

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Charakterizace tištěných flexibilních termistorů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal ŠULC**
Osobní číslo: **E13B0292P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Charakterizace tištěných flexibilních termistorů**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište používané typy termistorů, konstrukční provedení a materiálová složení, principy jejich funkce, základní parametry a charakteristiky, metody jejich měření a postupy kalibrace termistorů. Samostatně se věnujte problematice termistorů vyráběných tiskovými technikami.
2. Prakticky se seznamte s parametry a ovládáním termostatické lázně Lauda ProLine PJ 12 C, digitálního multimetru Keithley 2700 s multiplexerem a SMU jednotky Keithley 2600. Sestavte a popište měřicí systém pro základní teplotní charakterizaci termistorů s logováním dat do PC.
3. Proměřte $I(V)$, $R(I)$ a $R(t)$ charakteristiky předložených vzorků tištěných termistorů. Zhodnoťte vliv topologie termistorů na jejich chování.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Fraden Jacob. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 4. vyd. Springer-Verlag New York, 2010. ISBN 978-1-4419-6466-3.
2. Webster, John G. a Halit Eren. Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement. 2. vyd. CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4398-4889-0.
3. Childs Peter R. N. Practical temperature measurement. Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0 7506 5080 X.
4. Alexander, Matthew D. a Kerry T.B. Macquarrie. Toward a Standard Thermistor Calibration Method: Data Correction Spreadsheets. Ground Water Monitoring and Remediation [online]. 2005, roč. 25, č. 4, s. 7581 [vid. 12. duben 2015]. ISSN 1069-3629. Dostupné z: doi:10.1111/j.1745-6592.2005.00050.x
5. Elektronické informační zdroje (ScienceDirect, IEEE Xplore, Wiley Online Library, AIP Scitation, Google Scholar, ResearchGate.) Produktové stránky laboratorních zařízení:
<http://www.lauda-brinkmann.com/calibration.html>.
<http://www.keithley.com/products/data/datalogger/mn=2700>.
<http://www.keithley.com/products/dcac/currentvoltage/2600B>.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Silvan Pretl


Regionální inovační centrum elektrotechniky

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

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na termistory především pak na tištěné flexibilní termistory.

Klíčová slova

Flexibilní elektronika, tištěná elektronika, termistory, senzory teploty.

Abstract

This bachelor thesis is focused on thermistors especially on printed flexible thermistors.

Key words

Flexible electronics, printed electronics, thermistors, temperature sensors.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 29.5.2016

Michal Šulc

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	1
ÚVOD	2
1 ZÁKLADNÍ POJMY Z OBORU MĚŘENÍ TEPLOT	3
1.1 TEPLOTA.....	3
1.2 TEPLOTNÍ STUPNICE	3
1.3 SENZORY PRO SNÍMÁNÍ TEPLoty	5
1.4 SOUČÁSTKY Z POLYKRystalického MATERIÁLU.....	6
1.5 POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty.....	6
2 TERMISTORY	7
2.1 TERMISTORY NTC.....	7
2.1.1 Charakteristiky a parametry	7
2.1.2 Možnosti využití	10
2.1.3 Konstrukční provedení	13
2.1.4 Kritéria pro výběr a korekce charakteristiky	14
2.1.5 Příklady použití.....	15
2.1.6 Metody měření termistorů.....	16
2.2 TERMISTORY PTC	23
2.2.1 Charakteristiky a parametry	23
2.2.2 Konstrukční provedení a značení.....	26
2.2.3 Příklady použití.....	27
3 FLEXIBILNÍ A TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA	29
3.1 HISTORIE FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKY	29
3.2 FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA	29
3.3 TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA	30
4 CHARAKTERIZACE TIŠTĚNÝCH FLEXIBILNÍCH TERMISTORŮ	31
4.1 FLEXIBILNÍ TIŠTĚNÉ TERMISTORY.....	31
4.1.1 Charakteristiky a parametry	31
4.1.2 Konstrukční provedení a značení.....	32
4.1.3 Možnosti využití	33
4.2 MĚŘENÍ TIŠTĚNÝCH FLEXIBILNÍCH TERMISTORŮ	33
4.2.1 Příprava vzorků k měření.....	33
4.2.2 Použité přístroje.....	34
4.2.3 Postup měření	36
4.2.4 Naměřené charakteristiky termistoru.....	37
4.2.5 Zhodnocení topologie.....	45
ZÁVĚR	50
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	51

Seznam symbolů a zkratek

A	Konstanta, daná materiálem termistoru a jeho geometrickým tvarem
S	Plocha vrstvy
B_T	Konstanta, daná materiálem termistoru a také závisí na teplotě termistoru T
G_{th}	Tepelná vodivost v mW/K
NTC	Záporný teplotní koeficient
L	Délka vrstvy
Q_1	Odebrané teplo teploměrovou látkou do lázně s teplotou T_1
Q_2	Odebrané teplo teploměrovou látkou z lázně s teplotou T_2
PTC	Kladný teplotní koeficient
PTF	Polymerní silná vrstva, z anglického názvu polymer thick film.
R	Hodnota odporu termistoru
R_m	Molární plynová konstanta ($R_m = 8,3143 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
R_S	Plošný odpor (Sheet Resistance)
R_T	Hodnota odporu v Ω při teplotě T
t	Celsiova teplota
t_s	Tloušťka vrstvy
T	Termodynamická teplota
T_a	Teplota okolí v K ($T_a = \vartheta_a + 273$)
TK	Teplotní koeficient
V	Objem plynu
W	Šířka vrstvy
ΔE	Šířka mezery mezi energetickými hladinami
η	Účinnost cyklu
ρ	Měrný odpor

Úvod

Cílem této bakalářské práce je celkové seznámení s používanými typy termistorů, jejich konstrukčním provedení a materiálovém složení.

Její náplní je základní seznámení s pojmy z oblasti měření teplot a rozdělení senzorů teplot. Dále se věnuje polovodičovým odporovým senzorům teploty, jejich základním parametrům, charakteristikám, postupům jejich kalibrace a metodám měření. Seznámí vás nejprve obecně s flexibilní tištěnou elektronikou a následně se bude podrobněji věnovat problematice termistorů vyráběných tiskovými technikami.

Na závěr této práce budete seznámeni s provedeným měřením základních teplotních charakteristik zkušebních vzorků tištěných termistorů a shrnutím výsledků těchto měření. Také zde bude zhodnocen vliv topologie termistorů na jejich chování.

1 Základní pojmy z oboru měření teplot

Tato kapitola slouží k základnímu seznámení o teplotě, jedné z nejčastěji měřených fyzikálních veličin ve výzkumných kruzích a k představení senzorů teploty.

1.1 Teplota

Teplotu lze definovat jako stavovou veličinu, která určuje termodynamickou rovnováhu. Termodynamická rovnováha je stav, který nastane v okamžiku, kdy v izolované soustavě těles neproběhnou ani minimální makroskopické změny a zároveň žádná z fyzikálních veličin, kterou je termodynamická rovnováha popsána, není závislá na čase. [1]

Měření teploty probíhá nepřímě, lze ji tedy naměřit pouze pomocí dalších fyzikálních veličin. Je nutno si uvědomit, že fyzikální veličina teplota není fyzikální veličina teplo. Fyzikální veličina teplo je definována jako forma energie, která souvisí s pohybem částic u dané soustavy. Hlavním rozdílem tedy je, že teplo není stavovou veličinou. Jeho hodnota závisí na celé minulosti vývoje soustavy těles a ne pouze na přítomném stavu soustavy těles.[1]

1.2 Teplotní Stupnice

Pomocí vratného Carnotova cyklu lze definovat termodynamickou teplotní stupnici. Mezi stejnými lázněmi předem definovaných teplot lze definovat účinnost vratných Carnotových cyklů.[1]

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1.1)$$

Ze vztahu (1.1) vyplývá vztah (1.2)

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1.2)$$

Přestože lze jako teploměrovou látku použít dokonalý plyn, není možné sestavit ideální tepelný stroj, který by pracoval na principu Carnotova cyklu. Stavová rovnice (1.3) platí právě pro dokonalý plyn v souladu s Carnotovým cyklem. [1]

$$pV = R_m T \quad (1.3)$$

Ze vztahu (1.3) při konstantním objemu lze určit rovnici pro plynový teploměr

$$T = T_0 \frac{P}{P_0} \quad (1.4)$$

Abychom mohli vytvořit plynový teploměr, který by mohl dosahovat přesností definice termodynamické teploty, je nutné použít polodokonalý plyn. U tohoto zvoleného polodokonalého plynu, kterým může být například helium nebo vodík, je nutné znát korekce stavové rovnice mezi dokonalým a polodokonalým plynem. [1]

Termodynamická stupnice začíná termodynamickou absolutní nulou a její základní jednotkou teploty je Kelvin (značen K). Kelvin byl určen z rovnovážného stavu tří skupenství vody, jmenovitě syté páry, vody a ledu, který slouží jako referenční a snadno udržitelný teplotní bod termodynamické stupnice. Tato hodnota termodynamického teplotního trojného bodu byla pevně stanovená na hodnotu $T = 273,16 \text{ K}$. [1]

Od základní Kelvinovy termodynamické stupnice je možné odvodit další teplotní stupnice. Celsiova stupnice, jejíž jednotkou je stupeň Celsia (značen °C), je dána posunutím o teplotu 273,15 K, tento posun vede k nižší hodnotě než je termodynamická teplota trojného bodu vody. Ze vztahu (1.5) lze vidět, že tato Celsiova teplota t je rovná rozdílu termodynamické teploty T a teploty 273,15 K. [1]

$$t \text{ (}^\circ\text{C)} = T - T_0 = T - 273,15\text{K} \quad (1.5)$$

A pro teplotní rozdíl platí:

$$\Delta t = \Delta T \quad (1.6)$$

Jednou z dalších teplotních stupnic je například Fahrenheitova stupnice, která se používá v několika státech. Převod na Fahrenheitovu teplotu lze vidět ve vztahu (1.7). [1]

$$t \text{ (}^\circ\text{F)} = \frac{9}{5}T - 459,67 = \frac{9}{5}t - 32 \quad (1.7)$$

1.3 Senzory pro snímání teploty

Senzorů pro snímání teploty je celá řada a mohou pracovat na různých fyzikálních principech. Orientačně je můžeme rozdělit do šesti skupin. [2]

- *Odporové senzory*
- *Křemíkové senzory*
- *Integrované polovodičové senzory*
- *Infračervené senzory*
- *Termistory*
- *Termočlánky*

Na senzory pro snímání teploty můžeme klást různé požadavky, v závislosti na měřeném prostředí, typu využití a použité technologii. Mezi které patří například tyto:

- *Použitelnost v širokém rozmezí teplot*
- *Možnost lineární charakteristiky v celém rozsahu snímaných teplot*
- *Rychlá reakce na změny snímané veličiny*
- *Reprodukovatelnost zjištěných hodnot*
- *Malá hystereze*
- *Malá tepelná setrvačnost*
- *Vysoká přesnost měření*

Je zřejmé, že u každého typu senzoru není možné dosáhnout všech splnění požadavků na výbornou. Jednou z hlavních vlastností, kterou má většina senzorů společnou je využívání jejich teplotní závislosti elektrického odporu, přičemž, ale použité materiály využívají vzájemně odlišných principů vedení proudu. [2]

1.4 Součástky z polykrystalického materiálu

Tyto součástky jsou nejvíce podobné rezistorům, bereme-li v potaz jejich elektrické vlastnosti. Jelikož jsou vyráběné na bázi polykrystalických polovodičů je jejich vodivost závislá na vnějších vlivech, mezi které může patřit intenzita světla, teplota, elektrické pole a jiné. Materiál těchto součástek je možné upravovat tak, aby se jeden z možných jevů projevoval jako dominantní.[3]

1.5 Polovodičové odporové senzory teploty

Jak již bylo zmíněno, většina senzorů využívá teplotní závislost odporu a stejně tak tomu je i v případě polovodičových odporových senzorů. Ze vztahu (1.8) lze vypočítat koncentraci nosičů náboje (značeno n). [1]

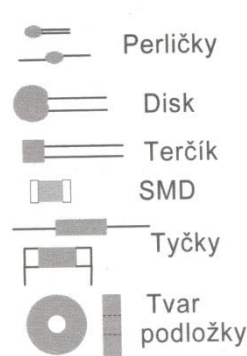
$$n = e^{\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (1.8)$$

Polovodičové odporové senzory teploty je možné rozdělit na termistory a monokrystalické odporové senzory. [1]

2 Termistory

Označení termistor vychází z anglického popisu thermal sensitive resistor, který lze doslovně přeložit jako teplotně závislý odpor. Hlavní rozdělení termistorů provádíme dle teplotního koeficientu, tedy na NTC a PTC termistory. [2]

Výroba teplotně závislých odporů probíhá lisováním práškové směsi oxidů kovů a stabilizátorů promíchané s plastickým pojivem, do požadovaného tvaru. Mezi nejpoužívanější tvary patří například perličkový, terčíkový nebo tyčinkový. Speciální elektrické vlastnosti vznikají během spékání při teplotách kolem 1200°C. Vytvoření termistorů s rozdílnými vlastnostmi dosáhneme rozdílnými výchozími materiály, míšícími poměry a rozdílnými postupy při spékání. [2]



2.1 Základní tvary termistorů (Převzato z [3])

2.1 Termistory NTC

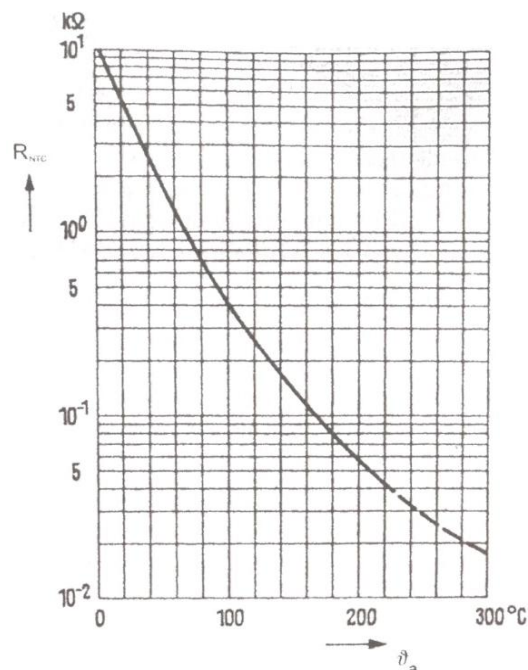
Hlavním cílem této podkapitoly je seznámení s přehledem využití, konstrukčních řešení, a použití NTC termistorů a definování jejich vlastností, parametrů a základních charakteristik.

2.1.1 Charakteristiky a parametry

Hlavní vlastností, kterou lze definovat NTC termistor je fakt, že při rostoucí teplotě se odpor snižuje, na rozdíl od čistých kovů, kde s rostoucí teplotou odpor stoupá. Tato změna odporu s teplotou je u kovových vodičů až čtrnáctkrát menší než u termistorů. [2]

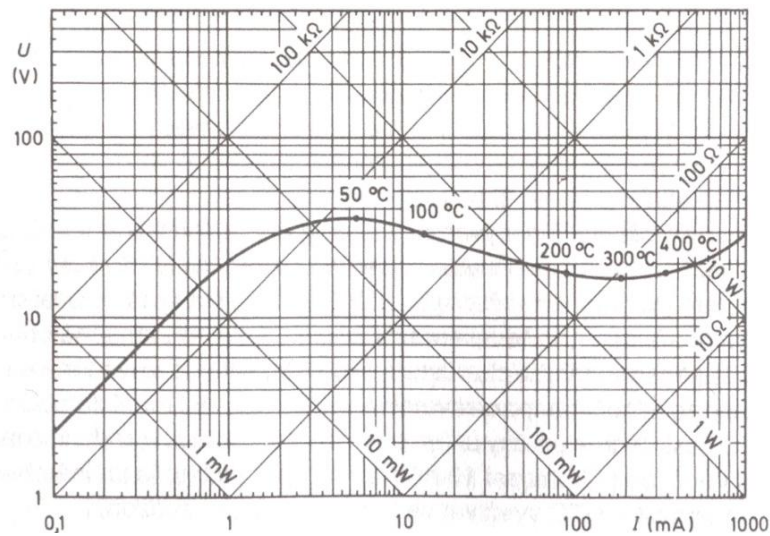
Jak již bylo zmíněno, tuto vlastnost NTC termistory získávají při spékání, kde při vytváření hranic jednotlivých zrn vznikají chyby v krystalické mřížce. Které zapříčiní, že při zvýšení teploty dochází ke změně mechanismu vedení proudu v polovodičovém materiálu. [2]

Z charakteristické závislosti odporu na teplotě u NTC termistoru na obr.2.2 lze vidět, že se odpor termistoru se změnou teploty významně mění. Hodnoty odporu při různých teplotách okolí lze odečíst přímo z charakteristiky. Při malém elektrickém zatížení je teplota termistoru rovna okolní teplotě. [2]



2.2 Odpor termistoru NTC v závislosti na teplotě okolí (Převzato z [3])

Na rozdíl od předchozí charakteristiky závislosti odporu na teplotě je voltampérová charakteristika obr.2.3 v platnosti i v takovém případě kdy se termistor v závislosti na procházejícím proudu začne zahřívat na jinou teplotu než je teplotu okolí. Proto má voltampérová charakteristika větší vypovídací schopnost o vlastnostech termistoru. Jedná se o statickou charakteristiku termistoru, kterou lze změřit při konstantní teplotě okolí. Úbytek napětí můžeme odečítat až poté, co nastane vyrovnaní množství přiváděné elektrické energie a vydávané tepelné energie. [2]



