

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

Diplomová práce

Testování stability NTC termistorů

Bc. Jan Kotora

Plzeň 2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KOTORA**
Osobní číslo: **E16N0011P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Testování stability tištěných termistorů**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Prostudujte a stručně shrňte problematiku charakterizace stability termistorů.
2. Zpracujte přehled existujících norem věnujících se testování stability termistorů od významných normalizačních institucí (české i zahraniční).
3. Navrhněte vhodný testovací postup pro charakterizaci dlouhodobé stability tištěných NTC termistorů s ohledem na existující normy a dostupnou laboratorní infrastrukturu.
4. Proveďte výběr nejméně tří typů komerčních NTC termistorů od různých výrobců, které svými nomimálními parametry a konstrukčním provedením budou odůvodněně srovnatelné se vzorky tištěných NTC termistorů.
5. Prakticky otestujte tištěné i komerční termistory dle navrženého postupu, vyhodnoťte stabilitu jejich parametrů a proveďte vzájemné srovnání.

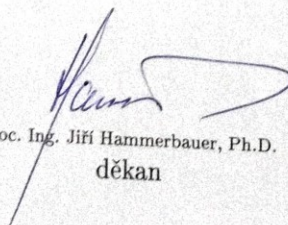
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

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. Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Wiley Online Library, AIP Scitation, Google Scholar, ResearchGate, Mendeley ...) a technická literatura významných výrobců termistorů (QTI, Vishay, Murata, AVX, Omega, ...)

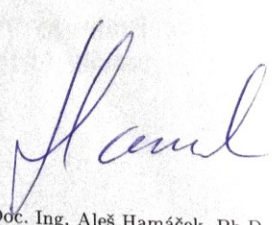
Vedoucí diplomové práce: Ing. Silvan Pretl, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018


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




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

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na testování stability tištěných NTC termistorů. Její součástí je zmapování tuzemských i zahraničních norem a na jejich základě vytvoření efektivního testovacího postupu pro charakterizaci dlouhodobé stability. Dalé pak výběr relevantních komerčních termistorů. Cílem je prakticky otestovat tištěné i komerční termistory dle navrženého postupu a vyhodnotit jejich stabilitu.

Hlavní přínos práce spočívá v navržení efektivního pracovního postupu, který bude založený na informacích z relevantních norem a pomůže vyhodnotit testované NTC termistory. Tento postup pak lze aplikovat při dalším testování stability.

Klíčová slova

NTC Termistor, Stabilita, Klimatické zkoušky, Teplotní citlivost odporu, Odolnost součástek, Tištěná elektronika, Flexibilní elektronika, Aklimatizace...

Abstract

This diploma thesis is focused on testing the stability of printed NTC thermistors. It includes mapping of domestic and foreign standards and, on the basis of these, the creation of an effective testing procedure for characterizing long-term stability. Selection of relevant commercial thermistors is another part of this thesis. The aim is to practically test printed and commercial thermistors according to the proposed procedure and evaluate their stability.

The main benefit of this work is to design an effective workflow based on information from relative standards and to help evaluate NTC thermistors tested. This procedure can be applied for further stability testing.

Key words

NTC Thermistor, Stability, Climate Testing, Thermal Resistance Sensitivity, Resistance of Components, Printed Electronics, Flexible Electronics, Acclimation...

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 24.5.2018

Jan Kotora

Poděkování

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

Dále bych rád poděkoval společnosti TDK Czech s.r.o za jejich ochotu a poskytnuté informace.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 STABILITA ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK	11
1.1 STABILITA A SPOLEHLIVOST	11
1.2 TEST STABILITY	13
1.3 ZÁKLADNÍ ÚČINKY JEDNOTLIVÝCH PARAMETRŮ PROSTŘEDÍ	14
2 TERMISTOR	15
2.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI TERMISTORU	15
2.2 JEDNODUCHÝ MODEL	17
2.3 FRADENŮV MODEL	18
2.4 STEINHARTŮV A HARTŮV MODEL	19
2.5 TEPLTNÍ CITLIVOST ODPORU	20
2.6 FLEXIBILNÍ TIŠTĚNÉ TERMISTORY	22
3 NORMOVANÉ TESTOVÁNÍ STABILITY NTC TERMISTORŮ	25
3.1 PŘEDMĚT NOREM IEC 60068 – KLIMATICKÉ ZKOUŠKY	26
3.2 PODMÍNKY AKLIMATIZACE PŘED I PO ZKOUŠCE	29
3.3 VZORKY UVOLŇUJÍCÍ A NEUVOLŇUJÍCÍ TEPLA	30
3.4 ZKOUŠKY A MĚŘENÍ	32
3.5 NORMÁLNÍ KLIMATICKÉ PODMÍNKY	33
3.6 KLIMATICKÁ, NEZÁVISLÁ A OBECNÁ ŘADA ZKOUŠEK	34
3.7 KATEGORIE KLIMATICKÉ ODOLNOSTI SOUČÁSTEK	36
3.8 TABULKA DOPORUČENÝCH TESTŮ STABILITY SPOLEČNOSTÍ TDK CZECH S.R.O.	40
4 LABORATORNÍ TESTOVÁNÍ STABILITY NTC TERMISTORŮ	41
4.1 ROZBOR ZADÁNÍ A EXPERIMENTÁLNÍ PLÁN	41
4.2 VZORKY TIŠTĚNÝCH NTC TERMISTORŮ PRO TESTOVÁNÍ STABILITY	42
4.3 VÝBĚR RELEVANTNÍCH KOMERČNÍCH NTC TERMISTORŮ	44
4.4 PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ STABILITY TERMISTORŮ	47
4.4.1 Příprava kabeláže	47
4.4.2 Příprava boxů s nastavitelným prostředím	49
4.4.3 Měření v olejové lázni	52
4.5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ STABILITY NTC TERMISTORŮ	54
4.6 DISKUZE VÝSLEDKŮ	60
ZÁVĚR	61
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	62
SEZNAM PŘÍLOH	64

Seznam symbolů a zkratek

°C	Jednotka teploty
h	Jednotka času
Hz.....	Jednotka frekvence
K.....	Jednotka teploty
kPa	Jednotka tlaku
m	Jednotka délky
mbar	Jednotka tlaku
W.....	Jednotka výkonu
Ω	Jednotka odporu
Ωm	Jednotka rezistivity
FPC	Flexible printed circuit
Ge.....	Germanium
HI	High
LO	Low
N.....	Pracovní cyklus měření
NTC.....	Negative Temperature Coefficient
Pt.....	Platina
PTC	Positive Temperature Coefficient
R.....	Odpor termistoru
r.....	Tepelný odpor termistoru
R_{25}	Nominální odpor
RH.....	Relativní vlhkost
RTD.....	Resistance Temperature detector
Si.....	Křemík
t	Teplota
T_0	Kalibrační teplota
TCR.....	Temperature Coefficient of Resistance
U.....	Stejnoseměrné napětí při měření odporu
α	Teplotní koeficient
β	Materiálová konstanta
ρ	Rezistivita

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku stability tištěných NTC termistorů, které jsou poměrně nedlouho součástí této širokospektrální oblasti elektroniky. Tištěné termistory jsou obecně velmi rozšířeným a často diskutovaným tématem posledních let, zejména z důvodu jejich rozsáhlé použitelnosti v závislosti na schopnosti měření teploty.

První kapitola je zaměřena na obecné seznámení s problematikou stability elektronických součástek. Jsou zde popsány degradační faktory, jejich základní účinky a typické poruchy, které způsobují. Dále jsou popsána kritéria počátečních selhání, konstantních poruch a selhání opotřebením. V poslední části je popsán test stability.

Druhá kapitola obsahuje popis základních vlastností termistorů, které jsou definovány třemi základními modely. V kapitole je zdůvodněno použití těchto modelů a jejich výhody. Uvedena je zde i teplotní citlivost odporu, popisující chování termistorů při změně okolní teploty.

