotí a z nich se vytvoří základní statické charakteristiky senzorů.



Obr. 1: Blokové schéma zapojení

Postup měření:

Na zdroji napětí bylo nastaveno výstupní napětí 20V a proud 1,8A. Regulace teploty byla prováděna manuálním zapínáním a vypínáním výstupu zdroje. Měření výstupních signálů bylo prováděno pro 7 různých teplot, nejprve pro pokojovou teplotu a následně v rozsahu od 30°C až do 80°C po kroku 10°C. Při každé teplotě byly změřeny všechny výstupní signály včetně teploty 10x. Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek a následně byly určeny minima, maxima, průměrné hodnoty a směrodatné odchylky. Z vypočítaných průměrných hodnot byly vytvořeny statické charakteristiky pro jednotlivé senzory.

Použité měřicí přístroje a zařízení:

Napájecí zdroj: ARRAY 3645A 0-36V/0-3A DC
Digitální stolní multimetr*: Agilent 34401A 6 1/2 Digit Multimeter
Digitální multimetr**: CEM DT-9602
Digitální dotykový teploměr: KIMO TM200

Pozn:

**Pro měření výstupních signálů z termočlánků je potřeba využít digitálního stolního multimetru Agilent 34401A z důvodu nízkého výstupního napětí termočlánků, které je v řádu milivoltů.*

***Pro měření ostatních senzorů jsou svým rozsahem dostačující ruční multimetry CEM DT-9602.*

Vypracování:

Tabulky naměřených hodnot:

Pokožová teplota							
Číslo měření	Teplota t [°C]	Termočlánek typ J U_j [mV]	Termočlánek typ K U_k [mV]	NTC termistor R_{ntc} [kΩ]	PTC termistor R_{ptc} [kΩ]	Pt100 R_{pt100} [Ω]	Pt1000 R_{pt1000} [kΩ]
1.	24,600	0,058	0,045	9,670	1,990	109,900	1,100
2.	24,400	0,055	0,044	9,690	1,980	109,900	1,100
3.	24,400	0,053	0,041	9,690	1,980	109,900	1,100
4.	24,300	0,050	0,040	9,700	1,980	109,900	1,100
5.	24,400	0,049	0,039	9,700	1,990	109,900	1,100
6.	24,300	0,047	0,037	9,710	1,980	109,900	1,100
7.	24,400	0,045	0,036	9,720	1,980	109,900	1,100
8.	24,300	0,043	0,034	9,730	1,980	109,900	1,100
9.	24,300	0,042	0,034	9,730	1,980	109,900	1,100
10.	24,400	0,041	0,033	9,740	1,980	109,900	1,100
Min.	24,300	0,041	0,033	9,670	1,980	109,900	1,100
Max.	24,600	0,058	0,045	9,740	1,990	109,900	1,100
Průměr	24,380	0,048	0,038	9,710	1,980	109,900	1,100
Sm.odch.	0,087	0,005	0,004	0,021	0,004	0,000	0,000

Tab. 1*: Naměřené hodnoty při pokojové teplotě

Požadovaná teplota 30°C							
Číslo měření	Teplota t [°C]	Termočlánek typ J U_j [mV]	Termočlánek typ K U_k [mV]	NTC termistor R_{ntc} [kΩ]	PTC termistor R_{ptc} [kΩ]	Pt100 R_{pt100} [Ω]	Pt1000 R_{pt1000} [kΩ]
1.	30,500	0,342	0,276	7,500	2,060	112,300	1,123
2.	30,800	0,347	0,276	7,510	2,060	112,200	1,122
3.	30,700	0,348	0,274	7,530	2,060	112,200	1,123
4.	30,500	0,345	0,272	7,550	2,060	112,200	1,122
5.	30,600	0,343	0,270	7,570	2,060	112,200	1,121
6.	30,500	0,340	0,267	7,600	2,060	112,100	1,122
7.	30,400	0,335	0,261	7,640	2,060	112,100	1,121
8.	30,300	0,330	0,258	7,680	2,050	112,000	1,121
9.	30,200	0,322	0,251	7,710	2,050	112,000	1,120
10.	30,100	0,315	0,246	7,750	2,050	111,900	1,120
Min.	30,100	0,315	0,246	7,500	2,050	111,900	1,120
Max.	30,800	0,348	0,276	7,750	2,060	112,300	1,123
Průměr	30,460	0,337	0,265	7,600	2,060	112,120	1,122
Sm.odch.	0,206	0,011	0,010	0,083	0,005	0,117	0,001