2.3 Voltampérová charakteristika NTC termistoru (Převzato z [3])

Na voltampérové charakteristice NTC termistoru na obr.2.3 lze rozeznat tři význačné oblasti. V první oblasti charakteristika téměř lineárně narůstá což je způsobeno malým přiváděným elektrickým výkonem, který ještě nemůže způsobit pozorovatelné vlastní oteplení termistoru. V tomto úseku je odpor termistoru dán pouze teplotou okolí, proto je tato oblast jediná kde dává smysl používat NTC termistor ve funkci teplotního senzoru. V další oblasti se z důvodu dalšího zvyšování proudu protékajícího termistorem, začne teplota termistoru převyšovat teplotu okolí a v důsledcích vlastního oteplení odpor termistoru poklesne. Při určité velikosti proudu dosáhne napětí na termistoru svého maxima. A v poslední oblasti nastane opět pokles úbytku napětí z důvodu zvyšování proudu. V této oblasti již hodnota termistoru na teplotě spíše nezávisí, neboť je dána elektrickým výkonem přeměněným v teplo.[2]

Voltampérové charakteristiky NTC termistorů se udávají v katalogových listech při teplotě okolí $\vartheta_a = 25^\circ\text{C}$ v neproudícím vzduchu. Jestliže se změní v jakémkoliv okamžiku množství tepla, které je odváděno, potom se změní i voltampérové charakteristiky. Charakteristika se může posunout směrem k větším proudům a napětím bude-li možné zajistit lepší chlazení v porovnání s klidným vzduchem o teplotě 25°C . Také může dojít k posunu maxima na charakteristice doprava, což je zapříčiněno větší velikostí povrchu termistoru. Lze tedy říci, že poloha maxima úzce souvisí s povrchem termistoru, ale také jeho typem a konstrukcí. U všech typů termistorů však zůstává tvar charakteristiky přibližně stejný. [2]

V případě konstantního elektrického výkonu přiváděného do termistoru vzniká nárůst teploty. Avšak tento nárůst odeznívá z důvodu chlazení a opět nastává stacionární stav. V tomto stavu je elektrická energie přiváděná do termistoru kompletně předávána do okolí ve formě tepla. [2]

$$P = I^2 R_T = \frac{U^2}{R_T} = G_{th}(T - T_a) \quad (2.1)$$

V katalogových listech narazíme mimo již zmíněných charakteristik i na další důležité parametry. Jedním z nich je například odpor za studena, ten udává hodnotu odporu při teplotě okolí $\vartheta_a = 20^\circ\text{C}$ nebo 25°C a je značen R_{20} nebo R_{25} . Další parametr s kterým se můžeme setkat je tepelná vodivost označovaná G_{th} a udávaná v jednotkách mW/K. Mezi další parametry patří maximální přípustný výkon, který udává výkon přeměněný v termistoru na teplo, který závisí na teplotě termistoru a je udáván vždy pro určitou hodnotu. Z dalších parametrů je možné zmínit mezní teploty pracovního rozsahu.[2]

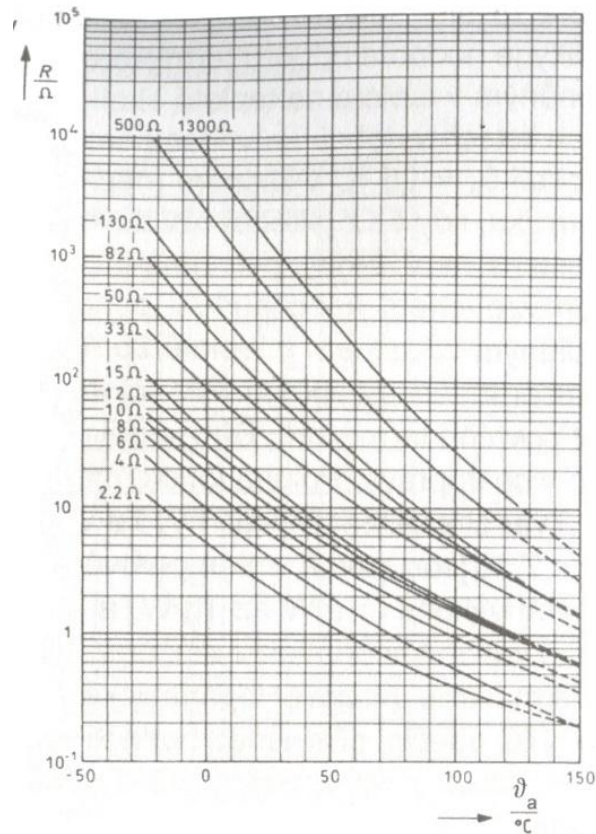
2.1.2 Možnosti využití

Tato podkapitola se věnuje různým druhům využití NTC termistorů. Z hlediska využití je pak lze rozdělit na rozběhové, kompenzační a měřicí termistory

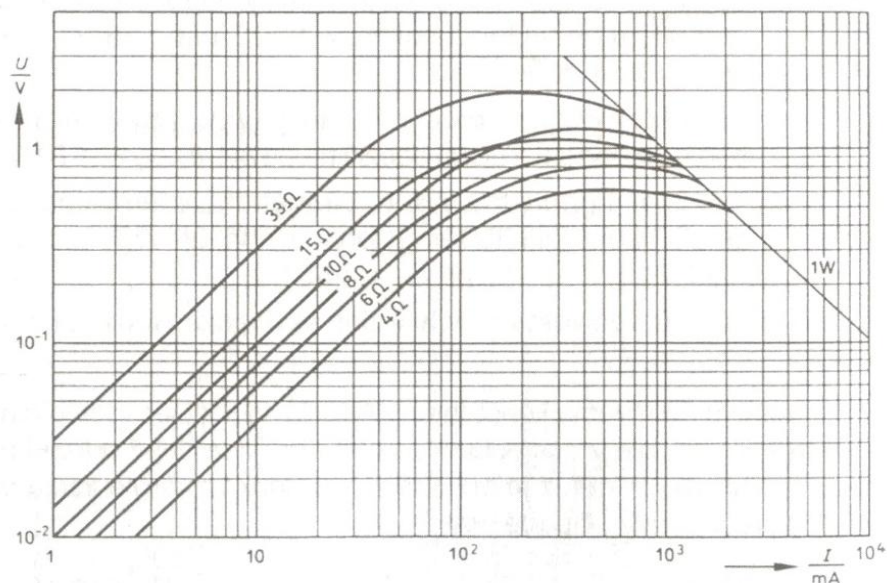
2.1.2.1 Kompenzační a měřicí termistory

Tyto NTC termistory se používají k měření, regulaci a monitorování teploty, zároveň je lze použít ke kompenzaci teplotní závislosti rezistorů nebo k teplotní stabilizaci tranzistorových obvodů. Aby byly tyto termistory co nejméně elektricky zatěžovány a nedocházelo k velkému vlastnímu oteplení, musí pracovat v lineární části voltampérové charakteristiky. Jak již bylo zmíněno, v této části charakteristiky je odpor termistoru dán teplotou okolí. [2]

Pro názornost jsou zde uvedeny odporové charakteristiky termistorů na obr. 2.4 v které jsou hodnoty odporů pro jednotlivé charakteristiky udány při 25°C . [2]



2.4 Charakteristiky měřících a kompenzačních termistorů NTC typu 6101 (Převzato z [3])

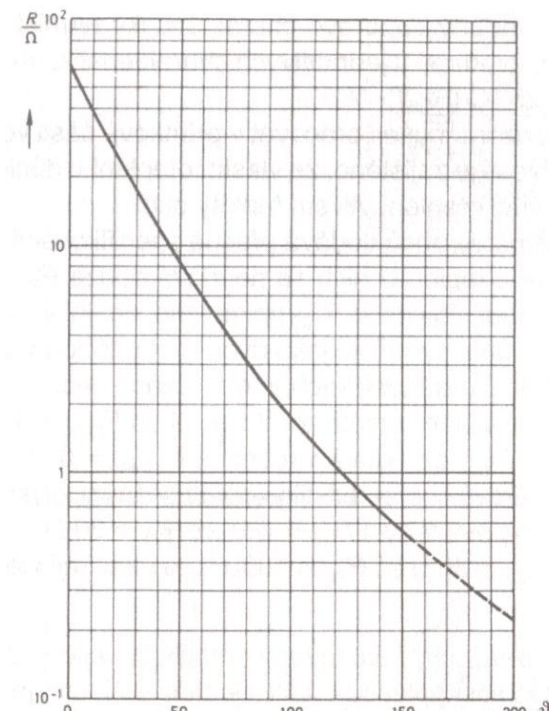


2.5 Voltampérové charakteristiky měřících a kompenzačních termistorů NTC typu 6101 (Převzato z [3])

Pro případ, kdy potřebujeme přesnější měření teploty, používáme typ termistoru, který se nazývá dvoubodový nebo tříbodový. Je například používán k regulaci v pračkách, chladničkách nebo mrazničkách. Udává se u nich nejen odpor při teplotě 25°C, ale také navíc i při jiných specifikovaných teplotách, například odpor při teplotě 10°C nebo při 100°C.[2]

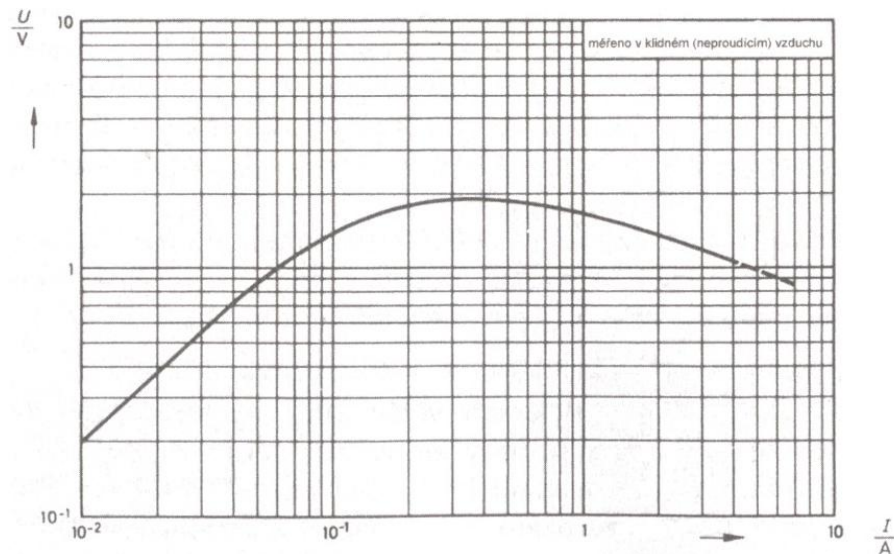
2.1.2.2 Rozběhové termistory NTC

Na rozdíl od kompenzačních a měřicích termistorů NTC jsou rozběhové termistory zatěžovány tak, aby vlastní oteplení zapříčinilo prudký pokles odporu. Odpor tedy klesá rychleji, pokud je proud procházející termistorem velký. Používají se primárně k omezení proudových rázů, ale také k zpomalení spínání a rozpínání relé. K takovým proudovým rázům může dojít například po zapnutí žárovky, výbojky, malých motorů nebo žhavicích obvodů elektronek. Odporovou závislost na teplotě rozběhového termistoru, který byl přímo určen k ochraně polovodičových prvků proti velkým proudovým nárazům, lze vidět na obr. 2.6 [2]



2.6 Charakteristika kompenzačního termistorů typu 90008 Valvo (Převzato z [3])

Jak je vidět na voltampérové charakteristice, již termistoru, který byl přímo určen k ochraně polovodičových prvků proti velkým proudovým nárazům na obr.2.7, je možné dosáhnout proudu od 0,1A až do 1A v případě, že je termistor v blízkosti maximální hodnoty napětí. [2]



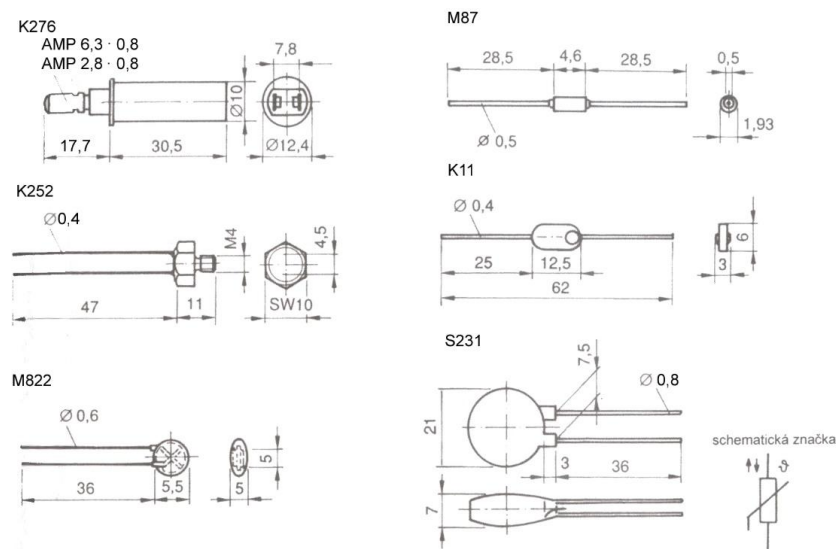
2.7 Voltampérová charakteristika kompenzačního termistoru typu 90008 Valvo (Převzato z [3])

2.1.3 Konstrukční provedení

NTC termistory se obvykle vyrábějí práškovou technologií z oxidů kovů. Nejčastěji se používají oxidy kovů železa (Fe_2O_3), niklu (NiO), barya (BaO), manganu (MnO), kobaltu (CoO), mědi (CuO), titanu (TiO_2). [4]

NTC Termistory je možné vyrábět v různém provedení, jejich tvary jsou většinou dány jejich účelem použití. Nejčastěji tvary termistorů jsou terčíkové, tyčinkové a perličkové. Terčíkové termistory jsou buďto v lakovaném nebo nelakovaném provedení, vyrábějí se pomocí lisování směsi oxidů. Přívodní vodiče terčíkového termistoru jsou na obou stranách destiček nakontaktovány. Oproti tomu tyčinkové termistory, které jsou plynule lisovány, jsou opatřeny čepičkami na obou stranách vzniklých válečků, na kterých jsou přívodní vodiče. Tyčinkové termistory patří k dnes již nejběžnějším tvarům, které může termistor mít. Další možný tvar termistorů má tvar kapky, která je tvořena mezi přívodními vodiči. Tento tvar termistorů je velice malý, průměr je obvykle do 0,4mm, což má za menší tepelnou setrvačnost. [2]

Krom těchto základní tvarů termistorů existují i speciální tvary pouzder, které se poté využívají v různých aplikacích. Mezi tyto pouzdra patří například perličkový termistor zatavený do skleněné tyčinky, termistor ve tvaru tablet v pouzdru z plastu nebo termistor v kovovém pouzdru sloužící k regulaci teploty plynů a kapalin. Některé typy provedení termistorů včetně schematických značek je možné vidět na obr.2.8.[2]



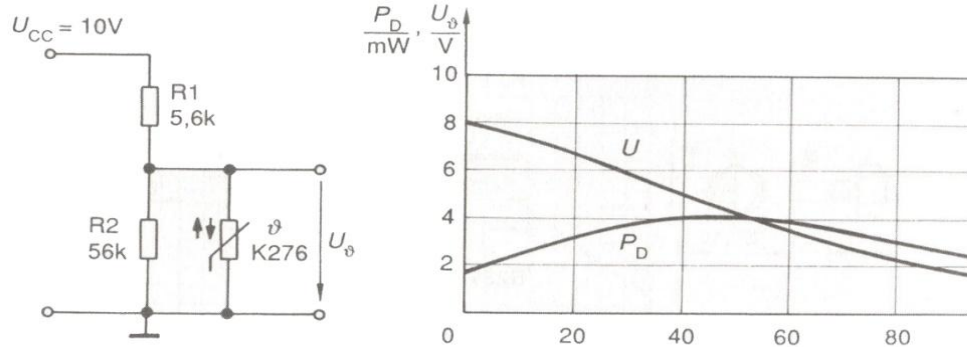
2.8 Různá konstrukční provedení termistorů (Převzato z [3])

2.1.4 Kritéria pro výběr a korekce charakteristiky

Abychom mohli rozhodnout, který typ termistoru potřebujeme, je nejprve nutné si ujasnit některá z kritérií pro výběr termistoru. Mezi ty nejdůležitější kritéria patří požadovaný rozsah teplot a také provedení termistoru. Další věc, kterou musíme promyslet je, zdali volit spíše termistor s větším odporem pro co možná největší signálové napětí, které by bylo úměrné teplotě, nebo spíše volit dle procházejícího proud termistorem, kdy v případě co nejmenšího procházejícího proudu dosáhneme nezkresleného výsledku měření. [2]

Korekci nelinearity charakteristik provádíme prostým zapojením rezistoru do obvodu a to buďto paralelně nebo sériově jak je vidět na obr. 2.9a. Tyto nelinearity jsou způsobeny právě nelineárním chováním odporu v závislosti na teplotě. Výsledek této korekce charakteristiky lze vidět na obr.2.9b kde je znázorněna závislost napětí a výkonu na teplotě. [2]

- a) Linearizační obvod b) Závislost signálového napětí a ztrátového výkonu na teplotě



2.9 Linearizace charakteristiky termistoru (Převzato z [3])

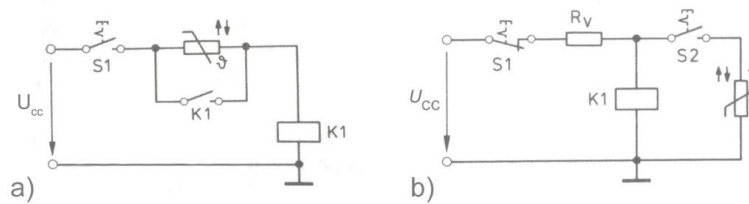
2.1.5 Příklady použití

V dnešní době mají termistory velmi mnoho využití, zvláště když bereme v potaz fakt, že termistory ve funkci senzorů ve složitějších elektronických obvodech svou funkcí umožňují činnost daného zařízení, ať už se jedná o zařízení k měření, řízení nebo regulaci teploty. [2]

Příkladem jednoho z takových použití může být například elektrický teploměr, u kterého pracovní rozsah teplot závisí právě na použitém NTC termistoru. Zároveň musí být zvoleno provozní napětí tak aby se při horní části teplotního rozsahu termistor samovolně nezahříval z důvodu procházejícího proudu a měl lineární charakteristiku. [2]

Jako další praktický příklad lze uvést třeba napěťový dělič s NTC termistorem, který se využívá spíše k určení úbytku napětí než k běžnému vyhodnocení teploty. [2]

Dále je vhodné zmínit, že se NTC termistory používají v mnoha můstkových zapojení pro přesné měření teploty, nebo ho lze také použít pro zpoždění sepnutí nebo rozpojení relé. To lze realizovat pomocí elektronických spínačů. Obě principiální zapojení lze vidět na obr.2.10. V zapojení dle obr.2.10a realizuje zpoždění přitahu relé. Termistor zde omezuje proud protékající cívkou relé na zlomek jmenovité hodnoty. Ke zpoždění odpadu kotvy relé může dojít dle obr. 2.10b pokud je NTC termistor zapojen paralelně k cívkce relé.[2]



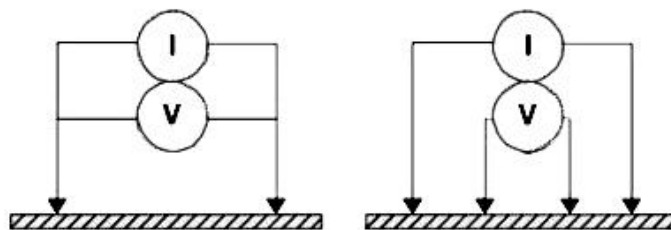
2.10 Principiální zapojení obvodů pro zpoždění přitahu a odpadu kotvy relé (Převzato z [3])

2.1.6 Metody měření termistorů

Tato podkapitola se věnuje metodám měření a postupům kalibrace termistorů.