Třetí kapitola uvádí normované testování stability NTC termistorů. Zde jsou popsány základní principy zkoušek, které musí testovaný subjekt podstoupit. Soubory norem, zkoušky, měření, jejich podmínky a principy, poskytují ucelený přehled o správném provedení testů. Tyto informace jsou koncipovány v souladu s českými i zahraničními normami.

Čtvrtá kapitola poskytuje ucelený přehled o laboratorním testování NTC termistorů. Je zde proveden rozbor zadání a experimentální plán, na který navazuje detailní popis příprav, výběr relevantních vzorů i samotného testování. Nejdůležitější částí této kapitoly je pak přehled výsledků měření a jejich zhodnocení.

1 Stabilita elektronických součástek

Stabilita součástky vychází z její spolehlivosti. Prakticky je možné říci, že stabilita je určitou mírou spolehlivosti, protože pokud součástka není dlouhodobě stabilní a její funkce nejsou předvídatelné, dá se považovat za nespolehlivou. Tato kapitola se zabývá stručným představením problematiky stability a spolehlivosti při výrobě, skladování a využívání elektronických součástek.

1.1 Stabilita a spolehlivost

Elektronické součástky mají širokou škálu možností k selhání. Tyto druhy selhání mohou být rozděleny například dle času, za který součástka selhala nebo její příčinou. Obě tyto kritéria jsou ovšem provázána, jelikož vlivem stárnutí součástky dochází k větší náchylnosti na určité příčiny selhání. Například koroze, která vede ke zkratu či přerušení vedení el. proudu. Poruchy však mohou být způsobeny také nadměrnou teplotou, proudem, napětím, ionizujícím zářením, mechanickým šokem nebo nárazem a mnoha dalšími příčinami. U polovodičových zařízení mohou nastat poruchy způsobené kontaminací, mechanickým namáháním zařízení nebo zkratovanými obvody.[1]

Existují tři faktory, které způsobují selhání:

- Vnitřní příčiny, které existovaly ve výrobku od počátku (predispozice)
- Externí stresory, jako je teplo a vlhkost aplikované z prostředí použití (vnější příčiny)
- Degradace s časem

Počáteční selhání

Selhání se vyskytne brzy po začátku používání výrobku a míra selhání postupně klesá. Dochází zde k projevení skryté vady, která může být zanesena do struktury součástky již při její výrobě. Filtrace takovýchto výrobků se skrytou vnitřní vadou je nezbytná z hlediska uvedení produktu na trh. Z toho důvodu bývají součástky testovány, zda se v raném stádiu neprojeví některé defekty.[2]

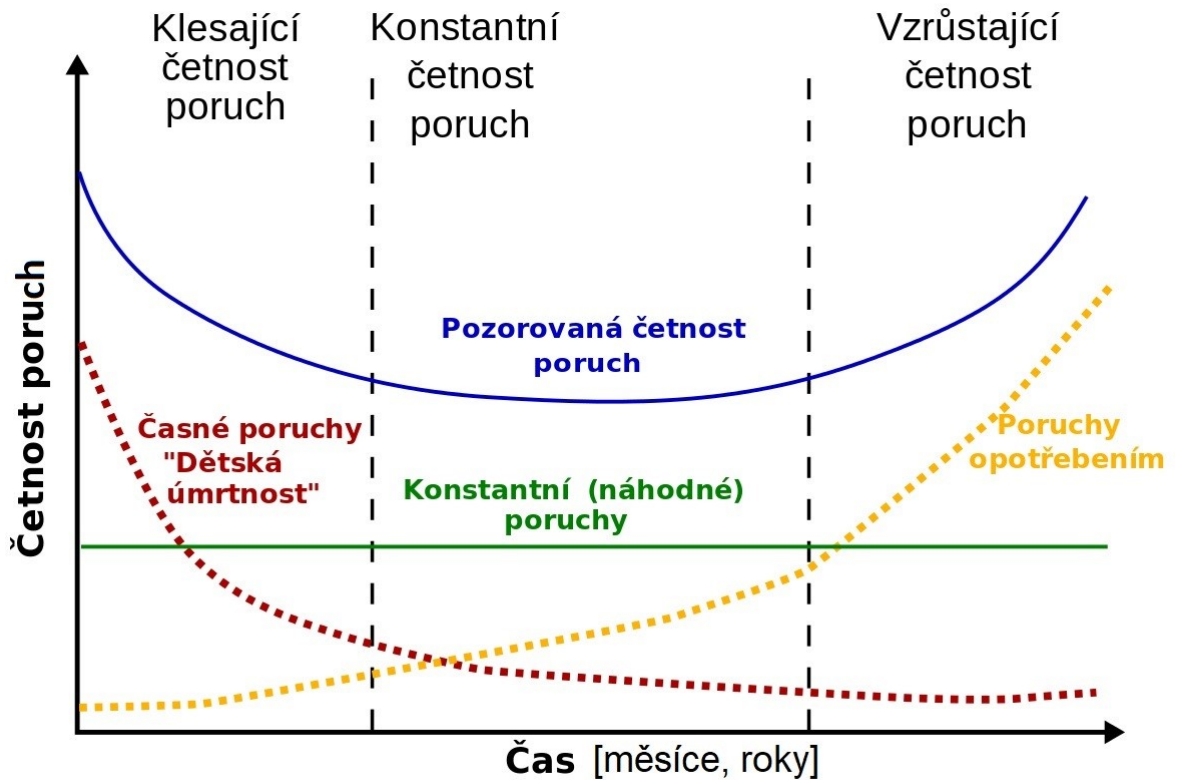
Konstantní (náhodné) poruchy

Po uplynutí počáteční doby selhání začíná doba, během které může dojít k selhání náhodou. Tyto poruchy jsou zpravidla způsobeny nepředvídatelnými událostmi, jako je například pád produktu. To znamená, že k takovému selhání dochází při téměř konstantní míře selhání, která nesouvisí s tím, kolik času uplynulo. Cílem je snížit náhodné vady ve výrobním procesu a kolísání environmentálních stresorů (rozdíly teplot, tlaků..) během používání výrobku k dosažení téměř nulové míry selhání. [2]

Selhání opotřebením

Po uplynutí doby konstantních náhodných poruch se začne míra selhání postupně zvyšovat s plynutím času. Předpokládá se především, že je způsobeno opotřebením výrobku, protože výrobek dosáhne konce své životnosti. [2]

Z předchozích poznámek vychází, že nejčastěji se poruchy vyskytují v počátku uvedení do provozu a v blízkosti ukončení životnosti součástky, což znázorňuje vanová křivka spolehlivosti.



Graf 1.1 Vanová křivka spolehlivosti součástek (převzato a upraveno z [3])

1.2 Test stability

Zkoušky stability jsou testy pro určení hranic, pro které může být výrobek používán. Jakousi druhou částí testů je předvídání jakosti v době, kdy bude výrobek použit, od tovární dodávky až do konce fyzické životnosti na trhu. Cílem je vybrat vlivy, které se mohou objevit v tržním prostředí a nastavit velikost a délku trvání testů. Testy mají různé zkušební položky. Některé testy se nezaměřují jen na jednoduché vlivy, ale testují dopad více vlivů působících současně, aby došlo k navození reálného prostředí.

Existují různé typy selhání a každý má své vlastní příčiny. Pro zajištění funkční kvality výrobku je nutné podrobně zkoumat všechny faktory a zvolit nejlepší zkušební metodu (test stability). Následující tabulka zobrazuje nejběžnější kritéria testů stability používaných na elektronických součástkách.