Tab. 2*: Naměřené hodnoty při požadované teplotě 30°C

Požadovaná teplota 40°C							
Číslo měření	Teplota t [°C]	Termočlánek typ J U _j [mV]	Termočlánek typ K U _k [mV]	NTC termistor R _{ntc} [kΩ]	PTC termistor R _{ptc} [kΩ]	Pt100 R _{pt100} [Ω]	Pt1000 R _{pt1000} [kΩ]
1.	39,700	0,790	0,633	5,240	2,180	115,700	1,157
2.	39,800	0,800	0,636	5,250	2,170	115,700	1,157
3.	39,700	0,801	0,632	5,270	2,170	115,600	1,156
4.	39,600	0,796	0,625	5,310	2,170	115,500	1,155
5.	39,400	0,784	0,614	5,390	2,160	115,400	1,154
6.	39,000	0,764	0,598	5,450	2,160	115,200	1,153
7.	39,000	0,753	0,588	5,500	2,160	115,200	1,151
8.	38,600	0,737	0,576	5,570	2,160	115,000	1,150
9.	38,300	0,722	0,564	5,630	2,150	114,900	1,150
10.	38,100	0,711	0,556	5,680	2,150	114,900	1,149
Min.	38,100	0,711	0,0556	5,240	2,150	114,900	1,149
Max.	39,800	0,801	0,636	5,680	2,180	115,700	1,157
Průměr	39,120	0,766	0,602	5,430	2,160	115,310	1,153
Sm.odch.	0,588	0,032	0,029	0,154	0,009	0,298	0,003

Tab. 3*: Naměřené hodnoty při požadované teplotě 40°C

Požadovaná teplota 50°C							
Číslo měření	Teplota t [°C]	Termočlánek typ J U _j [mV]	Termočlánek typ K U _k [mV]	NTC termistor R _{ntc} [kΩ]	PTC termistor R _{ptc} [kΩ]	Pt100 R _{pt100} [Ω]	Pt1000 R _{pt1000} [kΩ]
1.	51,900	1,387	1,093	3,420	2,320	120,000	1,200
2.	51,500	1,376	1,081	3,470	2,310	119,800	1,198
3.	51,200	1,363	1,068	3,500	2,310	119,700	1,196
4.	50,900	1,347	1,055	3,560	2,300	119,500	1,195
5.	50,400	1,328	1,038	3,630	2,300	119,400	1,194
6.	50,100	1,308	1,022	3,700	2,290	119,200	1,192
7.	49,700	1,285	1,005	3,720	2,290	119,100	1,191
8.	49,100	1,260	0,981	3,810	2,280	118,800	1,188
9.	48,700	1,233	0,9616	3,860	2,280	118,700	1,187
10.	48,300	1,209	0,9425	3,940	2,270	118,500	1,185
Min.	48,300	1,209	0,943	3,420	2,270	118,500	1,185
Max.	51,900	1,387	1,093	3,940	2,320	120,000	1,200
Průměr	50,180	1,310	1,025	3,660	2,300	119,270	1,193
Sm.odch.	1,159	0,058	0,049	0,166	0,015	0,473	0,005

Tab. 4*: Naměřené hodnoty při požadované teplotě 50°C

Požadovaná teplota 60°C							
Číslo měření	Teplota t [°C]	Termočlánek typ J U _j [mV]	Termočlánek typ K U _k [mV]	NTC termistor R _{ntc} [kΩ]	PTC termistor R _{ptc} [kΩ]	Pt100 R _{pt100} [Ω]	Pt1000 R _{pt1000} [kΩ]
1.	60,800	1,850	1,470	2,450	2,440	123,600	1,235
2.	60,700	1,857	1,470	2,460	2,440	123,500	1,235
3.	60,600	1,856	1,463	2,490	2,440	123,400	1,234
4.	60,400	1,847	1,451	2,510	2,430	123,300	1,232
5.	60,100	1,833	1,440	2,550	2,430	123,100	1,230
6.	59,700	1,816	1,423	2,590	2,420	122,900	1,229
7.	59,500	1,798	1,407	2,630	2,420	122,800	1,227
8.	59,200	1,776	1,387	2,660	2,410	122,600	1,226
9.	58,400	1,750	1,366	2,720	2,400	122,400	1,224
10.	58,200	1,724	1,345	2,770	2,390	122,200	1,222
Min.	58,200	1,724	1,345	2,450	2,390	122,200	1,222
Max.	60,800	1,857	1,470	2,440	2,440	123,600	1,235
Průměr	59,760	1,811	1,422	2,420	2,420	122,980	1,229
Sm.odch.	0,887	0,045	0,042	0,105	0,017	0,456	0,004