2.1.6.1 Měření odporu termistorů

Odpor termistorů lze měřit dvěma metodami, jedná se o dvoubodovou metodu a čtyřbodovou metodu. Dvoubodová metoda je jednoduchá metoda měření odporu, během kterého je vnější zdroj proudu připojen do obvodu a odečítá se napětí na vzorku. Používá se většinou v takových případech, ve kterých stanovujeme velké odpory ve srovnání s přechodovými odpory a odpory přivodních kontaktů. Tato metoda není vhodná pro vodivé mikrostruktury a nanostruktury, kdy přechodové odpory vzniklé umístěním vzorku mezi elektrody bývají zdrojem chyb měření.[5]



2.11 Zapojení pro dvoubodovou a čtyřbodovou metodu měření (Převzato z [5])

Čtyřbodová metoda toto odbourává oddělením proudových a napěťových kontaktů. Měření je prováděno pomocí čtyř kontaktů, které často bývají uspořádány v jedné přímce, přičemž dva vnější hroty jsou proudové a dva vnitřní hroty jsou napěťové. [5]

2.1.6.2 Postup kalibrace termistorů

Za posledních několik let došlo k velkému pokroku v dlouhodobé stabilitě termistorů, určených k měření teploty. Tento pokrok vedl k tomu, že lze docílit uspokojivé linearizace charakteristické závislosti odporu na teplotě vhodnou volbou obvodových prvků. Vztah (2.2) udává teplotní závislost odporu termistoru. [4]

$$R = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (2.2)$$

V technické praxi je zavedena celá řada referenčních konstant, pomocí nichž lze poté vyjádřit teplotu. K těmto referenčním konstantám patří například teplotní citlivost a odpor termistoru při referenční teplotě, tyto konstanty jsou většinou uvedené výrobcem v katalogových listech. Referenční teplota se zpravidla volí 25°C, hodnota odporu při této teplotě se označuje R_{25} a nazývá se jmenovitý odpor termistoru. Závislost odporu na teplotě lze vyjádřit rovnicí, která ovšem nevystihuje převodní charakteristiku dostatečně přesně. Ke zvýšení přesnosti se tedy zavádí S-H koeficienty.[4]

$$\log R = A + \frac{B}{T + C} \quad (2.3)$$

Pro určení S-H koeficientů je nutné změřen odporu NTC termistoru při třech teplotách. Obvykle jsou tyto tři teploty rozloženy jako spodní minimum, horní maximum a střed mezi těmito dvěma měřenými body.

Pro kalibraci je kritické mít měřicí systém, který dokáže regulovat a udržovat teplotu při stabilních hodnotách velmi dobře. Takové stabilní prostředí je nejčastěji tvořeno termostatickou lázní, v které je kapalina (nejčastěji olej) do níž je vložen termistor.

Postup měření je následující, nejprve je nutné nastavit olejovou lázeň na požadovanou teplotu spodního minima a ponechat určitý čas pro ustálení teploty. Po ustálení je možné zaznamenat si teplotu lázně a provést měření odporu při požadované teplotě. Pro další dva teplotní body je nutné opakovat první dva kroky. Po naměření je možné použít naměřená data pro rovnici (2.7). [6]

Pro zmenšení chyb nahradíme vztah (2.3) polynomem vyššího stupně. Využití polynomu vyššího stupně umožňuje měřit teplotu termistorem v teplotním rozsahu -100 až 300°C s velmi malou chybou okolo $\pm 0,15^\circ\text{C}$. Pro většinu běžných aplikací termistorů postačuje polynom třetího stupně. [4]

$$\ln R = A + B \frac{1}{T} + D \frac{1}{T^2} + C \frac{1}{T^3} \quad (2.4)$$

Termodynamickou teplotu termistoru T získáme jejím vyjádřením z rovnice (2.4).

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln R + D \cdot (\ln R)^2 + C \cdot (\ln R)^3 \quad (2.5)$$

$$T = [A + B \cdot \ln R + D \cdot (\ln R)^2 + C \cdot (\ln R)^3]^{-1} \quad (2.6)$$

Tyto rovnice (2.5) a (2.6) byly poprvé použity Steinhartem a Hartem v oceánografii pro teplotní rozsah -2 až 30°C. Během tohoto pokusu zjistili, že vyloučení kvadratického členu $D(\ln R)^2$ z rovnice nezpůsobí významný pokles v přesnosti při měření teploty, proto může být z rovnice vypuštěn. Pro termodynamickou teplotu termistoru T tak dostaneme výraz, kterému se říká Steinhart–Hartův vztah. [4]

$$T^{-1} = A + B \cdot \ln R + C \cdot (\ln R)^3 \quad (2.7)$$

Termodynamickou teplotu termistoru T lze také vyjádřit využitím vztahu (2.2).

$$T = \frac{B_T}{\ln\left(\frac{R}{R_{25}}\right) \cdot \frac{B_T}{T_{25}}} = \frac{1}{\frac{1}{B_T} \cdot \ln\left(\frac{R}{R_{25}}\right) \cdot \frac{1}{T_{25}}} \quad (2.8)$$

Z katalogových listů od výrobce lze také zjistit hodnoty materiálové konstanty B_T pro jednotlivé termistory, nebo je lze dopočítat pomocí vztahu odvozeného z rovnice (2.2). [4]

$$R_1 = R_2 e^{B_T \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (2.9)$$

$$\ln \frac{R_1}{R_2} = B_T \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (2.10)$$

$$B_T = \left(\frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \right) \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (2.11)$$

Materiálovou konstantu tedy vypočteme dosazením dvou hodnot odporu termistoru naměřených při dvou různých teplotách do vztahu (2.11).

Z toho lze usoudit, že materiálová konstanta B_T není v pravém slova smyslu konstantou, neboť její hodnota vzrůstá s rostoucí teplotou. Měření konstanty B_T se provádí při dvou různých teplotách, přičemž v tomto teplotním rozmezí lze hodnotu B_T považovat za téměř konstantní. Přesnější měření lze docílit snížením teplotního rozmezí. Dle doporučení DIN se měření provádí při teplotách 18°C a 85°C. [4]

Dalším z parametrů, který je možné z měření vypočítat je teplotní součinitel odporu α . Pokud bychom chtěli zavést teplotní součinitel odporu polovodiče, je třeba si uvědomit, že není konstantní, ale silně závisí na teplotě. Tuto závislost lze odvodit takto:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2.12)$$

Dosazením vztahu (2.2) do této rovnice (2.9) a jejím derivováním podle termodynamické teploty dostaneme vztah pro teplotní součinitel odporu. [4]

$$\alpha = \frac{1}{Ae^{\frac{B_T}{T}}} \frac{d \left(Ae^{\frac{B_T}{T}} \right)}{dT} = \frac{1}{Ae^{\frac{B_T}{T}}} Ae^{\frac{B_T}{T}} \left(-\frac{B_T}{T^2} \right) \quad (2.13)$$

$$\alpha = -\frac{B_T}{T^2} \quad (2.14)$$

Z toho můžeme odvodit, že teplotní součinitel odporu NTC termistoru je záporný, přičemž jeho hodnota závisí na termodynamické teplotě termistoru a materiálové konstantě.

Hodnota teplotního součinitele odporu termistoru za konstantní hodnoty klesá s rostoucí termodynamickou teplotou termistoru, jak je patrné ze vztahu 2.14. Také je možné vyvodit závěr, že hodnota teplotního součinitele odporu termistoru při konstantní termodynamické teplotě roste s rostoucí hodnotou materiálové konstanty. [4]

Avšak vztah (2.2) je lineární pouze v úzkém teplotním rozsahu, který je 0 až 50°C. Měření teploty v tomto teplotním rozmezí vykazuje chybu $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Nelinearita narůstá při dalším zvětšení teplotního rozmezí a chyba se pohybuje kolem $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Z tohoto důvodu je použití těchto vztahů omezené. [4]

2.1.6.3 Chyba měření

Z důvodu procházejícího proudu termistorem dochází k jeho ohřevu což je podobné jako u kovových odporových senzorů. Teplota termistoru proto vzroste z původní skutečné hodnoty na novou hodnotu, která je vyšší než skutečná teplota. Chybu měření způsobenou ohřevem termistoru lze vyjádřit stejnou rovnicí jako u kovových senzorů. [4]

$$\Delta t = \frac{R_t I^2}{D} \quad (2.15)$$

Zatěžovací konstanta D není ve skutečnosti konstantou, protože závisí na teplotě termistoru, na jeho rozměrech a také na vlastnostech okolního prostředí. Hodnoty zatěžovací konstanty nabývají podobných hodnot jako u kovových senzorů. [4]

Zatěžovací konstanta je definována jako celkové množství výkonu, vyjádřený v miliwattech, potřebného k zahřátí NTC termistoru o 1K. Čím menší je zatěžovací výkon, tím náchylnější je NTC termistor na samoohřev způsobený protékajícím proudem. Při měření této konstanty je vhodné, aby proud protékající termistorem tak malý, aby se omezil možný samoohřev, ale zároveň dostatečně velký, aby byla docílena co možná největší možná přesnost měřicího systému. [6]

Zatěžovací konstantu lze určit pomocí měření odporu při dvou teplotních bodech vzdálených od sebe maximálně 25°C. Pomocí Ohmova zákona poté určíme tuto konstantu jako podíl výkonu a rozdílu teplot v oněch bodech, při kterých byl výkon měřen.

$$U = R \cdot I \Rightarrow P = R \cdot I^2 \quad (2.16)$$

$$D = \frac{P}{\Delta t} \quad (2.17)$$

Po zjištění zatěžovací konstanty je dále možné snížení samoohřevu termistoru alespoň na 50% měřicí přesnosti a méně, pomocí přepočítání zatěžovací konstanty pro zadaný měřicí systém. Například pro případ, kdy by byla zatěžovací konstanta pro termistor při měření v termostatické olejové lázni určena na hodnotu 3mW/°C a požadovaná teplotní přesnost při měření s tímto termistorem byla $\pm 0,1^\circ\text{C}$, je nutné zajistit, aby nebyl překročen maximální výkon vypočítaný na hodnotu 0,15mW z následujícího vztahu. [6]

$$D_{\text{přepočítaná}} = 3\text{mW}/^\circ\text{C} * 0,1^\circ\text{C} * 50\% = 0,15\text{mW} \quad (2.18)$$

2.1.6.4 Postup výpočtu plošného odporu

Plošný odpor (z anglického spojení Sheet resistance) slouží k měření odporu pro tenkovrstvé součástky, jejichž tloušťka je většinou v mikrometrech. Používá se pro charakterizaci materiálu na tenkovrstvých součástkách. Oproti klasickému měření odporu je plošný odpor měřen pomocí čtyřbodové sondy nebo nepřímo pomocí bezkontaktního zkoušení vířivými proudy. Jelikož je plošný odpor neměnný pro danou tenkovrstvou součástku, lze použít pro srovnání elektrických vlastností i s jinými součástkami, které se liší ve velikosti. V pravidelném trojrozměrném vodiči platí vztah (2.19). [7–9]

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = \rho \cdot \frac{L}{W t_s} \quad (2.19)$$

Po vyjádření dostáváme následující vztah:

$$R = \frac{\rho}{t_s} \cdot \frac{L}{W} = R_S \cdot \frac{L}{W} \quad (2.20)$$

Je-li známá tloušťka vrstvy je možné měrný odpor vypočítat vynásobením plošného odporu a tloušťky.

$$\rho = R_S \cdot t_s \quad (2.21)$$

Plošný odpor je často uváděn v jednotkách ohm na čtverec, značený Ω/sq nebo Ω/\square . Název jednotky ohm na čtverec vychází z faktu, že čtvercová vrstva s odporem vrstvy $10 \Omega/\text{sq}$ vykazuje skutečný odpor 10Ω , bez ohledu na velikost čtverce, neboť pro čtverec platí, že šířka je rovna délce a tedy plošný odpor je rovný běžnému odporu. [7–9]

Například je-li zadaná šířka vrstvy rovna 1 mm a délka vrstvy je 3 mm , tak při měření materiálu, který má plošný odpor $21 \Omega/\text{sq}$ nám celkový naměřený odpor vyjde 63Ω neboť je vrstva složena vlastně ze tří pomyslných čtverců, jehož délka i šířka je 1 mm . [7–9]

2.2 Termistory PTC

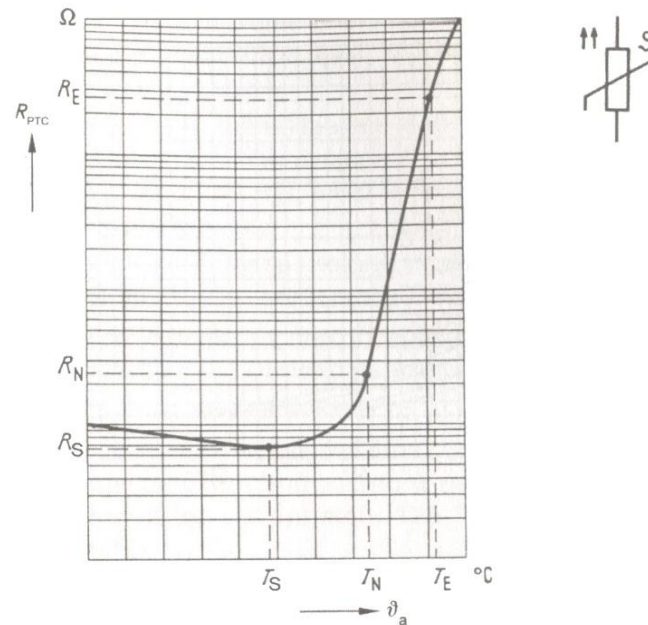
V této podkapitole bude hlavním cílem plné seznámení s PTC termistorem z hlediska využití, konstrukčních řešení, použití, stejně tak z hlediska definování vlastností, parametrů a základních charakteristik.

2.2.1 Charakteristiky a parametry

Podobně jako u výroby NTC termistorů i zde se výchozí komponenty nejprve rozemelou, smíchají s keramickými přísadami, následně vylisují a spékají při vysoké teplotě. PTC termistory se vyrábějí ze směsí bariem-karbonátu (uhlíčitan barnatý) a dalších oxidů kovů. Vlastnosti požadovaného PTC termistoru, se určují při výrobě, rozdílnými mísícími poměry přísad a spékají při různých teplotách.