1.3 Základní účinky jednotlivých parametrů prostředí

Parametry prostředí	Základní účinky	Typické způsobené poruchy
Vysoká teplota	Tepelné stárnutí, oxidace, praskání, chemické reakce, měknutí, tavení, sublimace, snížení viskozity, odpařování a rozpínání	Porucha izolace, mechanická porucha, zvýšené mechanické namáhání a zvýšené opotřebení pohyblivých částí v důsledku rozpínání nebo ztráty mazacích vlastností
Nízká teplota	Křehnutí, tvoření námrazy, zvýšení viskozity, tuhnutí, ztráta mechanické pevnosti a fyzické smrštění.	Porucha izolace, praskání, mechanická porucha, zvýšené opotřebení pohyblivých částí v důsledku smrštění nebo ztráty mazacích vlastností, porucha těsnění a těsnících kroužků
Vysoká relativní vlhkost	Absorpce a adsorpce vlhkosti, tedy bobtnání, ztráta mechanické pevnosti, chemické reakce, koroze, elektrolýza a zvýšená vodivost izolantů	Fyzikální průraz, poruchu izolace a mechanická porucha
Nízká relativní vlhkost	Vysychání, zkrěhnutí, ztráta mechanické pevnosti, smrštění a zvýšení otěru mezi pohyblivými kontakty.	Mechanická porucha a praskání
Vysoký tlak	Stlačení a následná deformace	Mechanická porucha a netěsnosti (poruchy těsnění)
Nízký tlak	Rozpínání, snížení elektrické pevnosti vzduchu, vytváření koróny, ozónu a zhoršené chlazení	Mechanická porucha, netěsnosti (poruchy těsnění), přeskok a přehřátí.
Sluneční záření	Chemické, fyzikální a fotochemické reakce, znehodnocení povrchu, křehnutí, blednutí barev, vytváření ozónu, zahřívání, selektivní zahřívání a mechanické namáhání	Poruchy izolace, viz „Vysoká teplota“
Prach a písek	Otěry, eroze, zadření, ucpání, snížení tepelné vodivosti a elektrostatické účinky	Zvýšené opotřebení, elektrickou poruchu, mechanickou poruchu či přehřátí
Korozní prostředí	Chemické reakce, koroze, elektrolýza, poškození povrchu, zvýšení vodivosti a zvýšení odporu kontaktů.	Zvýšené opotřebení, mechanická porucha, elektrická porucha
Vítr	Působení síly, únava, usazování materiálu, ucpání, eroze, vyvolané vibrace	Zřícení konstrukce, mechanická porucha, viz též „Prach a písek“ a „Korozní prostředí“
Děšť	Absorbce vody, teplotní ráz, eroze a koroze	Elektrická porucha, praskání, netěsnosti, poškození povrchu
Kroupy	Eroze, teplotní ráz, mechanická deformace	Zřícení konstrukce, poškození povrchu
Sníh a led	Mechanické zatížení, absorbce vody, teplotní mráz	Zřícení konstrukce, viz též "Děšť"
Rychlá změna teploty	Teplotní ráz, selektivní zahřívání	Mechanická porucha, praskání, poškození těsnění, netěsnosti
Ozón	Rychlá oxidace, křehnutí (zvláště pryže), snížení elektrické pevnosti vzduchu	Elektrická porucha, mechanická porucha, vznik vlasových trhlinek, praskání
Stálé zrychlení, vibrace, ráz či opakovaný ráz	Mechanické namáhání, únava, rezonance	Mechanická porucha, zvýšené opotřebení nepohyblivých částí, zřícení konstrukce

2 Termistor

Pojem termistor je spojením dvou slov thermal (tepelný) a rezistor (odpor). Tento název je obvykle použit pro senzory vyrobené za pomoci oxidu kovů, které se vyrábějí ve formě kapek, tyčinek, válců a obdélníků. Termistory bývají vyrobeny z křemíku či germánia a patří do třídy absolutních čidel teploty, tedy čidel, která mohou měřit teplotu, která je vztažena k měřítku absolutní teploty [4]. Tato kapitola je zaměřena na základní charakterizaci termistorů.

2.1 Základní vlastnosti termistoru

Veškeré vyráběné termistory jsou rozděleny do dvou základních skupin: NTC (záporný teplotní koeficient) a PTC (kladný teplotní koeficient). Obvyklý keramický termistor má negativní teplotní koeficient, tj. jeho odpor se snižuje s nárůstem teploty. Odpor NTC termistoru, jako každého jiného rezistoru, je fyzikálně dimenzován jeho rozměry a materiálem. Vztah mezi odporem a teplotou je vysoce nelineární [5]. Keramický termistor je vyroben z krystalického materiálu, který je v podstatě polovodič. Existuje jistá podobnost mezi fotorezistorem a termistorem v tom, jak dochází ke změnám hodnot jejich odporu. Fotorezistor je charakterizován mezerou energetického pásma zatím, co termistor je charakterizován aktivační energií. Obojí, jak pásová mezera, tak energetické pásmo slouží jako bariéra pro elektrony, která jim brání k přechodu od valenčního pásma až po pásmo vodivé. K překročení tohoto pásma musí být energie elektronu posílena buď absorbcí fotonu nebo získáním extra kinetické (tepelné) energie [4].

Pokud je zapotřebí vysoká stabilita daného termistoru nebo veliký rozsah operačních teplot, tak charakteristika termistoru nemůže být pouze vyčtena z datasheetu od daného výrobce. Typická tolerance jmenovitého odporu (při 25 °C) může mít při masové výrobě poměrně široké rozpětí: 5% je běžná hodnota tolerance, nicméně dražší a lepší termistory, které jsou v dnešní době poměrně snadno dostupné dosahují přesnost až 1%. Pokud tedy nemáme termistor, který byl vyroben s použitím přísných tolerančních mezí pro dosažení dostatečné přesnosti, musí být termistor individuálně kalibrován. Výrobce tak může hodnotu keramického termistoru zbrúšením jeho těla přiblížit hodnotě jmenovité (typicky nastavené při 25 °C). To však zvyšuje náklady na výrobu. [4]

Alternativním způsobem je individuální kalibrace termistorů. Kalibrace znamená, že termistor musí být vystaven přesně známé teplotě (často se používá míchaná lázeň) a měří se jeho odpor. Je-li to zapotřebí, dochází k opakování takových cyklů při několika různých teplotách. Kalibrace je ovšem pouze stejně přesná jako přesnost referenčního snímače teploty použitého během kalibrace. Při měření odporu termistoru je termistor připojen k měřicímu obvodu, kterým prochází elektrický proud. V závislosti na požadované přesnosti a omezení výrobních nákladů může být kalibrace termistoru založena na použití jednoho z několika používaných modelů teplotní odezvy. [4]

Pokud je termistor používán jako teplotní čidlo, předpokládáme, že se nachází ve stavu tzv. Odporu při nulovém výkonovém zatížení (zero-power resistance), což znamená, že elektrický proud procházející termistorem nevede k žádnému zřetelnému zvýšení teploty (Jouleovo samozahřívání), které může ovlivnit přesnost měření. Statické zvýšení teploty termistoru se řídí díky samozahřívání následující rovnicí:

$$\Delta T_H = r \frac{N^2 U^2}{R_t} \quad (2.1)$$

kde r je tepelný odpor od termistoru k okolí, U je použité stejnosměrné napětí při měření odporu, R_t je odpor termistoru při naměřené teplotě a N je pracovní cyklus měření (například $N=0.1$ znamená, že konstantní napětí je používáno pouze po 10 % času.) Pro měření konstantním stejnosměrným proudem, $N=1$. Jak vyplývá z rovnice výše, je možné dosáhnout téměř nulového tepelného výkonu výběrem termistorů s vysokým odporem, zvýšením vazby na měřicí objekt (snížením r) a měřením jeho odporu při nízkých napětích, které se používají v krátkých časových intervalech.