Tab. 5*: Naměřené hodnoty při požadované teplotě 60°C

Požadovaná teplota 70°C							
Číslo měření	Teplota t [°C]	Termočlánek typ J U _j [mV]	Termočlánek typ K U _k [mV]	NTC termistor R _{ntc} [kΩ]	PTC termistor R _{ptc} [kΩ]	Pt100 R _{pt100} [Ω]	Pt1000 R _{pt1000} [kΩ]
1.	73,000	2,469	1,942	1,630	2,610	128,300	1,281
2.	72,900	2,463	1,935	1,690	2,600	127,700	1,277
3.	72,700	2,445	1,913	1,720	2,590	127,500	1,274
4.	72,100	2,420	1,892	1,750	2,580	127,300	1,272
5.	71,600	2,394	1,871	1,770	2,570	127,000	1,270
6.	71,000	2,365	1,845	1,810	2,570	126,800	1,267
7.	70,200	2,320	1,810	1,870	2,560	126,500	1,264
8.	69,600	2,288	1,785	1,910	2,540	126,200	1,262
9.	68,900	2,255	1,756	1,950	2,530	126,000	1,260
10.	68,200	2,216	1,727	1,990	2,530	125,700	1,257
Min.	68,200	2,216	1,272	1,630	2,530	125,700	1,257
Max.	73,000	2,469	1,942	1,990	2,610	128,300	1,281
Průměr	71,020	2,364	1,848	1,810	2,570	126,900	1,268
Sm.odch.	1,641	0,085	0,072	0,112	0,027	0,777	0,007

Tab. 6*: Naměřené hodnoty při požadované teplotě 70°C

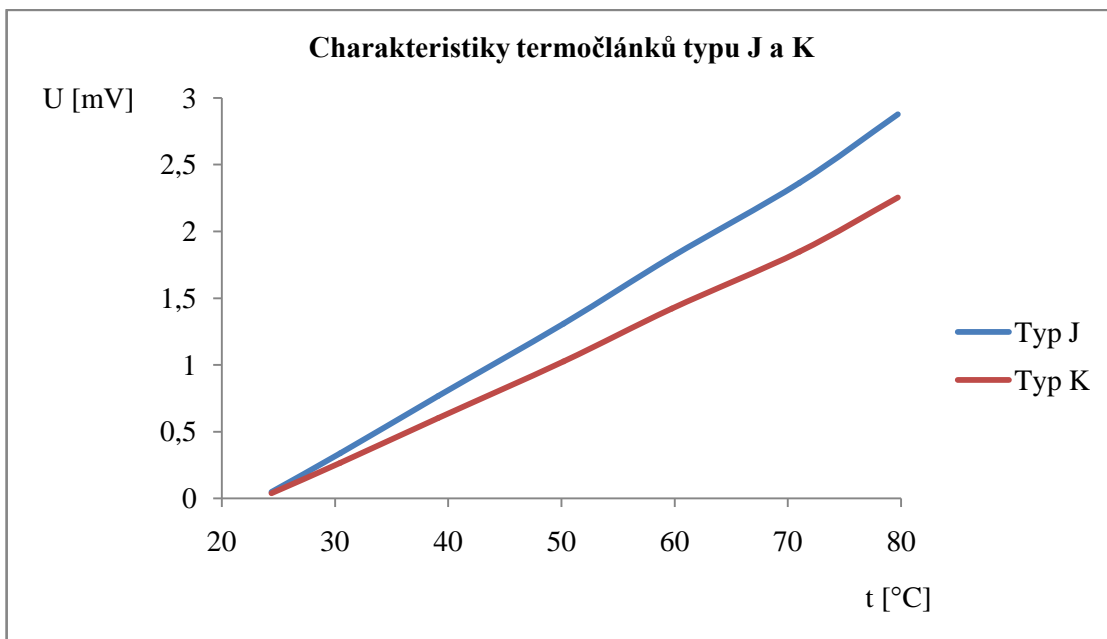
Požadovaná teplota 80°C							
Číslo měření	Teplota t [°C]	Termočlánek typ J U_j [mV]	Termočlánek typ K U_k [mV]	NTC termistor R_{ntc} [kΩ]	PTC termistor R_{ptc} [kΩ]	Pt100 R_{pt100} [Ω]	Pt1000 R_{pt1000} [kΩ]
1.	81,500	2,939	2,332	1,220	2,740	131,700	1,315
2.	81,400	2,956	2,334	1,220	2,740	137,600	1,315
3.	81,000	2,957	2,328	1,230	2,740	131,400	1,313
4.	80,900	2,942	2,306	1,260	2,720	131,100	1,310
5.	80,600	2,921	2,286	1,290	2,710	130,800	1,307
6.	79,700	2,880	2,247	1,330	2,700	130,500	1,304
7.	79,000	2,846	2,220	1,360	2,690	130,200	1,301
8.	78,300	2,810	2,192	1,390	2,680	129,900	1,300
9.	77,700	2,777	2,164	1,420	2,670	129,700	1,296
10.	77,000	2,742	2,135	1,450	2,660	129,400	1,294
Min.	77,000	2,742	2,135	1,220	2,660	129,400	1,294
Max.	81,500	2,957	2,334	1,450	2,740	137,600	1,315
Průměr	79,710	2,877	2,254	1,320	2,710	131,230	1,306
Sm.odch.	1,543	0,075	0,070	0,081	0,028	2,238	0,007