Po procesu spékání se takto vzniklé součástky opatří kontakty a vývody. Ochrana proti povětrnostním vlivům se povětšinou realizuje lakováním. Provedení a tvary PTC termistorů se shodují s tvary termistorů NTC.[2]

Termistory PTC mají v určitém rozsahu teplot kladný teplotní koeficient. Podle typu může nabývat změny od 6% do 60% na stupeň změny teploty. Je podstatně větší než záporný teplotní koeficient termistorů NTC. Kladný teplotní koeficient je značně větší než záporný koeficient u NTC termistorů, dle typu termistoru se může změna teplotního koeficientu na stupeň změny teploty pohybovat od 6% až do 60%. Na obr. 2.12. lze vidět schematickou značku PTC termistorů společně s jejich typickou odporovou závislostí na teplotě. [2]



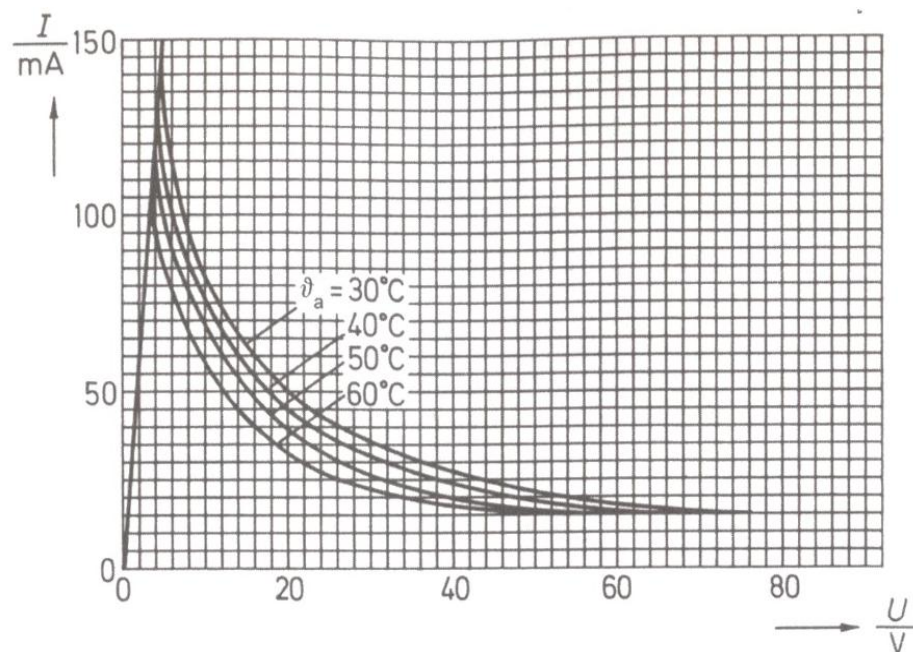
2.12 Schematická značka a charakteristická závislost $R_{PTC} = f(\theta_a)$ (Převzato z [3])

Z charakteristiky lze vyzorovat tři nejdůležitější oblasti s různým chováním PTC termistoru. V první z těchto oblastí se PTC termistor chová obdobně jako termistor NTC, neboť při nízké teplotě má malý záporný teplotní koeficient. V druhé oblasti se až při určité teplotě, začíná tento záporný koeficient dostávat do kladných hodnot. V této hodnotě lze naměřit počáteční odpor R_S a představuje nejmenší možnou hodnotu odporu PTC termistoru. V další části charakteristiky se při stoupající teplotě zvětšuje již kladný teplotní koeficient a při dosažení nominální teploty T_N začne odpor PTC termistor prudce stoupat, a to až o desítky procent. Právě tato oblast charakteristiky je pracovní oblastí PTC termistoru. [2]

Toto prudké stoupaní odporu při překročení jmenovité teploty je dáno souběhem dvou vlivů a to polovodičového a feroelektrického jevu. K tvorbě potenciálových bariér na hranicích mezi zrny použitého materiálu dochází již během procesu spékání, jejich výška pak závisí na dielektrické konstantě materiálu, který je kolem potenciálové bariéry. Koncová teplota, při které PTC termistor nabývá velmi malých hodnot odporu, zároveň omezuje pracovní rozsah PTC termistoru a při překročení této teploty se odpor zvětšuje pouze minimálně a to až do takové hodnoty teploty při které odpor PTC termistoru dosáhne svého maxima. [2]

Na obr. 2.13 lze vidět voltampérovou charakteristiku PTC termistoru která se udává v lineárně-lineárním měřítku pro větší počet teplot okolí. Lze z ní vypočítat schopnost PTC termistorů omezovat proud obvodem. PTC termistor je možné využívat jako teplotní senzor v oblasti malých napětí, kdy je charakteristika lineární a platí tedy Ohmův zákon.

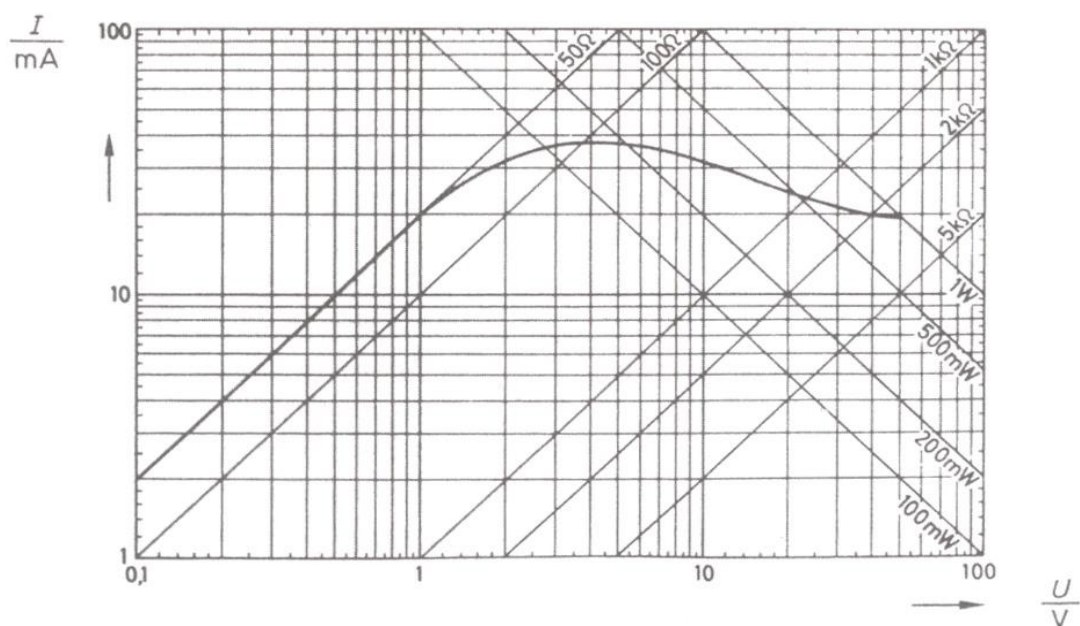
Vlivem vlastního oteplování se při zvyšování napětí zvyšuje odpor PTC termistoru, kvůli čemuž se procházející proud zmenšuje. Pomocí této vlastnosti lze PTC termistor v této oblasti používat jako ochranný prvek proti proudovému nebo výkonovému přetížení nebo ho lze použít jako omezovač proudu. Je však nutné věnovat v této oblasti zvýšenou pozornost chlazení, neboť je zde vysoká teplota okolí, kvůli které může docházet k tomu, že se PTC termistor hůře chladí.



2.13 Voltampérové charakteristiky PTC termistoru v lineárně-lineárním měřítku (Převzato z [3])

Obdobně jako u NTC termistorů i zde je uvedena na obr. 2.14 voltampérová charakteristika v logaritmicko-logaritmickém měřítku, jak jí většina výrobců uvádí v katalogových listech. Po vzájemné výměně os bude průběh charakteristik PTC termistoru na první pohled podobný charakteristikám NTC termistorů, avšak chování v elektrickém obvodu je samozřejmě diametrálně odlišné. [2]

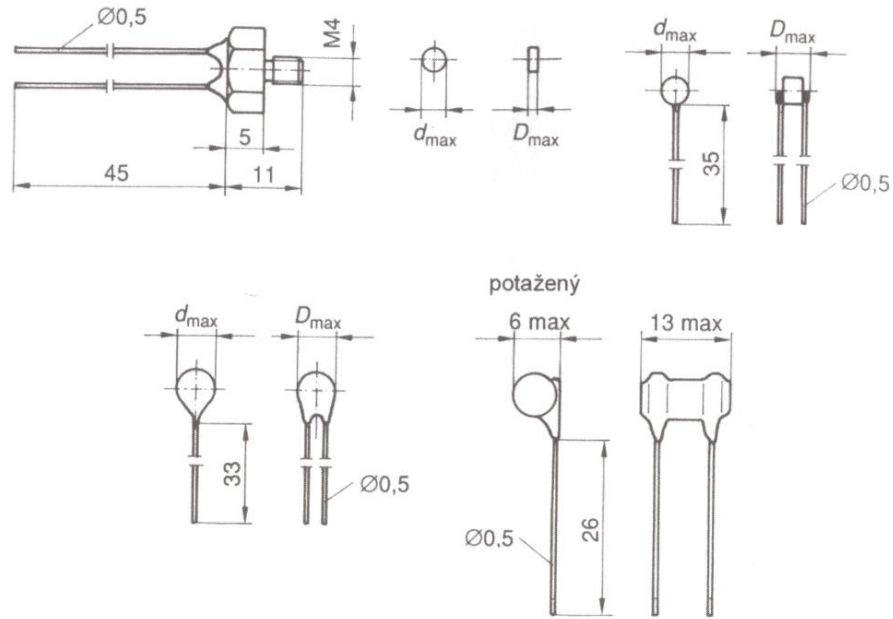
Kromě těchto charakteristik lze v katalogových listech nalézt i několik dalších důležitých parametrů. Mezi ty nejdůležitější patří například jmenovitá teplota, při níž odpor PTC termistoru dosáhne dvojnásobku svého minimálního odporu. Tímto parametrem je zespoda ohraničen pracovní rozsah PTC termistorů. Dalším parametrem v katalogových listech je teplotní koeficient, který je v pracovním rozsahu PTC termistoru zhruba stejný. K dalším uváděným parametrům patří například odpor PTC termistoru při teplotě 25°C nebo mezní teplota, která ohraničuje pracovní oblast shora a udává konec strmého nárůstu odporu. Lze tam také dohledat odpor při koncové teplotě nebo tepelnou vodivost. V katalogových listech lze najít mnoho dalších hodnot pro praktické aplikace PTC termistoru.[2]



2.14 Voltampérová charakteristika pozistoru v logaritmicko-logaritmickém měřítku (Převzato z [3])

2.2.2 Konstrukční provedení a značení

PTC termistory se vyrábí z polykrystalické keramiky. Jedná se zejména o sloučeniny olova, barya (BaTiO_3) a stroncia s příměsí tantalu nebo křemíku. PTC termistory jsou nejčastěji vyráběny v terčíkovém provedení. Tvarem a velikostí odpovídají termistorům NTC na obr.2.8. Existují i speciální tvary, u nichž je tvar pouzdra přizpůsoben účelu použití. Na obr.2.15 jsou jako příklad uvedena některá konstrukční provedení PTC termistorů pro měřicí a regulační účely. [2, 4]



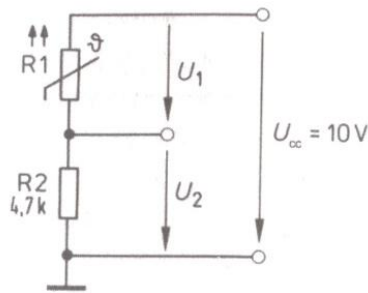
2.15 Konstrukční provedení PTC termistorů pro měřicí a regulační účely (Siemens) [Převzato z [3]]

Obdobně jako u NTC termistorů není i zde značení výrobců jednotné, a proto při nahlédnutí do příslušných katalogových listů, nemusí být na první pohled zřetelné pro jakou oblast použití je daný typ PTC termistoru určen. Mohou být označovány objednávacími čísly nebo vícemístnými identifikačními čísly. Některé typové řady se označují také barevným kódem, avšak každý výrobce má svůj vlastní kód.[2]

2.2.3 Příklady použití

Existují dvě hlavní oblasti pro využití PTC termistorů, jedním z nich je aplikace, při níž je teplota PTC termistoru určena převážně teplotou okolí. V této aplikaci pracují PTC termistory jako velmi citlivé senzory. Druhou oblastí je aplikace, při níž dochází ke zvýšení odporu PTC termistoru vlastním ohřevem procházejícím elektrickým proudem. Příkladem této aplikace může být ochrana proti přetížení, jištění proti nadměrnému naplnění zásobníku oleje, zapojení startéru výbojek, využití PTC termistoru jako samoregulujícího topného prvku, zpoždění přitahu nebo odpadu kotvy relé nebo demagnetizační obvod barevných obrazovek. Dále jsou podrobněji popsána některá z těchto využití. [2]

Jedním z hlavních použití PTC termistoru je ve funkci teplotního senzoru. Má-li PTC termistoru zastávat funkci teplotního senzoru, je vhodné ho zapojit jedné části děliče napětí, jak je zakresleno na obr. 2.16. Je nutné zajistit, aby vlastní ohřev PTC termistoru byl zanedbatelně malý a to v celém rozsahu měření. [2]



2.16 PTC termistor ve funkci teplotního senzoru [Převzato z [3]]

PTC termistory můžeme, obdobně jako NTC termistory, zapojit do můstku. I v tomto případě musíme zkontrolovat, zda PTC termistor pracuje ve své lineární části charakteristiky bez vlastního ohřevu. To ovšem vyžaduje větší početní úsilí při určování hodnot jednotlivých rezistorů můstku. [2]

Pomocí PTC termistorů lze také realizovat velmi jednoduchá čidla pro monitorování hladiny kapaliny. Toto čidlo pak bude vhodné jako jisticí prvek. Využijeme skutečnosti, že PTC termistor s vlastním ohřevem bude citlivě reagovat na změny svého chlazení změnou svého proudového odběru ze zdroje. Při konstantním napětí je tedy proudový odběr měřítkem pro právě aktuální odvod tepla z PTC termistoru. K obzvláště velké změně odběru dojde v okamžiku, kdy se na vzduchu ohřátý PTC termistor ponoří do kapaliny, která z něj teplo odvede daleko lépe než předtím vzduch. [2]

Pomocí průběhu voltampérové charakteristiky můžeme PTC termistory využívat i jako ochrany proti zkratu nebo proti nadměrnému proudu. Základní princip je založen na omezování proudu na přípustnou mez. Proud sériovou kombinací může vzrůst například vlivem zkratu nebo částečného zkratu, který vede k přetížení a tedy k překročení hodnoty I_{max} . V tom případě se PTC termistor ve velmi krátké době zahřeje na teplotu větší než je teplota okolí a jeho odpor proto rapidně vzroste a proto začne PTC termistor fungovat jako omezovač proudu. [2]

3 Flexibilní a tištěná elektronika

3.1 Historie flexibilní elektroniky

V této podkapitole bude hlavním cílem základní seznámení s flexibilní elektronikou a tištěnou elektronikou z hlediska vlastností, výhod a nevýhod a jejich případných využití.

Z historického hlediska začíná vývoj flexibilní elektroniky kolem roku 1960. V tomto roce byly vyrobeny jedny z prvních solárních článků z monokrystalického křemíku na flexibilním podkladu. Dalším zásadním skokem vpřed bylo sestavení prvního pružného křemíkového tenkovrstvého tranzistoru v roce 1968. Několik let poté byly již tyto tranzistory na bázi polykrystalického křemíku nanášeny na flexibilní, polymerní substrát pomocí technologie laserového žhání. [10]

Za jedny z prvních elektronických produktů, vyrobených na základě organických flexibilních polovodičů byly pasivní identifikační karty, které byly představeny kolem roku 2005. Tyto karty se využívaly například k nakupování a byly hromadně tištěny na papír. Mezi další výrobky, které přispěly pro rozvoj flexibilní elektroniky, patří například ohebné, lithiové, polymerové baterie nebo velkoplošné tlakové snímače. [10]

3.2 Flexibilní elektronika

Výroba flexibilních elektronických zařízení je zajištěna depozicí jedné nebo více funkčních vrstev, které jsou nanášeny na flexibilní substrát. Materiál pro výrobu flexibilní elektroniky volíme dle požadované kvality, ceny a vlastností výsledného zařízení. Mezi vlastnosti, které nám určují kvalitu substrátu, patří například stlačitelnost, pórovitost, hladkost nebo smáčivost. Při velkém požadavku na kvalitu u výsledného zařízení, volíme spíše metody naprašování a metodu rotačního nanášení, pomocí nich lze dosáhnout hladké funkční vrstvy. Tyto metody jsou velice nákladné a není při nich kladen důraz na rychlost depozice. Existují však i metody pro levnější tisk, které mají ovšem znatelně horší kvalitu. [11]

3.3 Tištěná elektronika

Tištěná elektronika se čím dál tím více dostává do pozornosti firem, které v ní vidí hlavní výhodu v podobě nízkonákladové elektroniky. Lze ji využít například pro výrobu ohebných displejů, inteligentních obalů, nebo například v oblasti fotovoltaických panelů. Tištěnou elektroniku je možné definovat jako tisk elektronických zařízení na flexibilní substrát. Tento flexibilní substrát je také nazýván polymerní silná vrstva, tento název byl převzat z anglického názvu polymer thick film. Elektrické funkční pasty jsou tištěny na různé druhy substrátů, které následně slouží k výrobě aktivních, či pasivních obvodů, tranzistorů, anebo odporů.[12, 13]

Pasivní elektronika, mezi kterou patří třeba lineární a nelineární rezistory, kondenzátory, nebo cívky, jsou základní součástí každého elektrického zařízení a zabírají poměrně významný prostor na povrchu desky plošného spoje. Avšak je nutné brát v potaz, že i přílišné zmenšení těchto součástek vede k problému při automatické montáži, nebo při kontrole kvality pájeného spoje. Pasivní tištěná elektronika zajišťuje aspekty pro zlepšení elektrického výkonu a funkčnosti elektrického zařízení nebo pro případné odstranění pájených spojů. Koncem šedesátých let minulého století byl zaveden koncept vkládání pasivních součástek mezi vnitřní vrstvy desky plošného spoje a na počátku sedmdesátých let se začaly pro výrobu tenkých vrstev rezistorů používat NiCr a NiP vrstvy.[14, 15]

Výrobu v celém svém rozsahu pak umožňuje kombinace tenkovrstvé a tlustovrstvé technologie, která kombinuje velkou odolnost při vysoké toleranci tlustovrstvé technologie a přesnou geometrii odporů s vysokou mírou miniaturizace tenkovrstvé technologie. Většinou jsou tyto materiály složeny z uhlíku nebo stříbra, které slouží jako plnivo ve směsi s polymerovou pryskyřicí s přídatnými rozpouštědly nebo s izolačním práškovým plnivem. Teplota vytvrzování PTF inkoustů pro desky plošných spojů by neměla být vyšší než 180 °C. [16]

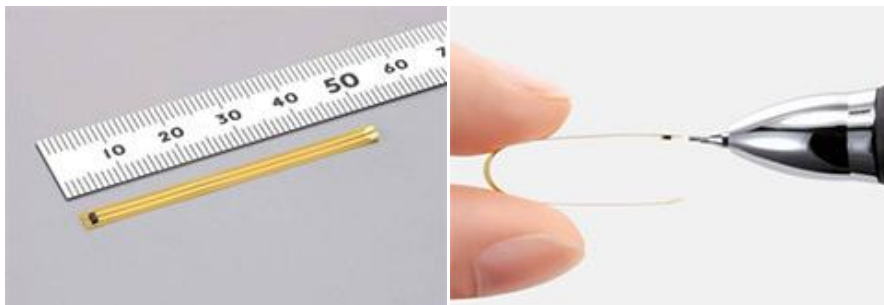
4 Charakterizace tištěných flexibilních termistorů

Tato část bakalářské práce se bude věnovat základnímu seznámení s tištěnými flexibilními termistory a experimentálnímu měření základních elektrických parametrů na připravených vzorků tištěných termistorů

4.1 Flexibilní tištěné termistory

Vzhledem k požadavkům na malé rozměry a vysoký výkon chytrých telefonů, tabletů a jiných moderních zařízení, je kladen větší důraz na zmenšování součástek.