Termistory s velkými, buď negativními (NTC) nebo pozitivními (PTC) teplotními koeficienty se používají pro měření teploty (NTC) nebo tam, kde je zapotřebí nahradit přesnost velmi vysokou nelinearitou a citlivostí (PTC). Termistory jsou keramické polovodiče obvykle vyrobené z oxidu jednoho nebo více z následujících kovů: nikl, mangan, kobalt, titan, železo a dalších. Odpory termistorů se pohybují od zlomku ohmu k mnoha megaohmům. Termistory mohou být vyráběny ve formě kotoučků, tyčinek, perliček, korálek apod., které jsou uloženy na keramických substrátech. Pro vytvoření termistoru s hustým povrchem se například používá fóliová pasta, která se tiskne na keramický substrát. K výrobě NTC, PTC

nebo RTD termistorů mohou být též použity polovodičové odporové materiály (Ge a Si). Termistory mají nelineární teplotní charakteristiky (obr. 2.2), které jsou obecně popsány několika základními rovnicemi, které byly uvedeny v následující kapitole. [6]

Aby mohl být termistor použit ve skutečném zařízení, musí být přesně stanovena jeho přenosová funkce (teplotní závislost odporu). Vzhledem k tomu, že tato funkce je vysoce nelineární (viz obr. 2.2) a má jiný tvar pro každý konkrétní senzor, je velmi důležité správně určit její přenosovou rovnici spojující odpor a teplotu. Pro přenosovou funkci termistoru bylo navrženo několik matematických modelů. Měl by se však brát ohled na to, že jakýkoli model je pouze nedokonale přesný odhad a obecně, čím jednodušší je model, tím se dá očekávat menší přesnost. Na druhou stranu, při použití složitějšího modelu se stává obtížnější jeho úprava a následně praktické použití termistoru. Všechny současné modely jsou založeny na experimentálně prokázané skutečnosti, že logaritmus odporu termistoru R_t se vztahuje k jeho absolutní teplotě T rovnicí:

$$\ln R_t = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3}, \quad (2.2)$$

Z této základní rovnice byly navrženy tři statické přenosové funkce (modely).

2.2 Jednoduchý model

Jednoduchý model je nejjednodušší úpravou rovnice funkce termistoru. V poměrně úzkém teplotním rozmezí a s přihlédnutím ke ztrátě určité přesnosti můžeme upravit poslední rovnici a zapsat ji do tvaru [7]:

$$\ln R_t \cong A + \frac{\beta}{T}, \quad (2.3)$$

kde A je bezrozměrná konstanta a β je materiálová konstanta teploty (v kelvinech). Je-li u termistoru známa hodnota odporu R_0 při kalibrační teplotě T_0 , vztah odpor-teplota (přenosová funkce) je vyjádřen jako:

$$R_t = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.4)$$

kde T je teplota termistoru, T_0 je kalibrační teplota, R_0 je její odpor při kalibrační teplotě T_0 a β je materiálová konstanta termistoru. Toto vyjádření je pravděpodobně tím nejpoužívanějším. Všechny teploty a β jsou uváděny v kelvinech. Obvykle se rozsah β pohybuje mezi 2600 a 4200 K (hodnota může dosáhnout až 6000 K pro polovodičový termistor vyrobený z germania) a protože má β poměrně úzký teplotní rozsah lze ji považovat za teplotně nezávislou. Výhodou tohoto modelu je možnost kalibrovat termistor v jediném bodě (R_0 při T_0). Předpokládá se však, že hodnota β je již předem známá. Chyba, která vzniká při upravování rovnice je poměrně malá, pokud se pohybujeme v blízkosti kalibrační teploty T_0 , ale zřetelně se zvětšuje při odklonu od tohoto bodu. Beta (β) specifikuje zakřivení termistoru, ale přímo nepopisuje jeho citlivost, což naopak dělá negativní teplotní koeficient α , který lze popsat [6]:

$$\alpha_t = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dT} = \frac{\beta}{T^2} \quad (2.5)$$

Z předchozí rovnice je jasné, že citlivost závisí na velikosti beta a teplotě. Termistor, jakožto nelineární senzor je mnohem citlivější při nižších teplotách a jeho citlivost rychle klesá s nárůstem teploty. V keramických NTC termistorech se citlivost α mění v teplotním rozmezí od -2 % (na teplejší straně) na -8 %/ -c (na chladnější straně), což znamená, že termistor NTC, je velmi citlivé zařízení a je citlivější než jakýkoliv RTD. Toho je možné využít v různých oblastech elektroniky, od lékařských elektronických teploměřů, až po domácí termostaty.[6]

2.3 Fradenův model

V roce 1998 Jacob Fraden navrhl zlepšení jednoduchého modelu [8]. Vychází z experimentálního faktu, že se v mnoha případech nedá β považovat za konstantu, ale je funkčně závislá na teplotě. V závislosti na výrobním procesu a druhu termistoru může mít funkce buď pozitivní nebo negativní sklon. V ideálním případě by se β neměla měnit, ale toho je dosaženo pouze u nejlepších výrobců, kteří dbají na přesné složení svého keramického materiálu. V případě těchto výrobců postačí jednoduchý model, ale pro relativně levný snímač, který není vyroben tak kvalitně, by měl být vzat v úvahu model Fradenův [8].

2.4 Steinhartův a Hartův Model

Steinhart a Hart v roce 1968 navrhli model pro oceánografický rozsah od 3 do 30 ° C, který má ve skutečnosti pro mnohem širší škálu využití [9]. Model je popsán níže uvedenou rovnicí, ze které lze vypočítat teplotu:

$$T = [\alpha_0 + \alpha_1 \ln R_t + \alpha_2 (\ln R_t)^2 + \alpha_3 (\ln R_t)^3]^{-1} \quad (2.6)$$

Steinhart a Hart ukázali, že kvadratická část rovnice může být vyřazena bez zřetelně větší ztráty přesnosti, takže je rovnici možné upravit na tvar:

$$T = [b_0 + b_1 \ln R_t + b_3 (\ln R_t)^3]^{-1} \quad (2.7)$$

Správné použití výše uvedené rovnice zajišťuje přesnost v rozsahu tisícín od 0 do 70 ° C [10]. Abychom našli koeficienty b pro výše uvedenou rovnici, po kalibraci termistoru musí být vyřešen systém tří rovnic při třech různých teplotách. Díky velmi vysoké přesnosti se Steinhartův a Hartův model stal průmyslovým standardem pro kalibraci termistorů. Někteří výrobci dávají přednost použití úplné rovnice, zatímco ostatním postačí její zjednodušená praktičtější verze. Rozsáhlé zkoumání Steinhart-Hart metody ukázalo, že ani v širším teplotním rozmezí chyba nepřesahuje nejistotu měření o několik tisícín. Nicméně pro sériově vyráběné přístroje je tato metoda omezena potřebou kalibrace, pro každý snímač na třech nebo čtyřech teplotních bodech [11].

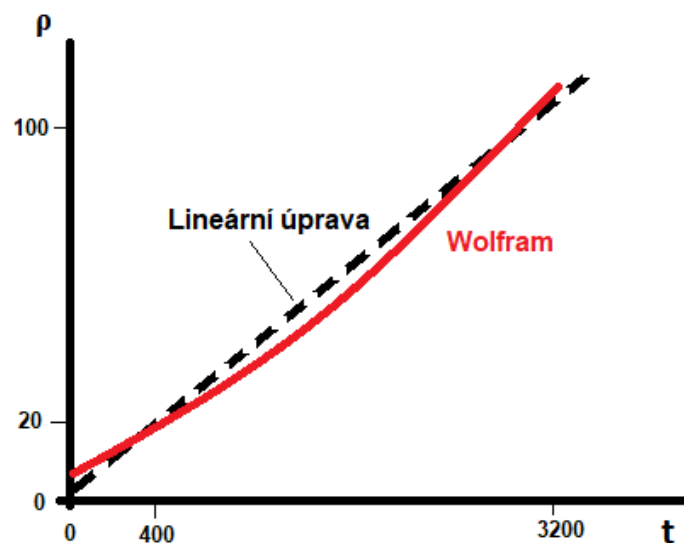
Fradenův model by měl být preferován, pokud je prioritní nízká cena a o něco vyšší přesnost. Steinhartův a Hartův model by měl být používán, pokud je požadována nejvyšší možná přesnost a náklady nejsou hlavním limitujícím faktorem. Pro použití jednoduchého modelu je třeba znát hodnoty β a odporu termistoru R_0 při kalibrační teplotě T_0 . Pro model Steinhart-Hart je zapotřebí znát tři odpory při třech kalibračních teplotách. Všechny tyto modely vyžadují řadu výpočtů, pokud je žádoucí vyřešit přímo jejich rovnice. Nicméně ve většině praktických případů mohou být tyto rovnice nahrazeny technickými tabulkami.