Tab. 7*: Naměřené hodnoty při požadované teplotě 80°C

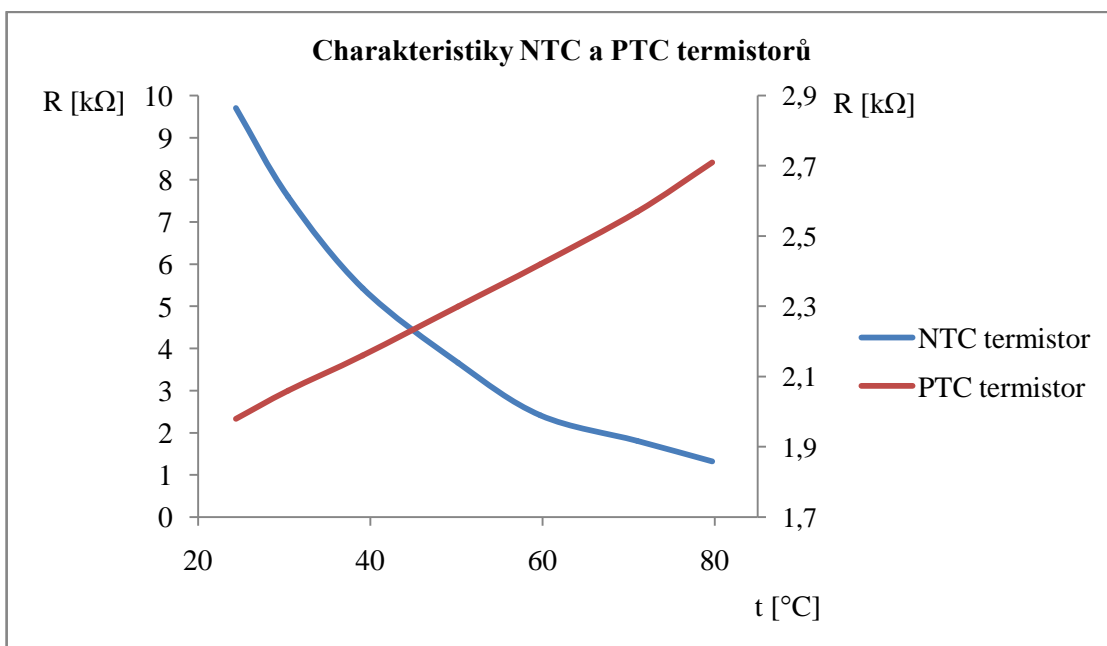
Pozn.:

**V předcházejících tabulkách jsou naměřené hodnoty uvedeny ve výstupních jednotkách, z důvodu představy reálných výstupních signálů jednotlivých senzorů.*

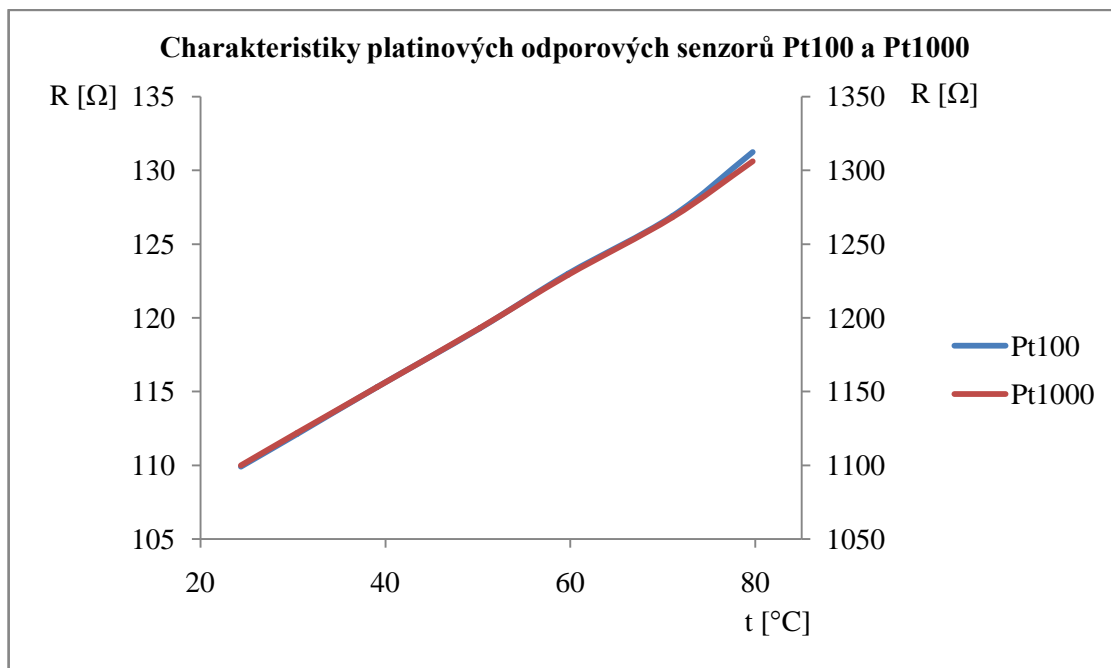
Z naměřených hodnot byly určeny minima, maxima, průměrné hodnoty a směrodatné odchylky. Pro výpočet směrodatné odchylky bylo využito tabulkového editoru Microsoft Excel. Z průměrných hodnot byly vytvořeny následující statické charakteristiky měřených senzorů.



Obr. 2: Charakteristiky termočlánků typu J a K



Obr. 3: Charakteristiky NTC a PTC termistorů



Obr. 4: Charakteristiky platinových odporových senzorů Pt100 a Pt1000

Vyhodnocení:

Na základě naměřených hodnot a z nich vytvořených statických charakteristik byly ověřeny principy jednotlivých senzorů, popsané v práci, viz kapitoly 3, 4, 6 a 8. Z charakteristik termočlánků vychází, že termočlánek typu J má strmější charakteristiku než termočlánek typu K. V dalším případě bylo ověřeno, že odpor NTC termistoru klesá exponenciálně. Charakteristika PTC termistoru vyšla rostoucí a přibližně lineární, což může být způsobeno malým rozsahem měřených teplot. Při měření ve větším rozsahu by charakteristika byla nelineární. Platinové odporové senzory Pt100 a Pt1000 mají lineární výstupní charakteristiky. Obě charakteristiky stoupají s téměř shodnou strmostí, liší se pouze ve velikosti výstupního signálu. Ve všech případech se u charakteristik projevila mírná deformace, která je nejvíce viditelná v rozsahu teplot od 60°C do 80°C. Tato deformace je způsobena nepřesností měření, jejíž možný důvod je popsán v kapitole 11.