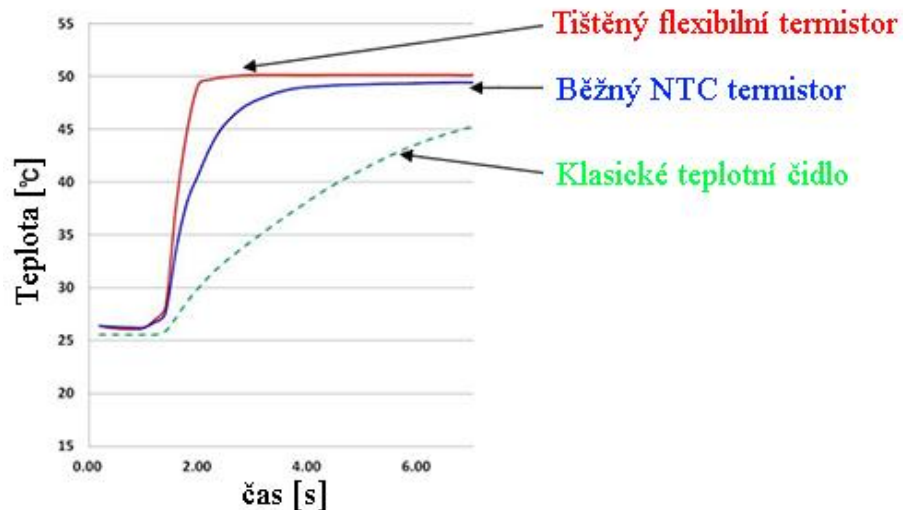
Tuto potřeby se snaží uspokojit například japonská společnost Murata Manufacturing tištěným flexibilním termistorem, který vytvořila z malého úzkoprofilového, tenkého, flexibilního materiálu. Společnost také zkoumá použití těchto tištěných flexibilních termistorů v zařízeních pro sledování zdravotního stavu osob nebo k sledování teploty zboží. [17]



4.1 Ukázka tištěného flexibilního termistoru [Převzato z [17]]

4.1.1 Charakteristiky a parametry

Jednou ze základních výhod těchto termistorů, je jejich flexibilita. U těchto termistorů se používá tloušťka flexibilního tištěného obvodu přibližně 100 μm , proto mohou být snadno vloženy uvnitř složitě tvořeného zařízení s úzkým prostorem. Vzhledem k jejich nízké kapacitě tepla, mají tyto termistory vynikající tepelnou odezvu.

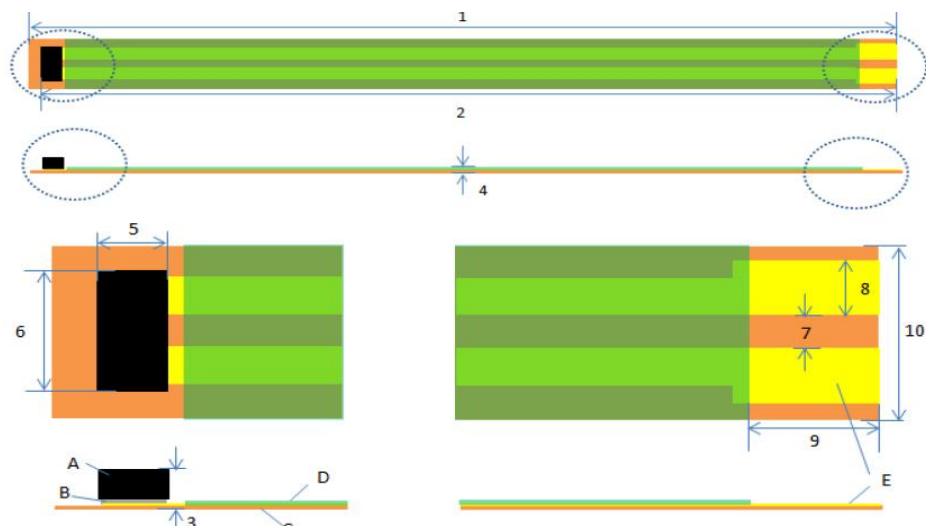


4.2 Teplotní charakteristika (Převzato a upraveno z [17])

Na charakteristice obr.4.2 je vidět porovnání několika typů teplotních senzorů. Měření bylo provedeno v olejové nádrži při teplotě od 25 stupňů až do 50 stupňů. Jak je z charakteristiky zjevné, oproti klasickému termistoru je tištěný flexibilní termistor schopný měřit teplotu v olejové nádrži v nejmenším možném čase. [17]

4.1.2 Konstrukční provedení a značení

Flexibilní tištěný termistor je popsán na produktu vyráběného společností Murata. Na obr. 4.3 můžeme vidět rozměry a složení takového flexibilního tištěného termistoru, který se vyrábí v délkách od 25mm až po 75mm. Na pozici A je samotný NTC termistor, který má délku 0,8mm a šířku 1,6mm. Celková šířka produktu je i s natištěným termistorem 0,55mm. Na pozici B je pájka a na pozici C lze vidět základní polyamidový podkladový materiál. Pájecí maska D má tloušťku 0,10 mm. Na poslední pozici E jsou přívodní kontakty termistoru tvořené vodivou pokovenou vrstvou. [18]



4.3 Konstrukční provedení termistoru (Převzato z [18])

4.1.3 Možnosti využití

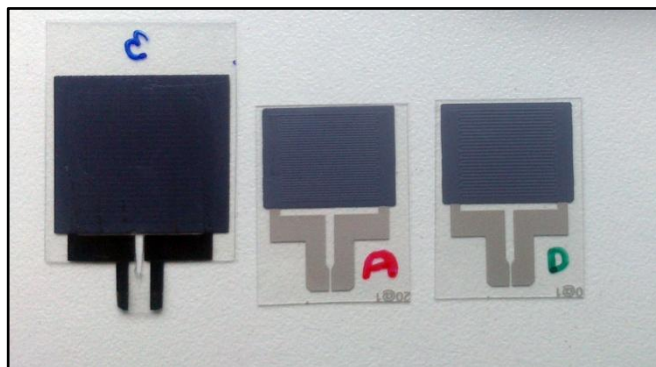
Flexibilní tištěné termistory mají velký potenciál pro využití díky své nízké hmotnosti, mechanické odolnosti, citlivosti a ohebnosti. Mezi některé z mnoha využití lze zařadit již zmíněný senzor tepla, který bývá umístěn v elektronických zařízeních, jako jsou například počítače, tablety nebo chytré telefony. Další využití flexibilního tištěného termistoru je například detekce povrchové teploty těla, kde by byl termistor obsažen v některém z mnoha nošených zařízení. [17]

4.2 Měření tištěných flexibilních termistorů

Tato kapitola se bude věnovat experimentálnímu měření základních elektrických parametrů na připravených vzorcích tištěných flexibilních termistorů.

4.2.1 Příprava vzorků k měření

První sada vzorků flexibilních tištěných NTC termistorů byla již při předání připravena k měření a jednotlivé vzorky se dali jednoduše připojit na konektory FPC. První sada byla označena jako S0 a jednotlivé vzorky byly označeny čísly od 1 do 7. Druhou a třetí sadu vzorků flexibilních tištěných NTC termistorů bylo nutné rozstříhat dle stříhových značek na velikosti, pro snadné připojení ke konektorům FPC. Druhá sada byla označena jako S1 a jednotlivé vzorky byly označeny písmeny od A do F červenou barvou. Třetí sada byla označena jako S0 a její vzorky byly obdobně jako u předchozí sady označeny zelenou barvou písmeny od A do F. Veškerá manipulace se vzorky probíhala při navlečených gumových rukavicích tak aby nedošlo k nežádoucímu znečištění vzorků. Pro zlepšení upevnění v konektorech FPC bylo použito podložení vzorků za pomoci fólie, která byla vložena pod každý vzorek. Celkově tedy bylo k dispozici 19 vzorků flexibilních tištěných termistorů.



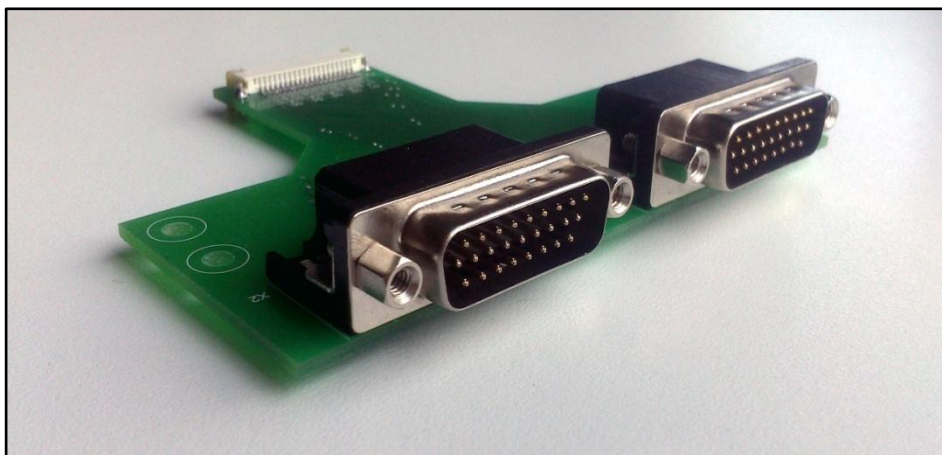
4.4 Ukázka jednotlivých tištěných flexibilního termistorů ze tří sad vzorků

4.2.2 Použité přístroje

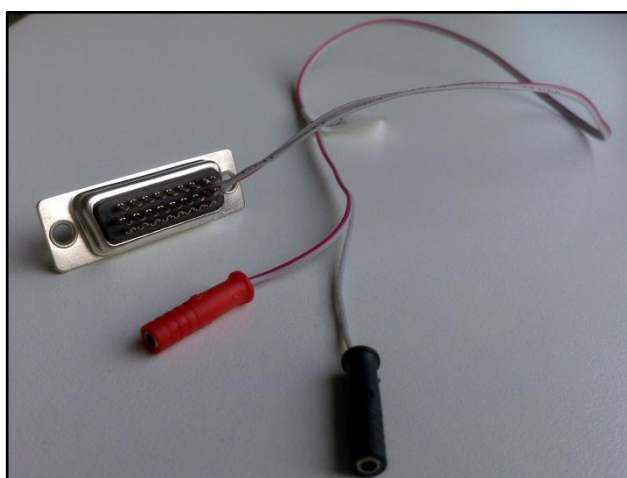
Tato podkapitola slouží k představení základních použitých přístrojů při měření flexibilních tištěných termistorů.

Všechny měření pro sady vzorků flexibilních tištěných termistorů byly prováděny v termostatické olejové lázni Lauda ProLine PJ 12 C. Ta je opatřena kompresorem Lauda DLK 45, který slouží k zlepšení chlazení, ale také jako prostředek pro možné promíchávání oleje v lázni, čímž docílíme rovnoměrné teploty kapaliny. Termostatická olejová lázeň byla ovládána softwarem Wintherm Plus a k přenosu dat s počítačem bylo nutné propojit lázeň k počítači pomocí sériového portu. V tomto programu jednak možné nastavit požadovanou teplotu a rychlost proudění kapaliny a další parametry, ale hlavně aktuálně snímal, zobrazoval a následně ukládal naměřené hodnoty do příslušných souborů. Bylo v něm také možné naprogramovat celý měřicí cyklus pro měření závislosti odporu na teplotě. Pro správný běh měřicího cyklu bylo nutné vhodně nastavit konstanty PID regulátoru. Mezní teplotní interval pro lázeň je mezi -40°C a 200°C , tyto hodnoty však byly omezeny použitým olejem Kryo 51 jehož teplotní omezení je od -50 do 120°C . Během praktických testů bylo zjištěno, že nejspolehlivěji pracuje lázeň při teplotách nad 30°C .

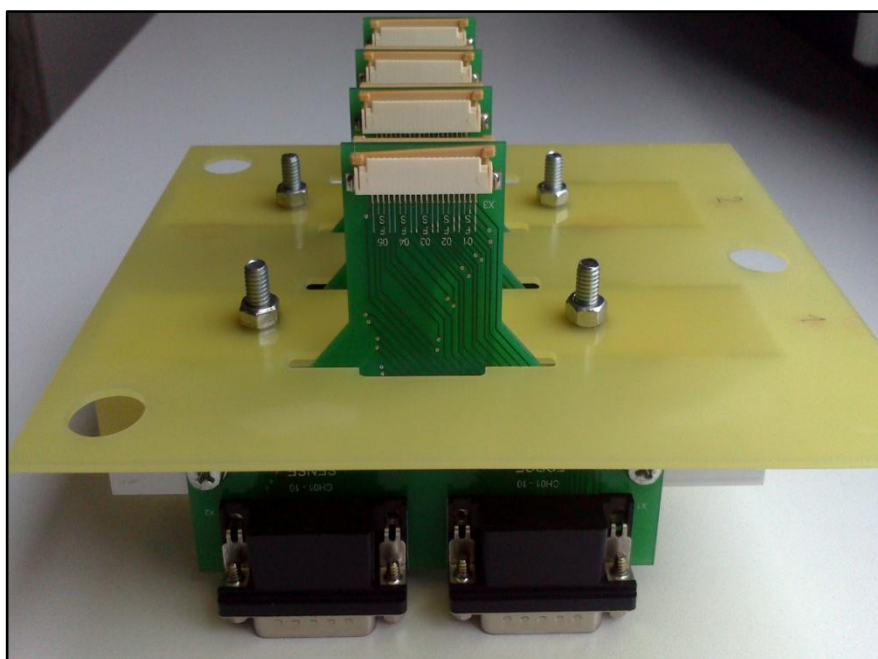
Pro vložení, upevnění flexibilních tištěných termistorů v termodynamické lázni a hlavně připojení termistorů k příslušným měřicím přístrojům bylo nutné použít měřicí modul se čtyřmi zásuvnými oboustrannými kartami. Každá z nich byla opatřena kontaktními ploškami pro plošný konektor typu FPC s 20-ti kontaktními piny. Pro naše měření byly využity piny pouze pro kanály 3 a 8. K těmto kanálům byly připraveny propojovací kabely pro připojení příslušné karty s D-sub konektorem k vývodům sondy SMU jednotky Keithley 2600 k dvoubodovému měření. Při měření závislosti odporu na teplotě byl měřicí přístroj Digitální multimetr Keithley 2700 s multiplexorem připojen na zásuvné karty pomocí D-sub konektorů a proto použití připravených propojovacích kabelů již nebylo nutné. Logování naměřených dat do PC bylo zajištěno propojením příslušného měřicího přístroje k danému PC a použitím vhodných softwarů daných výrobcem přístrojů.



4.5 Ukázka jedné zásuvné karty s D-sub a FPC konektory



4.6 Ukázka propojovacího kabelu pro připojení příslušné karty zásuvné karty



4.7 Měřicí modul opatřený čtyřmi zásuvnými kartami

4.2.3 Postup měření

Tato podkapitola slouží k popsání postupu měření jednotlivých charakteristik termistoru.

4.2.3.1 Postup při proměření voltampérové charakteristiky

Po zapnutí nejprve termostatické olejové lázně a poté kompresoru bylo nutné zkontrolovat hladinu oleje v lázni v případě dosažení požadované hladiny bylo možné začít s měřením. Jako první bylo nutné zajistit, aby vzorky byly zapojeny v měřícím systému, na příslušné kanály pomocí zásuvných oboustranných karet s FPC konektorem. Poté se celý tento měřící modul vložil do termostatické lázně. Po připojení vzorků byla programem Wintherm Plus nastavena požadovaná teplota. V našem případě probíhalo měření voltampérových charakteristik pro 0°C, 20°C a 100°C. Za pomoci programu od výrobce měřícího přístroje Keithley bylo nastaveno proměření VA charakteristik od -10V do 10V s krokem 0,5V. Toto měření probíhalo dvoubodovou metodou, tedy sonda využívala pouze Force svorky pro + (HI) a svorky pro - (LO) jejichž hodnoty se zanašely do multimetru skrze GPIB rozhraní a výsledné hodnoty se zobrazují na displeji počítače.

4.2.3.2 Postup při měření závislosti odporu na teplotě

Na začátku bylo nutné zapnout Digitální multimetr Keithley 2700 s multiplexorem propojit ho s příslušným PC pro logování dat, stejně tak bylo nutné zapnout termostatickou olejovou lázeň, kompresor a následně bylo nutné zkontrolovat hladinu oleje v lázni.