2.5 Teplotní citlivost odporu

Měrný odpor materiálu není ve skutečnosti konstantní. Mění se změnou teploty t a v úzkém teplotním rozmezí může být lineárně vyjádřen jako teplotní citlivost (sklon) α , což je v podstatě teplotní koeficient odporu (TCR).

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \alpha \frac{t - t_0}{t_0} \right) \quad (2.8)$$

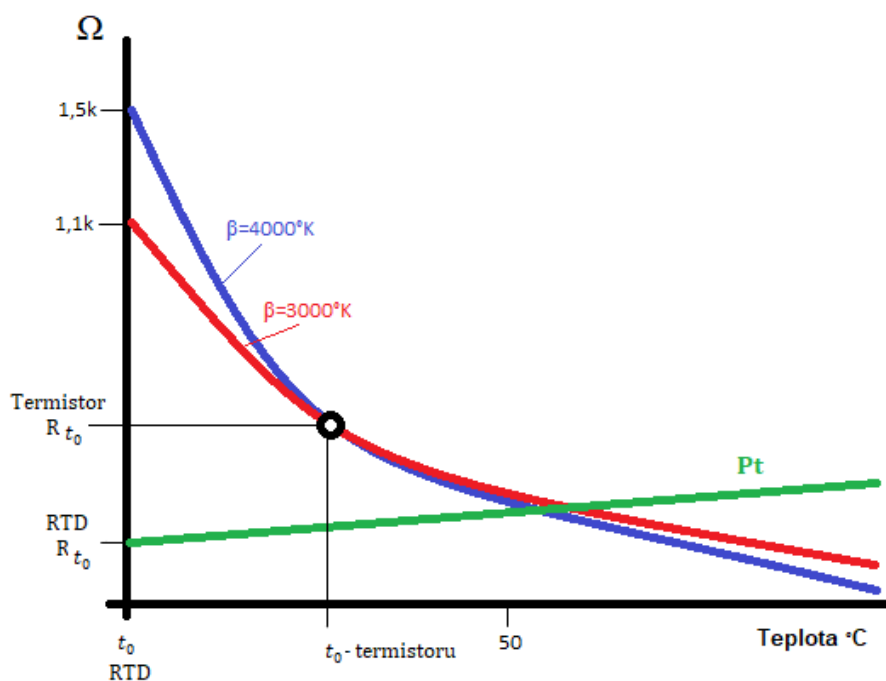
kde ρ_0 je specifická rezistivita při referenční teplotě t_0 (obvykle $t_0 = 0^\circ\text{C}$, nebo 25°C). Rezistivita je vlastně nelineární funkcí teploty. V případě nepřesností při použití širokého teplotního rozmezí, může být rezistivita například wolframu upravena vhodnou přímkou, jak je znázorněno na Obr. 2.1. K takovému lineárnímu upravení by však nemělo docházet, pokud je požadována vysoká přesnost. Na následujícím obrázku je příklad odvození wolframové rezistivity za použití modelu rovnice druhého řádu:



Obr. 2.1 Rezistivita wolframu v závislosti na teplotě (převzato a upraveno z [6])

$$\rho = 4.45 + 0.0269t + 1.914 \times 10^{-6}t^2 \quad (2.9)$$

kde t je teplota v $^{\circ}\text{C}$ a ρ je v Ωm . Kovy mají kladné teplotní koeficienty (PTC) α , zatímco většina polovodičů a oxidů kovů má negativní teplotní koeficienty (NTC). Rezistory NTC mají zpravidla vysokou teplotní nelinearitu a kvalitní rezistor může mít hodnotu $\alpha = 10^{-5}$ nebo dokonce nižší. V sensorických technologiích je však často žádoucí mít "méně kvalitní" odpor, jehož teplotní koeficient α je vysoký a tím je předvídatelné jeho chování. Stabilní α umožňuje výrobu dvou typů teplotních snímačů: jeden je známý jako termistor a druhý je odporový teplotní detektor (RTD).[6]



Obr. 2.2 Charakteristiky závislosti odporu a teploty pro dva termistory a Pt RTD ($R_0=1\text{ k}$); zaznamenány různé referenční teploty pro termistory ($t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) a RTD ($t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Převzato a upraveno z [6])

Obr. 2.2 ukazuje závislosti odporu a teploty pro dva termistory, které mají hodnotu $\beta = 3000$ a 4000 K a také platinový RTD. Platinový snímač teploty má podstatně menší citlivost a je lineárnější s kladným sklonem, zatímco NTC termistory jsou nelineární s vyšší citlivostí a proměnlivým záporným sklonem. Tradičně jsou termistory v datasheetech udávány při referenční teplotě ($t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$), ($t_0 = 298,15\text{ K}$), zatímco RTD při ($t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), ($t_0 = 273,15\text{ K}$). Z naměřených hodnot při teplotách $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (preferováno, ale může být i jinak) jsme schopni určit materiálový koeficient β pomocí následující rovnice:

$$\beta = [(T_a \cdot T_b)/(T_b - T_a)] \cdot \log\left(\frac{R_a}{R_b}\right) \quad (2.10)$$

2.6 Flexibilní tištěné termistory

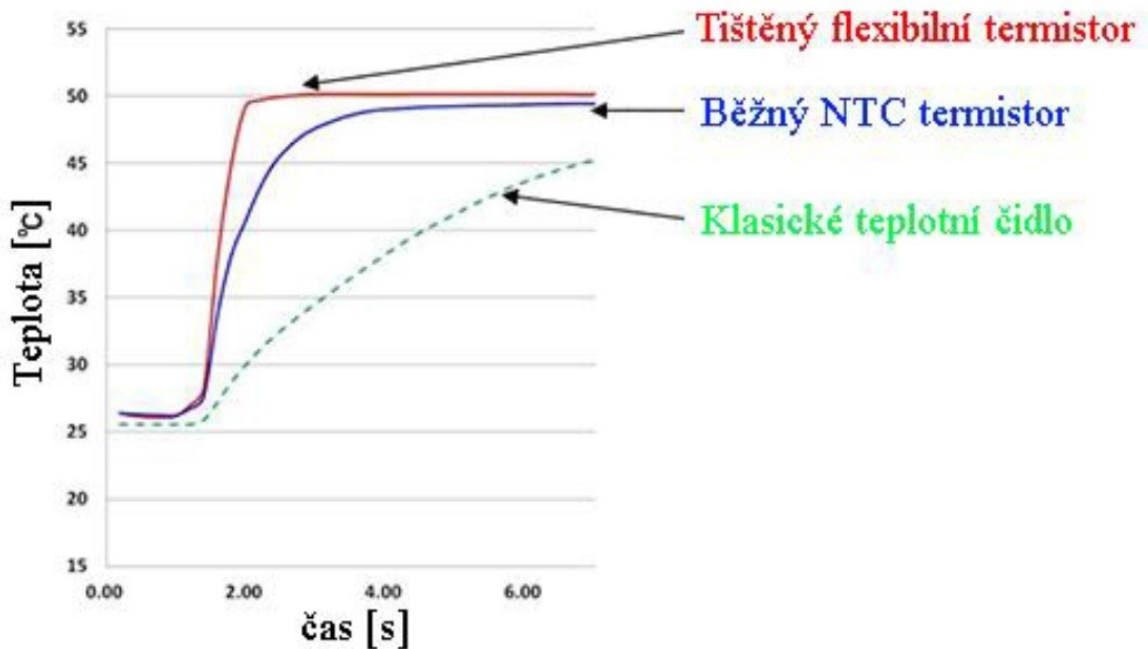
S ohledem na to, že chytré telefony a tablety jsou čím dál kompaktnější, díky svým stále se vyvíjejícím funkcím, je čím dál důležitější v nich umět sledovat pohyb tepla. V takovýchto konstrukcích s omezeným prostorem mohou najít uplatnění právě flexibilní termistory. Dalším trendem, kde mohou být termistory využity je tzv. Internet věcí (Internet of Things, IoT), který si získává popularitu napříč všemi obory. V komerční sféře například měřením tělesné teploty uživatelů za pomoci fitness doplňků a sportovních monitorovacích zařízení.[12]



Obr. 2.3 Tištěný flexibilní termistor firmy Murata (Převzato z [12])

Japonská firma Murata, zabývající se inovací elektronických součástek oznámila v roce 2014, že se chystá zahájit hromadnou výrobu NTC snímačů teploty, které jsou zabaleny do fólie s flexibilním tištěným obvodem (FPC). S tloušťkou FPC přibližně 100 μm , mohou být snadněji vedeny uvnitř složitých konstrukcí a těsných prostorů.[12] Navzdory svým rozměrům mají tyto termistory výbornou tepelnou citlivost. V dnešní době jsou tyto flexibilní termistory komerčně dostupné a byly použity pro porovnání vlastností s testovanými NTC termistory.

Jak již bylo zmíněno výše, hlavní výhodou flexibilních tištěných termistorů je jejich flexibilita, která umožňuje snadnou manipulaci a umístění ve velmi těsných prostorech. Dále mají velmi nízkou hmotnost a vysokou mechanickou odolnost, která zaručuje určitou bezpečnost před zničením součástky při neopatrném zacházení. Navíc s ohledem na jejich nízkou tepelnou kapacitu, mají tepelnou odezvu lepší než klasické teplotní čidlo, či běžný NTC termistor. Takovéto porovnání je vidět na následujícím obrázku:



Obr. 2.4 Porovnání charakteristik teplotního čidla a termistorů (Převzato z[13])

Z grafu provedeného měření je zjevné, že tištěný flexibilní termistor je schopen reagovat nejrychleji na změnu teploty. Měření se běžně provádí v olejové lázni, protože olej funguje jako dobře tepelně vodivé médium a umožňuje poměrně rychlé změny teploty.

Takový typ flexibilních elektronických součástek se vyrábí pomocí depozice několika funkčních vrstev na flexibilní substrát. Je-li zapotřebí dosažení vysoké kvality nanášení tzn. hladké funkční vrstvy, je nejlepší použít metodu rotačního nanášení nebo naprašování. Tyto metody jsou sice nákladné a časově náročné, ale zajišťují vyšší kvalitu než ostatní metody. Použitelnost metody je však dána cenou, kvalitou a vlastnostmi, které se od dané součástky vyžadují. Vždy je důležité najít kompromis mezi kvalitou a cenou součástky.[14]

Tištěná elektronika se pro výrobce v posledních letech stává stále zajímavější a to z důvodu jejích nízkých nákladů. Firmy tuto technologii již dnes využívají pro výrobu ohebných displejů, dotykových obrazovek, obalů a další elektroniky. Při výrobě tištěním se nanáší elektricky vodivé vrstvy na flexibilní substrát a vytváří se tak aktivní i pasivní obvody, tranzistory, či právě různé odpory. Takováto výroba je pak kombinací tenkovrstvé a tlustovrstvé technologie, kde dochází ke kombinaci vlastností obou technologií. Tlustovrstvá technologie zastupuje odolnost a tenkovrstvá technologie miniaturizaci.[15][16]

Mezi současné způsoby výroby v oblasti tištěné a flexibilní elektroniky patří například: Roll-to-Roll, Vakuová metalizace, Metoda tepelného napařování, Langmuir-Blodgett, Rotační nanášení (spin-coating), Nanášení ponorem, Nanášení sprejem, Elektropolymerace, Mikrokontaktní tisk, Inkoustový tisk, Flexografický tisk, Ofsetový tisk, Tampónový tisk, Metoda sítotisku a také například Nanolitografické metody.

Technologie flexibilní elektroniky má díky své popularitě v posledních letech jistě velmi zajímavou budoucnost. Její využití lze nalézt například i v oblasti medicíny. Nicméně hlavním oborem pravděpodobně vždy bude výroba elektroniky a zvláště pak konstrukce integrovaných obvodů, která je klíčovou částí elektronického průmyslu.

3 Normované testování stability NTC termistorů

Soubory norem testujících NTC termistory obsahují informace o postupech zkoušení vlivů prostředí a o stupních přísnosti těchto zkoušek. Normy dále obsahují informace o klimatických podmínkách měření a zkoušení. Tyto normy se používají v případě, že má být vypracována určitá specifikace pro daný druh výrobku. Může se tedy jednat o typy elektrických, elektromechanických či elektronických zařízení, přístroje či jejich sestavy. Přestože tyto normy jsou primárně uvedeny pro elektrotechnické výrobky, mohou být částečně vhodné i pro další průmyslové výrobky. Výraz „podmínky prostředí“ či „zkoušení vlivů prostředí“ obsahuje přírodní i umělá prostředí, která se mohou v praxi u výrobku vyskytnout. Vzorky vystavené těmto podmínkám prostředí mají určité požadavky na funkčnost, které musí být stanoveny v příslušné specifikaci pro daný testovaný vzorek. Takováto specifikace však není součástí obsahu normy. Při navrhování příslušné specifikace musí být specifikovány pouze zkoušky, které jsou nezbytné z technického a ekonomického hlediska. V této kapitole jsou uvedeny základní informace z technických norem vztahující se k testování stability termistorů a obsahuje poznámky z následujících norem:

- **ČSN EN 60539-1** – Přímou ohřívání termistory se záporným teplotním součinitelem-
Část 1: *Kmenová specifikace*
- **ČSN EN 60068-1** – Zkoušení vlivů prostředí – Část 1: *Obecně a návod*
- **ČSN EN 60068-2-1** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 2-1: *Zkoušky – Zkouška A: Chlad*
- **ČSN EN 60068-2-2** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 2-2: *Zkoušky – Zkouška B: Suché teplo*
- **ČSN EN 60068-2-14** – Zkoušení vlivů prostředí- Zkouška N: *Změna teploty*
- **ČSN EN 60068-2-38** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 2-38: *Zkoušky – Zkouška Z/AD Složená cyklická zkouška teplotou a vlhkostí*

- **ČSN EN 60068-2-40** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 2: Zkoušky – Zkouška Z/AM: Kombinované zkoušky chladem a nízkým tlakem vzduchu
- **ČSN EN 60068-2-67** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 2: Zkoušky – Zkouška Cy: Konstantní vlhké teplo, zrychlená zkouška určená především pro součástky
- **ČSN EN 60068-2-78** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 2: Zkoušky – Zkouška Cab: *Vlhké teplo konstantní*
- **ČSN EN 60068-3-1** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 3-1: Doprovodná dokumentace a návod – Zkoušky chladem a suchým teplem
- **ČSN EN 60068-3-1** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 3-1: Doprovodná dokumentace a návod – Zkoušky chladem a suchým teplem
- **ČSN EN 60068-3-5** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 3-5: Doprovodná dokumentace a návod – Konfirmace výkonnosti teplotních komor
- **ČSN EN 60068-3-6** – Zkoušení vlivů prostředí- Část 3-: Doprovodná dokumentace a návod – Konfirmace výkonnosti klimatických (teplotně vlhkostních) komor

3.1 Předmět norem IEC 60068 – Klimatické zkoušky

Základní soubor norem IEC 60068 je složen z metod, které se zaměřují na zkoušení vlivů prostředí za předpokladu splnění určitých stupňů přísnosti. Klimatické podmínky měření a zkoušek jsou navrženy pro posouzení schopnosti vzorků fungovat za daných podmínek (přeprava, skladování a provozní použití). Tento soubor norem umožňuje pracovníkům zabývajícím se specifikací a pracovníkům pověřeným testováním vzorků postupovat pomocí jednotných a opakovatelných klimatických, dynamických a kombinovaných zkoušek vlivů prostředí. Tyto zkoušky jsou prováděny a měřeny za normálních klimatických podmínek. Zkušební metody jsou konstruovány z mezinárodních technických zkušeností a jsou navrženy tak, aby uváděly informace o vlastnostech vzorků.