Nejprve byly jednotlivé vzorky připojeny a upevněny na jednotlivé kanály zásuvných oboustranných karet, které byly poté vloženy do termostatické olejové lázně. Po vložení vzorků do lázně byl programem Wintherm Plus naprogramován příslušný měřící cyklus od -20°C do 120°C s krokem 10°C a s optimální dobou ustálení. Naměřené hodnoty teplot byly zaznamenávány právě programem Wintherm Plus. Celý měřící proces bylo možné sledovat na PC pomocí aktuálních výsledků zaznamenávaných do grafu. Toto měření probíhalo čtyřbodovou metodou, takže sonda využívala konektory Force i Sense, a bylo tedy možné připojit a měřit 4 vzorky najednou. Za pomoci programu od výrobce měřícího přístroje Keithley byly výsledné hodnoty odporů přenášeny do počítače a následně exportovány do Excelu.

4.2.3.3 Postup při měření závislosti odporu na proudu

Jako první krok přípravy k měření bylo zapotřebí zapnout SMU jednotku Keithley 2600 a propojit ho s příslušným PC pro logování dat. Také bylo nutné zapnout termostatickou olejovou lázeň, kompresorem. Nakonec byla zkontrolována hladina oleje v lázni a v případě správného stupně hladiny bylo možné začít s měřením.

Na začátku měření byly vzorky připojeny na příslušné piny FPC konektoru a následně byly vloženy do termostatické lázně. Po připojení vzorků byla programem Wintherm Plus nastavena požadovaná teplota, v našem případě probíhalo měření závislosti odporu na proudu pro teploty 0°C, 20°C a 100°C. Za pomoci programu od výrobce měřicího přístroje Keithley byl vytvořen seznam hodnot pro proměření charakteristiky od 1μA do 500μA. Cílem měření bylo dosáhnout bodu, při kterém odpor termistoru začne klesat vlivem ohřevu způsobeného protékajícím proudem. Toto měření probíhalo dvoubodovou metodou, tedy sonda využívala pouze Force svorky pro + (High) a svorky pro – (Low) jejichž a výsledné hodnoty se vkládaly do počítače.

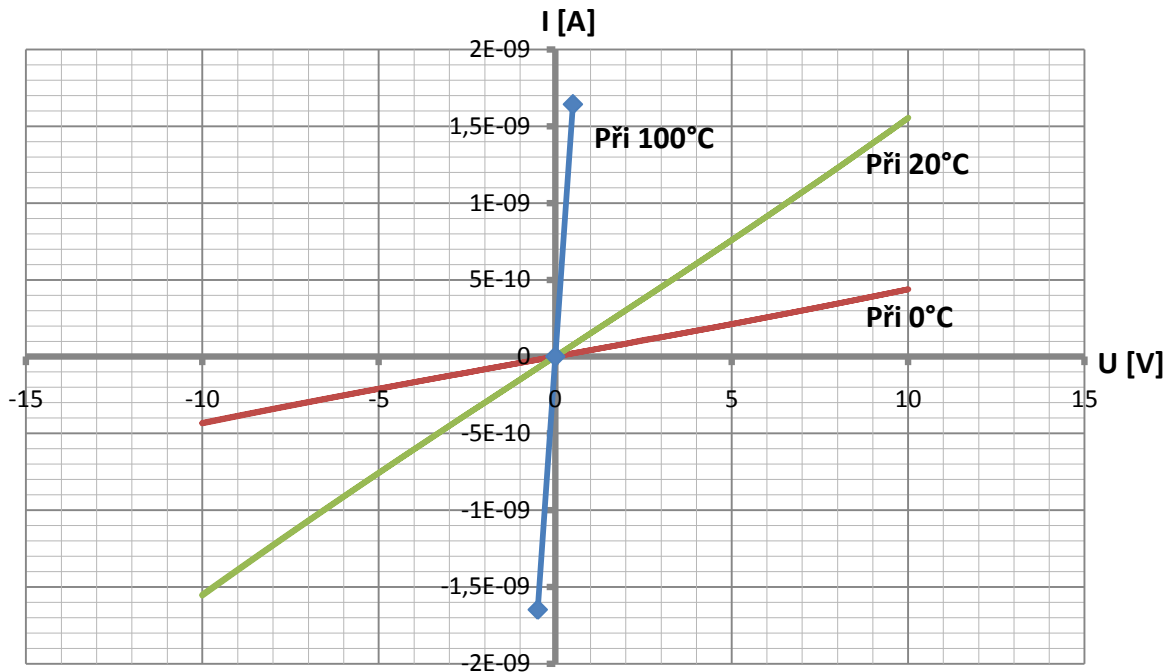
4.2.4 Naměřené charakteristiky termistoru

Tato podkapitola slouží k zobrazení výsledků měření jednotlivých charakteristik příslušných vzorků.

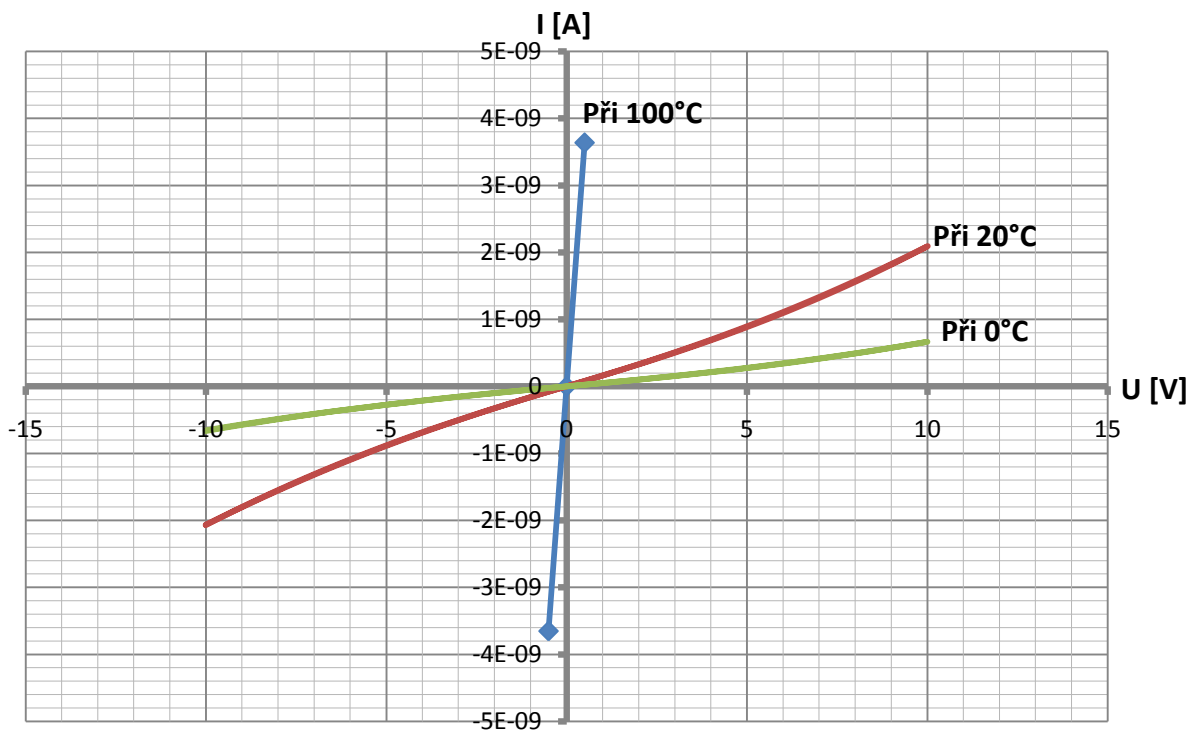
4.2.4.1 Voltampérová charakteristika

Jednou z nejdůležitějších charakteristik termistoru vedle závislosti odporu na teplotě je voltampérová charakteristika. Voltampérová charakteristika byla změřena postupným zvyšováním elektrického proudu v zadaném rozsahu napětí od -10V do 10V s krokem 0,5V. Charakteristiky byly měřeny v pracovní oblasti, tedy v oblasti kde napětí roste lineárně podle Ohmova zákona, protože proud procházející termistorem je malý a tedy se jím vzorek ohřívá velmi málo a jeho odpor se prakticky nemění. Výsledné voltampérové charakteristiky sestavené na základě měření vzorků jsou na následujících grafech.

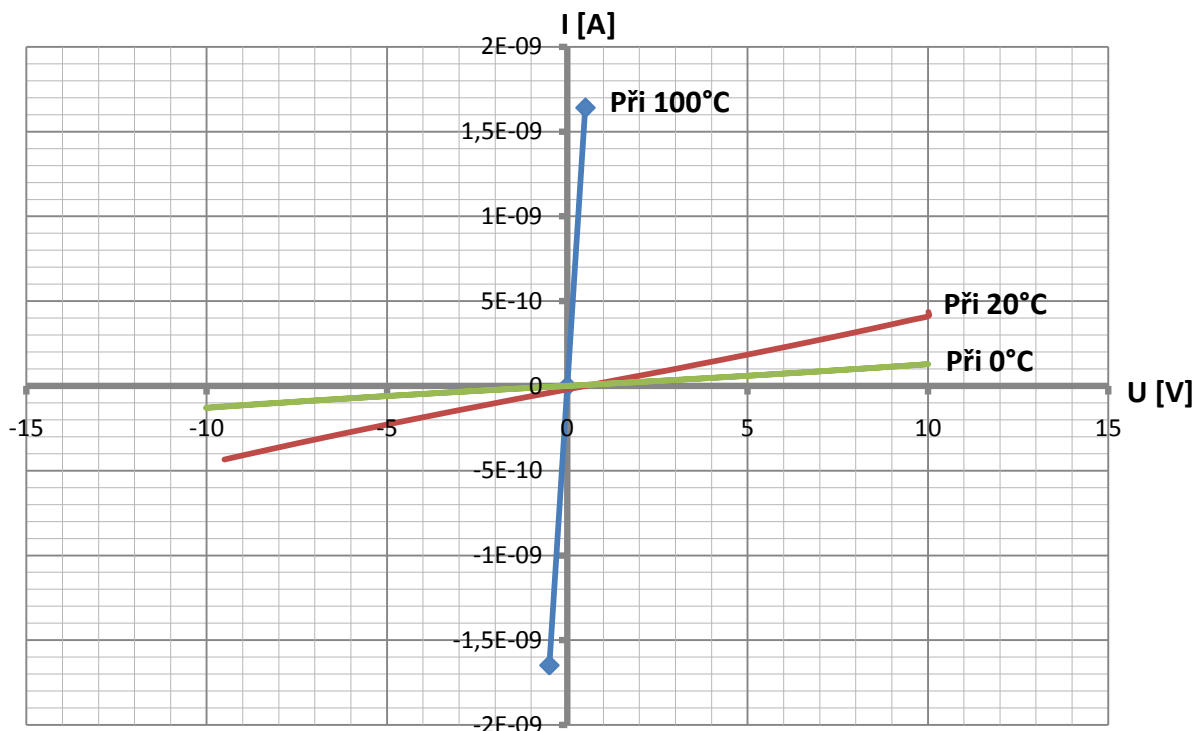
Výsledné voltampérové charakteristiky odpovídají teoretickému předpokladu a velmi se blíží lineárnímu funkci. V případě druhé sady vzorků však méně než u jiných. Také lze vypožorovat, že s rostoucí teplotou je výsledná lineární funkce strmější a odpor se zvyšující teplotou snižuje.



4.8 Voltampérová charakteristika vzorku 1 ze sady S0 při třech měřených teplotách



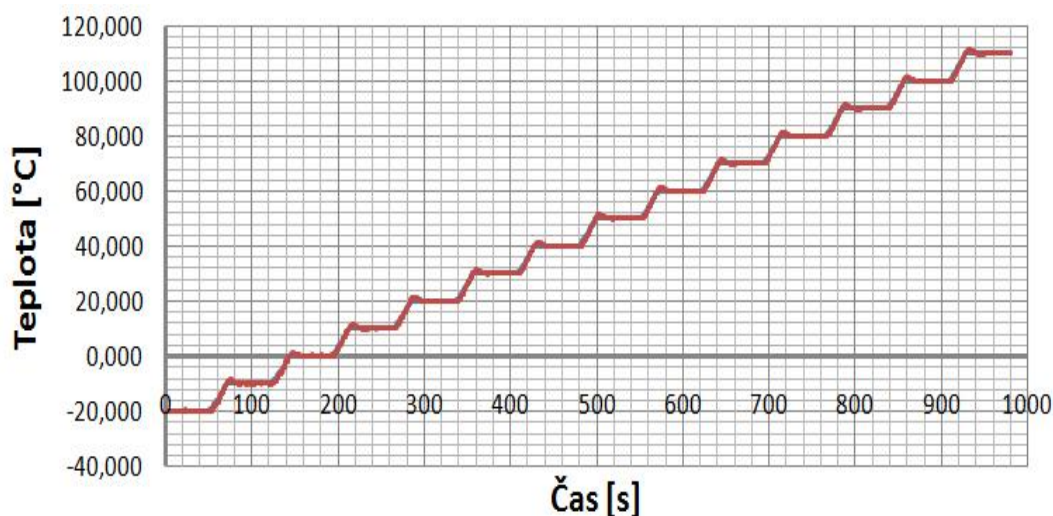
4.9 Voltampérová charakteristika vzorku B ze sady S1 při třech měřených teplotách



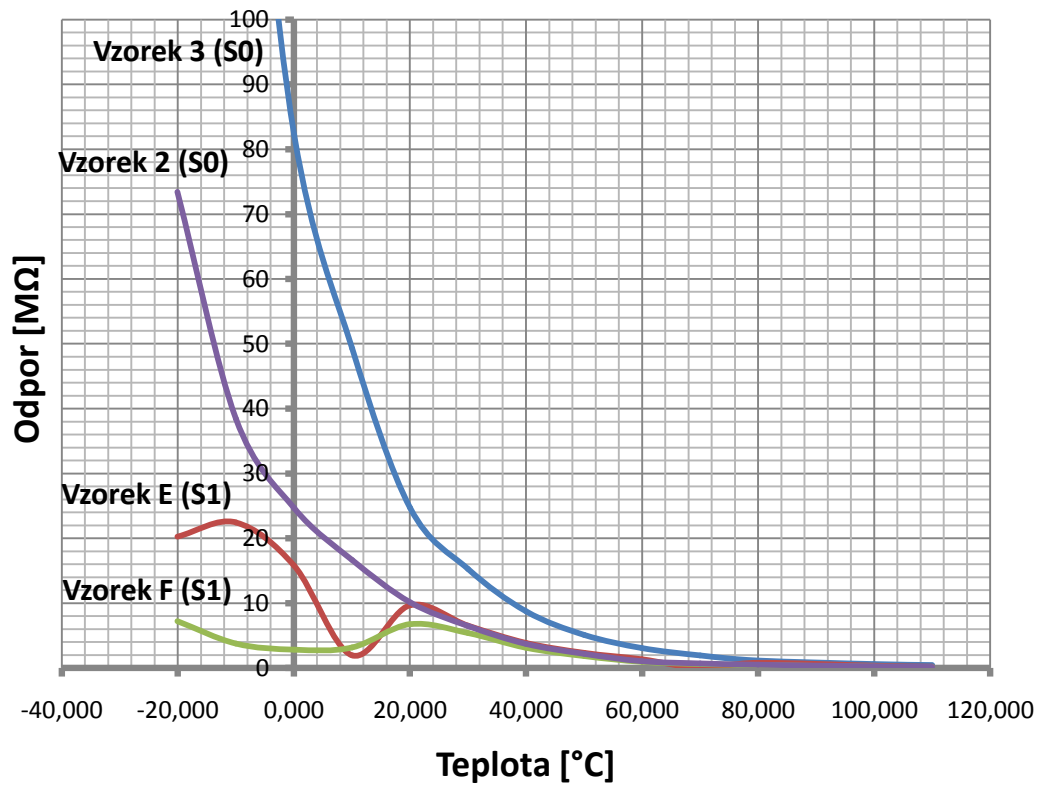
4.10 Voltampérová charakteristika vzorku A ze sady S2 při třech měřených teplotách

4.2.4.2 Závislost odporu na teplotě

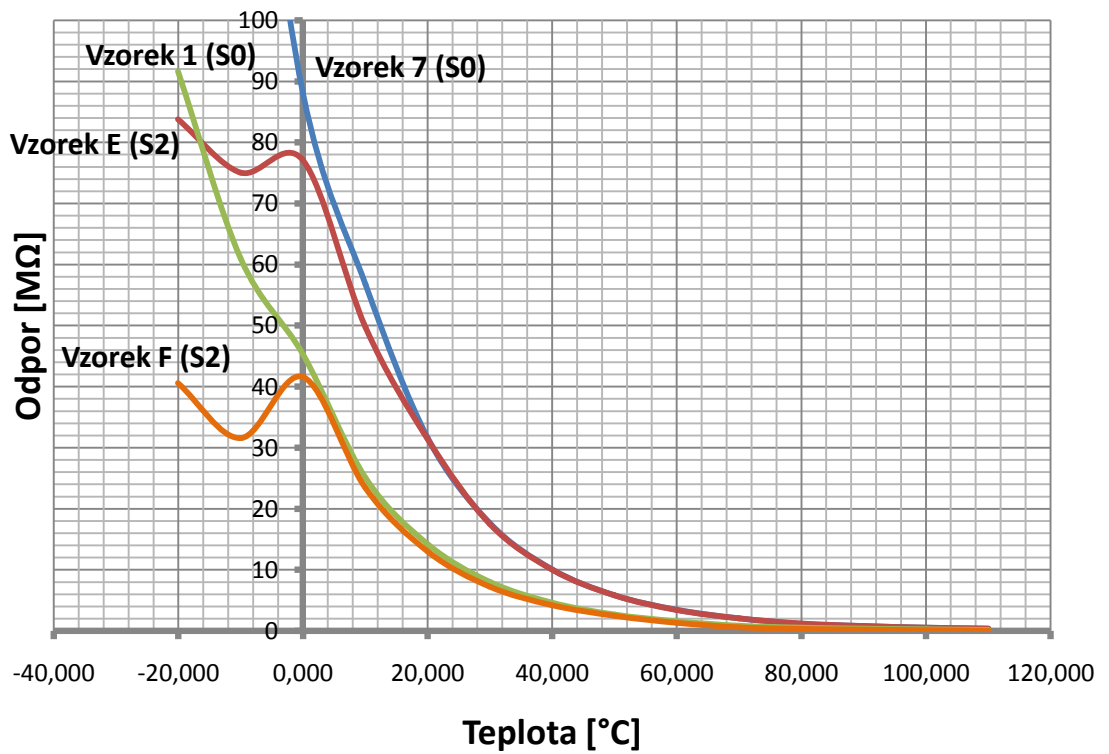
Další důležitá charakteristika termistoru je závislost odporu na teplotě. Charakteristika byla změřena postupným zvyšováním teploty a odečítáním hodnot odporu. Charakteristiky byly měřeny v rozsahu od -20°C do 120°C s krokem 10°C . Výsledné charakteristiky odpovídají teoretickému předpokladu a odpor nelineárně klesá se zvyšující teplotou. Výsledné charakteristiky závislosti odporu na teplotě jsou uvedeny na následujících grafech.