Tyto informace jsou:

- a) Schopnosti provozu ve specifikovaných mezích teploty, vlhkosti, tlaku mechanického namáhání nebo jiných podmínek prostředí či kombinací těchto podmínek;
- b) Schopnosti odolat podmínkám přepravy, skladování a instalace.

Tento soubor norem se zabývá zkouškami, které porovnávají technické parametry výrobků. Při posuzování kvality či určení užitečné doby života by se měly zkušební metody použít v souladu s přejímacím plánem a bude-li třeba, měly by být doplněny určitými dodatečnými zkouškami. Užitečná doba života se dá definovat jako doba, po které je objekt v případě poruchy považován za neopravitelný. Zkrátka, dále není k užitku. Aby byly prováděny správné zkoušky pro rozdílné intenzity podmínek prostředí, mají zkušební postupy různé stupně přísnosti. Takovéto stupně přísnosti mají určité samostatné nebo kombinující se definující faktory. Těmito faktory jsou (čas, teplota, tlak vzduchu, apod.). Norma obsahuje základní osnovu a důležité etapy procesu přizpůsobování zkoušek vlivů prostředí, protože zkoušky a jejich stupně přísnosti musejí vycházet ze skutečných podmínek prostředí, v nichž se může vzorek vyskytnout. Tyto testy jsou součástí souboru IEC 60068-2 Enviromantal testing – Tests (zkoušení vlivů prostředí – zkoušky).

Zkouška se skládá z řady úkonů, jejichž cílem je určit vliv takové zkoušky nebo takových zkoušek na testovaný subjekt. Základní body pro zkoušku se potom dají definovat takto:

- a) **Aklimatizace před zkouškou** – Práce se vzorkem s cílem odstranit či alespoň redukovat vlivy, které by mohly měření jakkoli ovlivnit. Je-li vyžadována taková aklimatizace před zkouškou, stává se prvním krokem v měřicím postupu. Aklimatizace musí probíhat tak, aby byl zkoušený vzorek vystaven klimatickým, elektrickým či jiným podmínkám, které jsou uvedeny v jeho specifikaci a došlo tak ke stabilizaci vzorku před měřením a zkouškou. Pokud je však teplota a vlhkost vzduchu v průběhu aklimatizace vzorku pro měření stejná, jako jsou její předepsané podmínky před zkouškou, tak lze říci, že samotná aklimatizace před zkouškou proběhla při aklimatizaci pro měření.

- b) **Počáteční vyšetření a měření** – Kontrola a měření základních charakteristik testovaného vzorku (například V-A char.) pro pozdější porovnání s konečným měřením.
- c) **Expozice** – Vystavení testovaného vzorku určeným vlivům podmínek prostředí, jenž mají za cíl stanovit jejich vliv na vzorek.
- d) **Aklimatizace po zkoušce** – Práce se vzorkem po jeho expozici v daných podmínkách, která umožňuje stabilizaci jeho vlastností.
- e) **Konečné vyšetření a konečná měření** – Kontrola a proměření charakteristik, které byly provedeny v počátečním měření. Poskytuje možnost srovnání a následném vyhodnocení vlivů prostředí.

Soubor norem IEC 60068 popisuje skupiny zkoušek, které se rozlišují velkými písmeny :

Tab. 3.1 Skupiny zkoušek.

A: Chlad	L: Prach a písek
B: Suché teplo	M: Tlak vzduchu (vysoký či nízký)
C: Vlhké teplo konstantní	N: Změna teploty
D: Vlhké teplo cyklické	P: (ND) - dříve "hořlavost"
E: Nárazy (například rázy)	Q: Hermetičnost
F: Vibrace	R: Voda
G: Stálé zrychlení	S: Záření
H: (ND) - dříve "skladování"	T: Pážitelnost
J: Plísně	U: Pevnost vývodů součástek
K: Korozní prostředí	V: (ND) - dříve "akustický šum"

Na doplňky (ND) – nyní součástí jiné normy

Dále se používají písmena X jako předpona s malým písmenem, jenž rozšiřují seznam skupin zkoušek. Například Xa značí zkoušku ponořením do čistících rozpouštědel. Písmeno Z se používá pro zkoušky složené či kombinované tak, že za písmenem Z následuje

lomítko a malá písmena za ním označují dílčí činitele (například Z/am: Kombinované zkoušky chladem a nízkým tlakem). Každou skupinu zkoušek je možné dále dělit avšak nutné je zachovat souvislost ve značení. Pro takovéto dělení se využívá přidání malého písmene, jako je například uvedeno v tabulce:

Tab. 3.2 Rozšíření skupiny zkoušek

U: Pevnost vývodů a jejich neoddělitelných upeňovacích částí
Zkouška Ua: Dělí se na 1: Tah a 2: Vtlačování
Zkouška Ub: Ohýbání
Zkouška Uc: Torze
Zkouška Ud: Kroutící moment

3.2 Podmínky aklimatizace před i po zkoušce

Obecně se vzorky před posledním měřením mají stabilizovat tzn. provést stabilizaci při normální teplotě okolí. Pokud se parametry vzorku po vyjmutí rychle mění například zvýšením izolačního odporu, elektrickými parametry či absorbovanou vlhkostí, musí být použity tzv. řízené podmínky aklimatizace. Avšak pokud se elektrické parametry vlivem absorbované vlhkosti nemění, používá se vystavení vzorků normálním klimatickým podmínkám. Dochází-li k aklimatizaci i samotné zkoušce ve dvou oddělených komorách, je třeba dbát na to, aby na nich při přesunu vzorku nedošlo ke kondenzaci. V praxi bývá vždy uvedena doba vhodná pro trvání aklimatizace stanovena danou normou pro měření.

Řízené podmínky aklimatizace lze využít i pro aklimatizaci před zkouškou. Za řízené podmínky aklimatizace lze považovat:

- Teplota: skutečná teplota laboratoře ± 1 °C za předpokladu, že se nachází v daných mezích +15 °C a +35 °C;
- Relativní vlhkost: na rozmezí 73 % a 77 %;
- Tlak vzduchu: na rozmezí 86 kPa a 106 kPa (860 mbar a 1 060 mbar);

- Doba aklimatizace po zkoušce: upřesněno dále, avšak může být odlišná, ale musí být uvedena v příslušné specifikaci vzorku.

Postup aklimatizace po zkoušce – testovaný vzorek musí být umístěn do komory (pokud je nutná) nejdéle 10 minut po skončení expozice. Může nastat situace, kdy bude nutné změřit vlastnosti testovaného vzorku ihned po ukončení expozice. Důležité je změřit nejprve nejrychleji měnící se charakteristiky. Takováto měření musí proběhnout nejdéle do 30 minut po vyjmutí z komory. Teplota komory pro aklimatizaci a teplota laboratoře se nesmí lišit o více než 1°C, protože by při manipulaci se vzorkem mohlo dojít k pohlcení nebo odpaření vlhkosti. Doporučuje se používat komory, které umožňují velmi přesnou regulaci relativní vlhkosti.