4.11 Proměřovaný teplotní rozsah od -20°C do 120°C s krokem 10°C



4.12 Charakteristická závislost odporu na teplotě pro čtyři vzorky ze sad S0 a S1



4.13 Charakteristická závislost odporu na teplotě pro čtyři vzorky ze sad S0 a S2

U druhé a třetí sady vzorků je možné pozorovat, že odpor nelineárně klesá až od určité hodnoty teploty, u druhé sady vzorků (značena S1) tato hodnota teploty je rovna 20°C, oproti tomu u třetí sady (značena S2) je tato hodnota rovna 0°C. Tento jev nelze vypořádat u první sady vzorků (značena S0), neboť je průběh čistě nelineárně klesající v celém rozsahu teplot.

Postup použití Steinhart-Hartovi kalibrační metody byl následující. Pro zmenšení chyb měření byl využit vztah s polynomem vyššího stupně, který pro většinu běžných aplikací termistorů postačuje.

$$\ln R = A + B \frac{1}{T} + D \frac{1}{T^2} + C \frac{1}{T^3} \quad (4.1)$$

Pro určení S-H koeficientů jsem zvolil při měření odporu NTC termistoru tři teplotní body. Jako spodní minimum jsem zvolil teplotu -20°C a pro horní maximum jsem zvolil teplotu 120°C. Tedy střední teplotní bod vychází na 70°C. Pro druhou a třetí sadu vzorků byly tyto body posunuty, tak aby spodní minimum bylo umístěno v počátku čistě nelineárně klesajícího průběhu v celém rozsahu teplot.

Vyloučení kvadratického členu $D(\ln R)^2$ z rovnice nezpůsobí významný pokles v přesnosti při měření teploty, proto byl z rovnice vypuštěn. A tedy pro termodynamickou teplotu termistoru T dostáváme Steinhart–Hartův vztah.

$$T_i^{-1} = A + B \cdot \ln R_i + C \cdot (\ln R_i)^3 \quad (4.2)$$

Soustavu třech rovnic o třech neznámých lze vyřešit a po úpravě dostáváme následující vztahy pro výpočet koeficientů A , B a C .

$$C = \frac{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) - [(\ln R_1) - (\ln R_2)] \cdot \frac{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_3}\right)}{(\ln R_1) - (\ln R_3)}}{[(\ln R_1)^3 - (\ln R_2)^3] - [(\ln R_1) - (\ln R_2)] \cdot \left[\frac{(\ln R_1)^3 - (\ln R_3)^3}{(\ln R_1) - (\ln R_3)}\right]} \quad (4.3)$$

$$B = \frac{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) - C[(\ln R_1)^3 - (\ln R_2)^3]}{(\ln R_1) - (\ln R_2)} \quad (4.4)$$

$$A^{-1} = T_1 - C(\ln R_1)^3 - B(\ln R_1) \quad (4.5)$$

Materiálovou konstantu B_T lze pro jednotlivé termistory dopočítat pomocí vztahu:

$$B_T = \left(\frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \right) \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (4.6)$$

Dle doporučení DIN pro výpočet materiálové konstanty B_T dosazují odpory při teplotách 18°C a 85°C. Jedním z dalších parametrů, který je možné z měření vypočítat je teplotní součinitel odporu α pomocí vztahu (4.7).

$$\alpha = \frac{A^{-1}}{C} \quad (4.7)$$

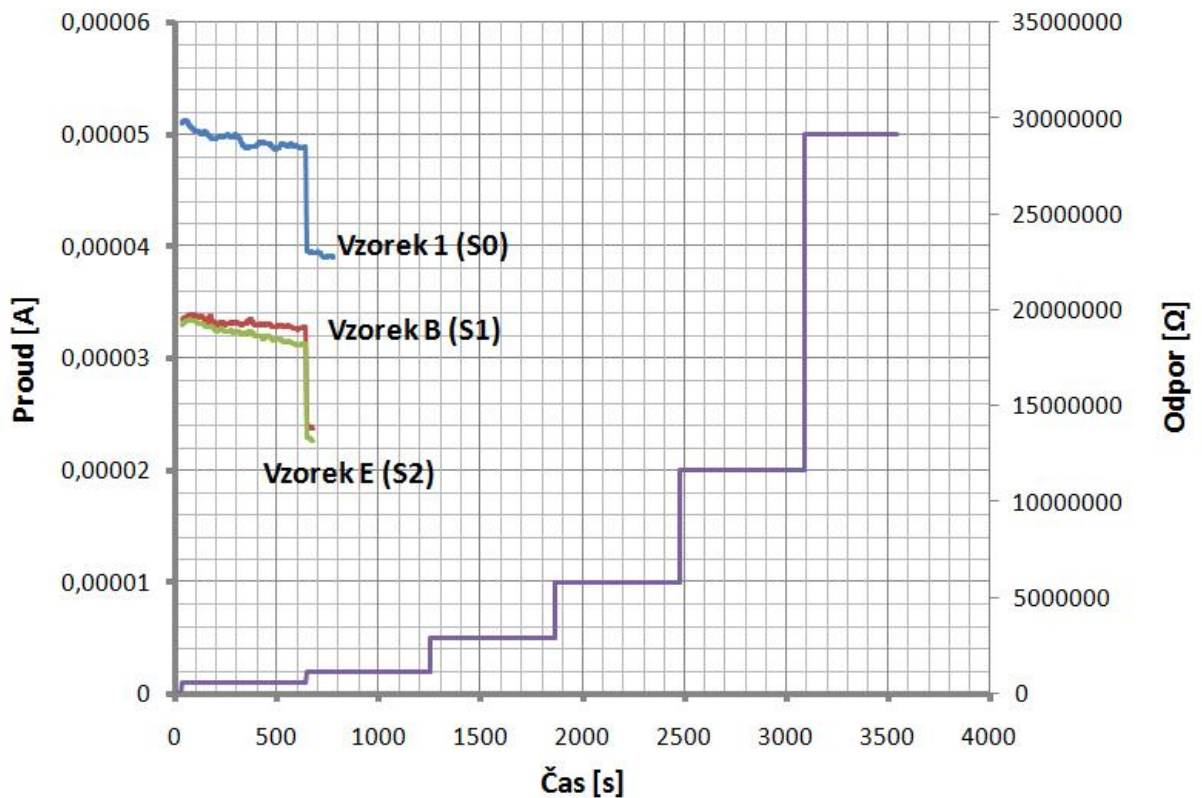
Vypočítané hodnoty pro vybrané vzorky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 4.1 Vypočítané parametry zvolených termistorů z každé sady vzorků

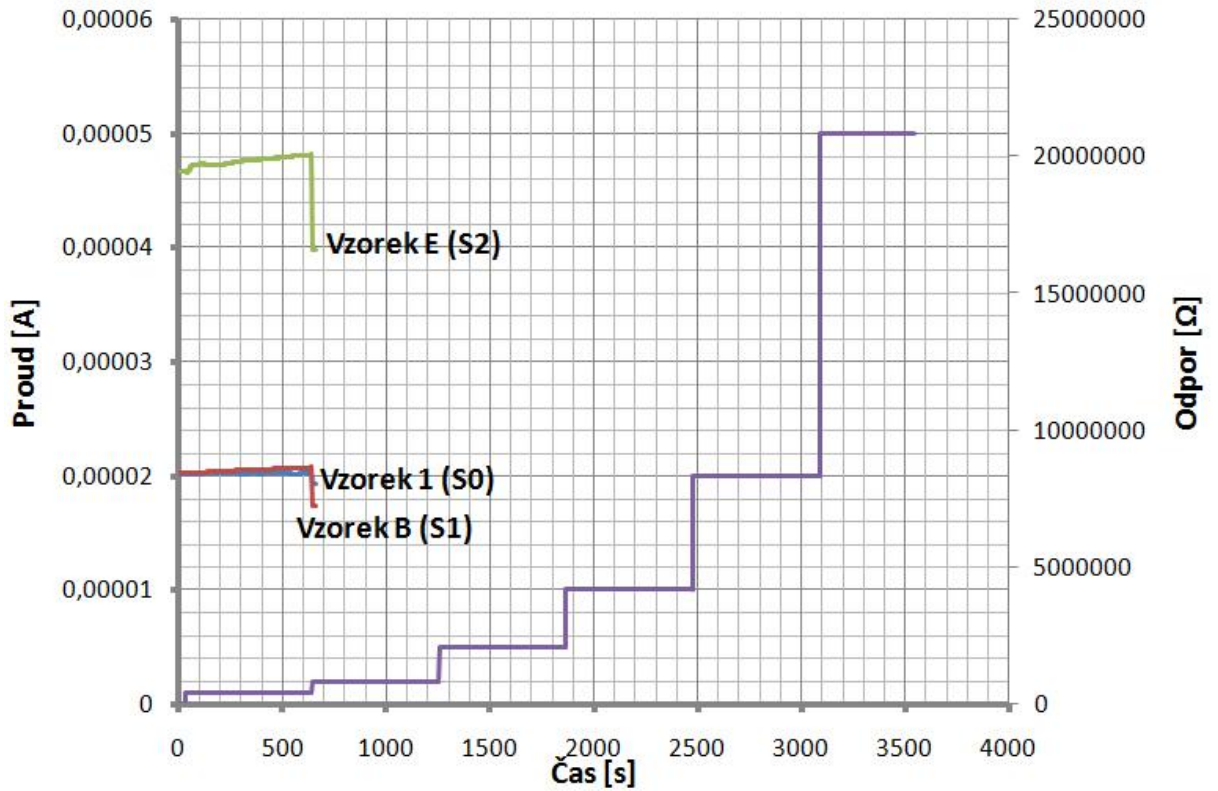
Vzorek	Sada Vzorků	S-H koeficienty			B_T [K]	α [1/K]	R_{25} [M Ω]
		A	B	C			
3	S0	0,0533	1,9561	0,7167	4961,60	-0,3013	17,86
2	S0	0,7724	1,3332	1,2605	4444,70	-0,2937	6,24
E	S1	-0,4467	2,7632	-1,4704	5422,82	-0,0085	7,44
F	S1	1,1514	0,7619	2,7632	3687,39	-0,0475	4,90
E	S2	0,7762	1,4290	0,6491	5243,91	-0,2699	9,87
F	S2	3,0213	-0,7499	3,6534	5217,66	-0,3315	9,18

4.2.4.3 Závislost odporu na proudu

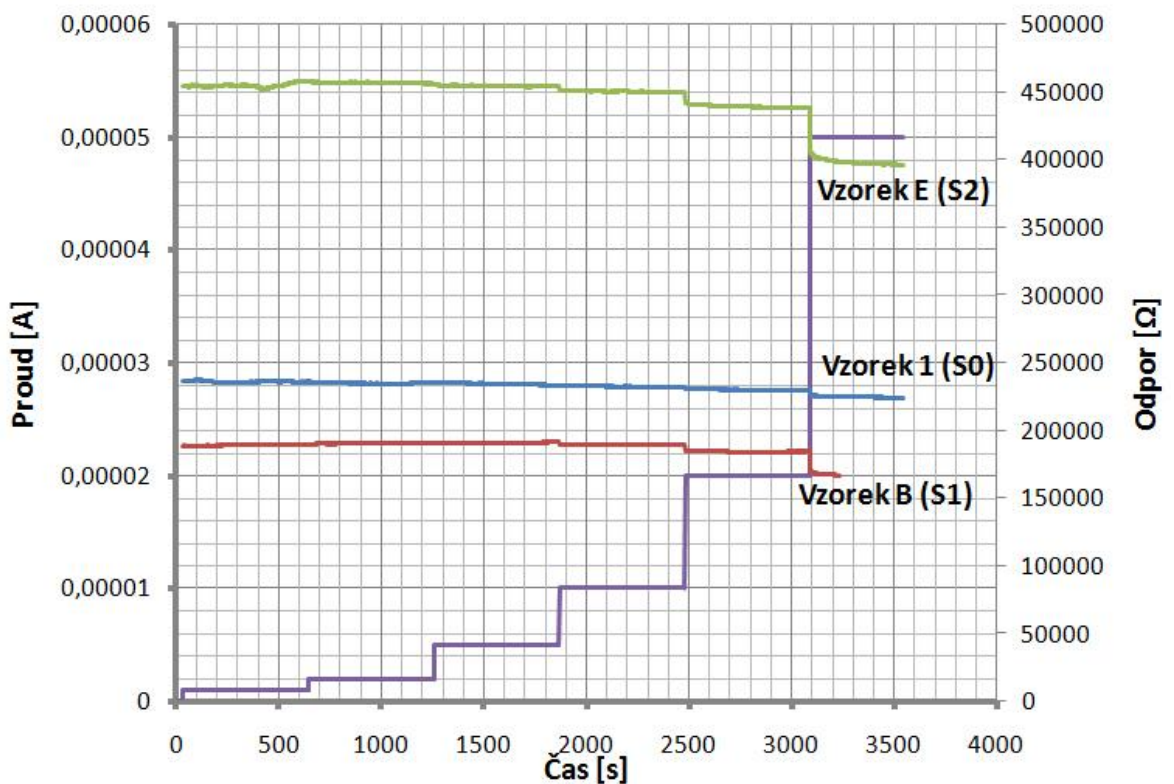
Poslední z měřených charakteristik termistoru byla závislost odporu na proudu. Charakteristika byla změřena postupným zvyšováním proudu a odečítáním hodnot odporu. Cílem měření bylo hledání bodu, při kterém dojde k samoohřevu termistoru procházejícím proudem, což má za následek strmý pokles odporu. Z charakteristik lze vypočítat fakt, že při zvyšující teplotě se tento bod samoohřevu projevuje až při vyšším proudu, oproti tomu při nižších teplotách dochází k tomuto bodu při mnohem nižších proudech. Výsledné charakteristiky závislosti odporu na teplotě jsou uvedeny na následujících grafech.



4.14 Charakteristická závislost odporu na proudu pro tři vzorky při teplotě 0°C



4.15 Charakteristická závislost odporu na proudu pro tři vzorky při teplotě 20°C



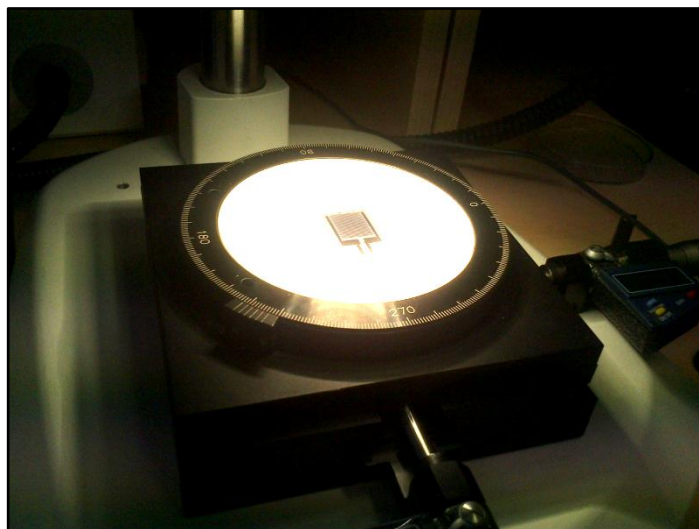
4.16 Charakteristická závislost odporu na proudu pro tři vzorky při teplotě 100°C

4.2.5 Zhodnocení topologie

Tato závěrečná část bakalářské práce se bude věnovat topologii termistorů a jejímu vlivu na chování termistorů.

V případě první sady vzorků, byly tištěné layouts předem zhotoveny z uhlíkových inkoustů pomocí AJP technologie a následně deponovány na PET substrát přesněji jde o PET Melinex 504 substrát. U druhé a třetí sady byly tištěné layouts předem zhotoveny ze stříbrných inkoustů pomocí AJP technologie a následně deponovány na PET substrát. Dané sady se od sebe liší pouze šířkou odporových cest. Jak již bylo zmíněno, vzorků bylo celkem 19, prvních sedm vzorků bylo z první sady a následujících dvě sady měly po šesti vzorcích.

Pro zkoumání topologie předložených vzorků flexibilních tištěných termistorů bylo nejprve nutné všechny vzorky podrobit optické inspekci za pomoci mikroskopu Olympus SZX10. Následně bylo nutné vypracovat obrazovou analýzu všech snímků, pořízených digitální kamerou Lumenera Infinity 1-3C. Na každém snímku byla změřena šířka elektrod, šířka odporové mezery. Poté byly změřeny i doplňující údaje jako šířka a délka celého vzorku. Zakončení jednotlivých elektrod, které slouží k propojení mezi jednotlivými elektrodami, bylo změřeno ve formě šířky zakončení nebo jako délka celkové cesty spojení.



4.17 Ukázka provádění optické inspekce

Po dokončené optické inspekci a obrazové analýze, bylo možné z výsledků určit pro první sadu průměrnou šířku elektrod na hodnotu 318,77 μm a průměrnou šířku odporových cest na hodnotu 283 μm . Průměrná šířka elektrod pro druhou sadu byla stanovena na hodnotu 262,22 μm a průměrná šířka odporových mezer vychází 62,55 μm . U třetí sady byla průměrná šířka rovna 238,66 μm a šířka odporové mezery byla rovna 165 μm . Výsledky jednotlivých vzorků lze nalézt v následujících tabulkách. Snímky jednotlivých obrazových analýz je možné vidět na obr 4.19 na kterém je vzorek 1 z první sady, dále vzorek D z druhé sady lze vidět na obr 4.20 a na obr 4.21 je zobrazen vzorek A ze třetí sady.

Tabulka 4.2 Naměřené a vypočítané hodnoty pro první sadu vzorků S0

Vzorek	1	Sada	První	Označení Sady	S0			
Měření šířky vodivých cest			Pr. šířka	Měření šířky izolačních mezer			Pr. šířka	
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	
321	311	318	316,667	286	286	295	289	
Vzorek	3	Sada	První	Označení Sady	S0			
Měření šířky vodivých cest			Pr. šířka	Měření šířky izolačních mezer			Pr. šířka	
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	
318	318	318	318	289	289	292	290	
Vzorek	6	Sada	První	Označení Sady	S0			
Měření šířky vodivých cest			Pr. šířka	Měření šířky izolačních mezer			Pr. šířka	
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	
321	330	314	321,667	270	270	270	270	

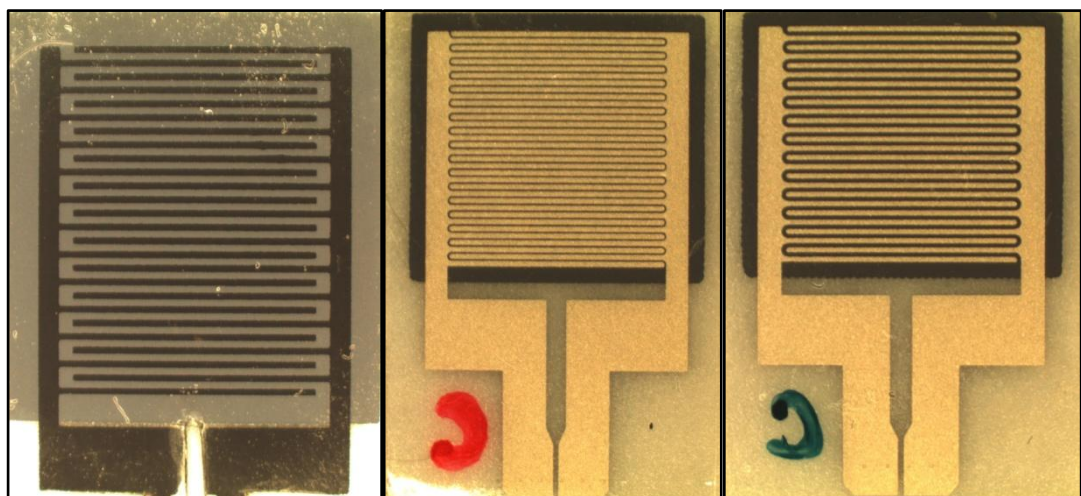
Tabulka 4.3 Naměřené a vypočítané hodnoty pro druhou sadu vzorků S1

W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
267	265	263	265	200	65
Měření šířky izolačních mezer			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
55	63	58	58,667	100	41,333
Vzorek	C	Sada	Druhá	Označení Sady	S1
Měření šířky vodivých cest			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
277	272	275	274,667	200	74,667
Měření šířky izolačních mezer			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
66	61	63	63,333	100	36,667
Vzorek	D	Sada	Druhá	Označení Sady	S1
Měření šířky vodivých cest			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
242	252	247	247	200	47
Měření šířky izolačních mezer			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
69	63	65	65,667	100	34,333

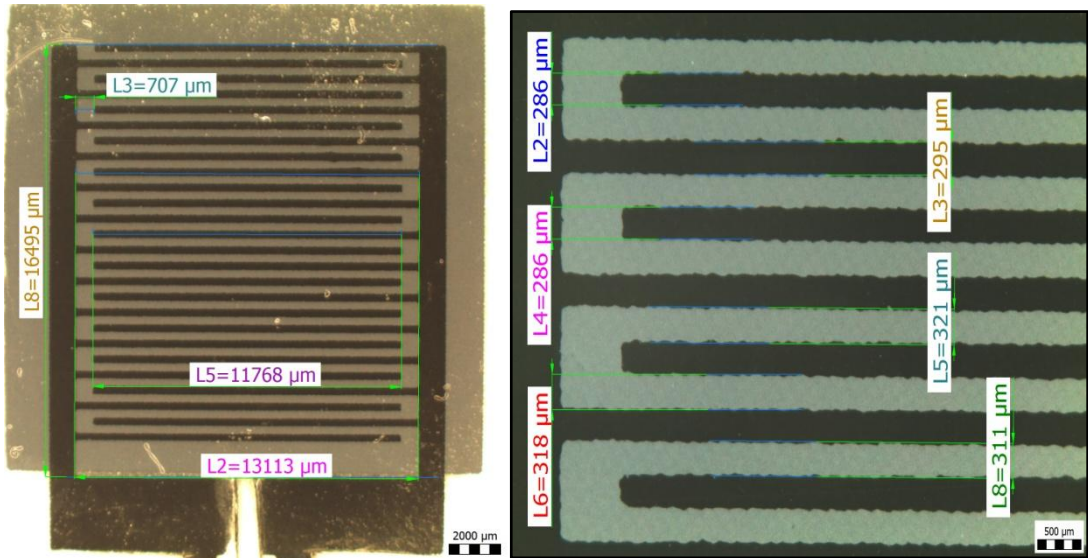
Tabulka 4.4 Naměřené a vypočítané hodnoty pro třetí sadu vzorků S2

Vzorek	A	Sada	Třetí	Označení Sady	S2
Měření šířky vodivých cest			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
244	248	243	245	200	45
Měření šířky izolačních mezer			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
157	156	156	156,333	200	43,667
Vzorek	C	Sada	Třetí	Označení Sady	S2
Měření šířky vodivých cest			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
231	224	227	227,333	200	27,333
Měření šířky izolačních mezer			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
174	176	169	173	200	27
Vzorek	D	Sada	Třetí	Označení Sady	S2
Měření šířky vodivých cest			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
247	240	244	243,667	200	43,667
Měření šířky izolačních mezer			Průměrná šířka	Šířka dle návrhu	Absolutní odchylka
W1[μm]	W2[μm]	W3[μm]	Wp [μm]	Wn [μm]	$\Delta W=Wp-Wn$ [μm]
166	165	166	165,667	200	34,333

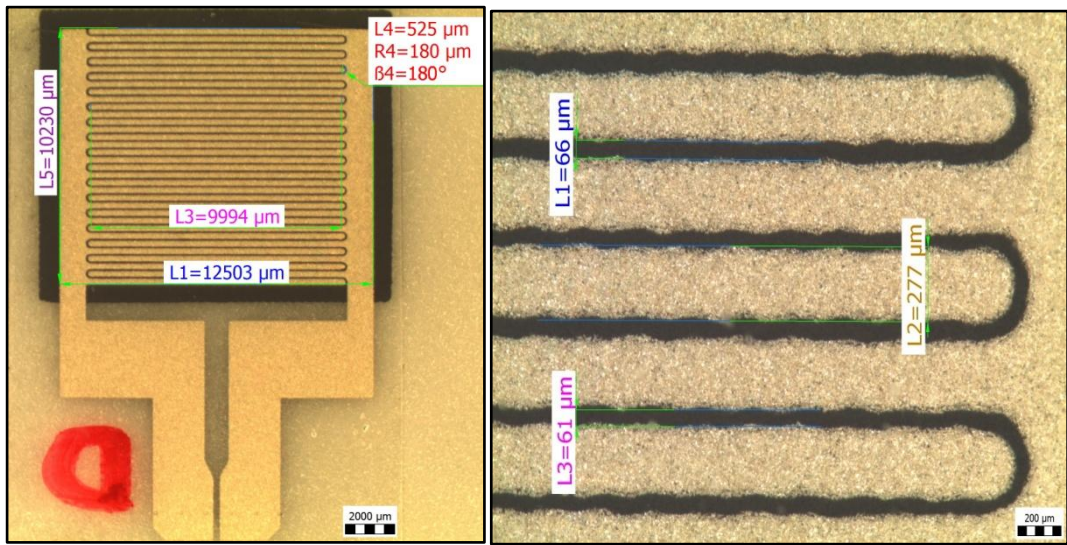
Dle uvedených výsledků lze vypočítat, že se šířka izolačních i vodivých cest liší od původní navrhované šířky. Počet čtverců se také liší, v případě první sady vzorků je výsledný počet čtverců 1080. U druhé sady počet čtverců vychází průměrně kolem 5330, tedy vychází o dost větší v porovnání s navrhovaným počtem 3450. U třetí sady je průměrný počet čtverců roven 1508 a opět se liší od původní navrhované hodnoty počtu čtverců 1300.



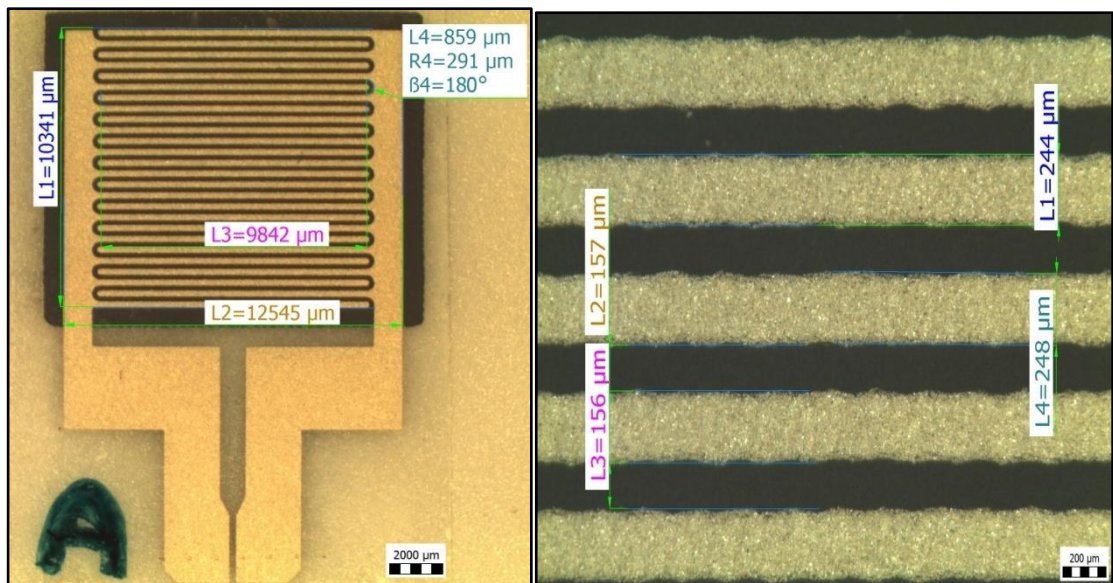
4.18 Ukázka jednotlivých tištěných flexibilního termistorů ze tří sad vzorků při optické inspekci



4.19 Obrazová analýza vzorku 1 ze sady vzorků S0



4.20 Obrazová analýza vzorku D ze sady vzorků S1



4.21 Obrazová analýza vzorku A ze sady vzorků S2

Počet čtverců byl vypočítán ze vztahu (4.8), tedy poměrem šířky (značena W) a délky (značena L) izolační mezery, a následně vynásobený počtem izolačních mezer (značen n).

$$SQ = \frac{W}{L} * n \quad (4.8)$$

Z obrazové analýzy všech snímků bylo také možno zjistit základní rozměry flexibilních tištěných termistorů. Vzorke z první sady mají průměrnou šířku 17,112mm a délku 24,680mm. Průměrná šířka druhé sady vzorků je 12,700mm a jejich délka je rovna 20,660mm, tyto rozměry se velmi blíží rozměrům vzorků z třetí sady, kde byla naměřena šířka 12,670mm a délka 20,576mm. Z výsledků je patrné, že první sada vzorků byla rozměrově mnohem větší než ostatní vzorky z druhé a třetí sady vzorků.

Závěr

V této bakalářské práci jsem shrnul základní informace o teplotě a dalších fyzikálních vztazích spojených s teplotou pro poskytnutí nutných znalostí, potřebných k práci se senzory teplot. Hlavní část mé práce se zabývá typy používaných termistorů, jejich konstrukční provedení a materiálové složení. Společně s popisem funkce termistorů, uvedením jejich základních parametrů a vyobrazením příslušných charakteristik, by tyto informace měly sloužit ke kompletnímu seznámení s termistory.

V další části mé práce jsem se zaměřil na základní seznámení s problematikou historie a vývoje flexibilní a tištěné elektroniky. Ze které vyplývá, že jde o relativně nové technologie a jejich vývoj jde stále kupředu. Samostatně jsem se věnoval problematice termistorů, které jsou vyráběny tiskovými technikami.

Na základě teoretického rozboru metod měření termistorů a postupů jejich kalibrace, bylo navrženo několik postupů měření a po praktickém seznámení s parametry a ovládním termostatické lázně Lauda ProLine PJ 12 C, digitálního multimetru Keithley 2700 s multiplexerem a SMU jednotky Keithley 2600, byl zrealizován a experimentálně vyzkoušen v laboratoři měřicí systém pro základní teplotní charakterizaci termistorů. Při návrhu a realizaci měřicího obvodu byly získány důležité poznatky a zkušenosti, cenné pro případné další práce. Proměřením základních charakteristik $I(V)$, $R(I)$ a $R(t)$ všech sad vzorků byla ověřena správnost teoretických předpokladů.

V závěrečné části bakalářské práce jsem zhodnotil vliv topologie termistorů dle uvedených výsledků. Vyzoroval jsem rozdíl mezi navrhovanými šířkami odporových a vodivých cest, který je markantní především u druhé a třetí sady vzorků termistorů. Což vedlo k odlišnosti mezi skutečným a navrhovaným počtem čtverců.

Flexibilní tištěné termistory se velmi rychle vyvíjejí a jejich využití v dnešních elektronických zařízeních je velmi vysoké. Dnešní doba vyžaduje především levné součástky s vysokou integrací a právě vývoj v oblasti flexibilní a tištěné elektroniky je ten správný směr jak toho dosáhnout.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MARCEL, Kreidl. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] MANFRED, Frohn. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [3] JAROSLAV, Doleček. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, nedatováno. ISBN 80-7300-161-6.
- [4] RENATA, Střiteská. *Moderní metody měření teploty*. B.m., 2010. Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [5] JANDÍKOVÁ, Gabriela. *Vliv polyanilinové vrstvy na elektrické a dielektrické vlastnosti karbonylového železa*. B.m., 2012. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [6] VISHAY INTERTECHNOLOGY. *How to select an NTC Thermistor* [online]. 2015 [vid. 26. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/33001/seltherm.pdf>
- [7] JAEGER, Richard C. *Introduction to Microelectronic Fabrication*. New Jersey: Prentice Hall, 2002. ISBN 0-201-44494-1.
- [8] SCHRODER, Dieter K. *Semiconductor Material and Device Characterization*. New York: J Wiley & Sons, 1998. ISBN 0-471-24139-3.
- [9] VAN ZANT, Peter. *Microchip Fabrication*. New York: McGraw-Hill, 2000. ISBN 0-07-135636-3.
- [10] GORDON, Scott E., Jay R. DORFMAN, Daniel KIRK a Kerry ADAMS. *Advances in Conductive Inks across Multiple Applications and Deposition Platforms*. 2011.
- [11] NEFF, Joel Emerson. *Investigation of the effects of process parameters on performance of gravure printed ito on flexible substrates*. Thesis. 2009, č. August, s. 220.
- [12] PETR, Kačírek. *Materiály pro rezistory integrované ve flexibilních propojovacích strukturách*. B.m., 2009. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [13] MELICHAR, Bohuslav. *Výrobní technologie pro tištěnou a flexibilní elektroniku*. B.m., 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [14] O'REILLY, Stephen, Maeve DUFFY, Terence O'DONNELL, Paul MCCLOSKEY a Seán Cian Ó MATHÚNA. *Integrated passives in advanced printed wiring boards*. *Circuit World* [online]. 2001, roč. 27, č. 4, s. 22–25. ISSN 0305-6120. Dostupné z: doi:10.1108/03056120110398218
- [15] MAHLER, Bruce. *26 - The Design and Use of NiP Embedded Thin_Film Resistive Materials for Series and Parallel Termination*. 2011
- [16] DZIEDZIC, Andrzej. *Carbon/polyesterimide thick-film resistive composites - Experimental characterization and theoretical analysis of physicochemical, electrical and stability properties*. *Microelectronics Reliability* [online]. 2007, roč. 47, č. 2-3, s. 354–362. ISSN 00262714. Dostupné z: doi:10.1016/j.microrel.2006.02.016
- [17] MURATA, Tsuneo. *Murata announces mass production of low profile flexible thermistors* [online]. 2014 [vid. 1. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.murata.com/ja-jp/about/newsroom/news/product/thermistor/2014/1022>
- [18] MURATA, Tsuneo. *Murata Film Temperature Sensor FTNT55XH103FA1A050* [online]. [vid. 1. duben 2016]. Dostupné z: http://www.anglia-live.com/products/sensors-transducers/temperature/ntc-thermistors/1249777001_ftn-10k-25c-ntc-therm