Pokud je zapotřebí před zahájením série měření použít tzv. **pomocné sušení**, tak se standardně provádí po dobu 6ti hodin a je zobrazeno v následující tabulce.

Tab. 3.3 Normální podmínky pomocného sušení

Teplota °C	Relativní vlhkost %	Tlak vzduchu
55 ± 2	Nejvýše 20	86 kPa až 106 kPa (880 mbar až 1 060 mbar)
* Včetně krajních hodnot		

Pokud sušení nemůže probíhat v normálních podmínkách pomocného sušení, musí být v protokolu poznámka popisující skutečné podmínky. Stejně tak, pokud testování probíhá pod teplotou menší než 55 °C.

3.3 Vzorky uvolňující a neuvolňující teplo

Pro potřeby měření je důležité rozeznat vzorek uvolňující teplo a vzorek neuvolňující teplo, protože teplota vytvořená měřeným vzorkem může ovlivnit výsledek měření. Vzorek uvolňující teplo lze definovat jako vzorek, jehož teplota nejteplejšího místa na povrchu, měřená v podmínkách volné výměny vzduchu a při daném tlaku, je po dosažení teplotní rovnováhy o více než 5 K vyšší, než teplota okolí. Takovéto měření je potřebné pro dokázání, že vzorek je buď teplo uvolňující nebo neuvolňující, možno provádět v běžných klimatických podmínkách pro měření a zkoušky. Avšak musí zde být zajištěno, aby na vzorek nepůsobily

žádné vnější vlivy jako například průvan či sluneční svit. Pokud se vzorek skládá ze složitějších nebo větších částí je nutné měřit vzorek na několika místech.

Teplota okolí v průběhu měření se tedy dělí na:

- a) **Teplotu okolí u vzorků neuvolňujících teplo** – teplota vzduchu obklopující vzorek
- b) **Teplotu okolí u vzorků uvolňujících teplo** – teplota vzduchu v podmínkách volné výměny vzduchu v dostatečné vzdálenosti od vzorku, aby se vyzařování tepla stalo zanedbatelné. Prakticky se jedná o průměrnou hodnotu naměřených teplot v různých místech ve vodorovné rovině pod vzorkem, či vzdálenosti 1 m od vzorku v závislosti na tom, která vzdálenost je kratší. Důležité je brát zřetel na to, aby vyzářené teplo neovlivnilo chod měření.

Po ustálení teploty v testovací komoře dochází k tzv. **teplotní rovnováze**, což je aktuální stav vzorku, kdy se teplota žádné jeho části neliší od její konečné teploty o více než 3 K nebo o jinou hodnotu předepsanou v jeho specifikaci. Pro vzorky neuvolňující teplo se obvykle konečná teplota rovná časově střední teplotě komory, v níž se vzorek nachází. Pro vzorky uvolňující teplo, je zapotřebí provádět měření opakovaně, protože je nutné stanovit časový interval, za který se teplota změní o 3 K nebo o jinou předepsanou hodnotu. Teplotní rovnováhy lze dosáhnout pokud je poměr mezi délkou posledního změřeného intervalu a délkou jeho předchozího intervalu větší než 1,7. Během měření se může stát, že nebude možné přímo měřit vnitřní teplotu testovaného vzorku. Takováto situace se řeší pomocí kontroly jiného parametru, který je teplotně závislý a tato závislost je definována.

Nastane-li stav, kdy je tepelná časová konstanta menší ve srovnání s dobou expozice při dané teplotě, tak není nutné žádné měření. Ovšem, dojde-li k tomu, že je tepelná časová konstanta stejného řádu jako doba expozice, je zapotřebí provést kontrolu pro zjištění pokud:

- a) U vzorků, které neuvolňují teplo leží jejich hodnota v žádaných mezích časově střední hodnoty okolí.
- b) U vzorků, které uvolňují teplo, je poměr mezi dvěma, po sobě jdoucími intervaly větší, než 1,7 či jiné uvedené hodnotě.

3.4 Zkoušky a měření

Součástka je navrhována aniž by bylo přesně známé prostředí, kde se bude ve svojí funkci nacházet. Navíc také může být vyrobena několika výrobci za úplně jiných podmínek a vystavena tak odlišným prostředím. Testované vzorky většinou bývají dostupné ve velkém množství a umožňují tak různorodé testování včetně destruktivních zkoušek. Ovšem stává se, že vzorky pro zkoušení jsou vzhledem k jejich ceně špatně dostupné a jejich výroba je buď drahá nebo konstručně náročná. U těchto složitých nebo drahých výrobků není možné používat destruktivní zkoušky a proto je velmi důležitá správná volba pořadí zkoušek.

Při testování vzorku musí být definováno, zda se vzorek zkouší se zapnutým či vypnutým napájením. Dále zde může být připsáno, zda je vzorek nějakým způsobem zabalený, zapouzdražený nebo jinak chráněný. Pokud dojde k tomu, že výrobek bude moc velký nebo jeho hmotnost nebude vyhovovat zkušební podmínkám, musí být vzorek testován dle jednotlivých montážních skupin. Důležité je, aby se tyto montážní podskupiny navzájem neovlivňovaly při měření.

Samotné zkoušky se v případě, že vzorek má být vystaven více vlivům prostředí, dělí takto:

Kombinovaná zkouška – zkouška, při které je vzorek vystaven současně dvěma či více vlivům prostředí. Tyto zkoušky se přednostně používají k současnému působení klimatických a mechanických vlivů. Měření se obvykle provádí na začátku a na konci zkoušky. Zkoušky se současným vlivem:

- a) Teploty a vlhkosti
- b) Teploty, vlhkosti a specifického média (včetně chemicky aktivního)
- c) Teploty a sluneční záření

Složená zkouška – zkouška, kde je vzorek okamžitě po otestování jedním vlivem vystaven vlivu dalšímu. Těchto vlivů může být více než dva. Jejich časové intervaly, mezi dobou vystavení jednoho prostředí a druhého, jsou velmi přesně definovány, protože mohou mít velmi silný vliv na samotné testování vzorku. Ve složené zkoušce se běžně aklimatizace před

a po zkoušce, či období stabilizace, nezařazuje. Kdežto měření vzorků se obvykle provádějí před zahájením prvního vlivu prostředí a na závěr posledního.

Řada zkoušek – série zkoušek, kde je postupně vzorek vystaven dvěma nebo více vlivům zkušebního prostředí. V tomto případě jsou doby trvání intervalů mezi expozicemi nastaveny tak, aby pokud možno neměly významný vliv na vzorek. Mezi jednotlivé expozice se zde zařazuje časový úsek, při kterém má vzorek čas se aklimatizovat před a po zkoušce. Měření se zde obvykle provádějí po každém vystavení vzorku určitému prostředí a konečné měření jedné zkoušky se stává měřením počátečním zkoušky druhé.

3.5 Normální klimatické podmínky

Za normální klimatické podmínky se považují podmínky, které nijak výrazně neovlivňují vlastnosti daného vzorku. Pokud měřené parametry závisí na teplotě nebo tlaku a tato závislost je známa, měří se jejich hodnoty za specifikovaných podmínek (Tab. 3.4) a je-li nutné, opravují se přepočtem na níže uvedené normální porovnávací klimatické podmínky. Požadavek na relativní vlhkost není uveden, protože tato oprava přepočtem není obecně možná. Tyto hodnoty jsou:

- teplota: 20 °C;

- tlak vzduchu: 101,3 kPa (1 013 mbar).

Změny teploty a vlhkosti by měly být během probíhajících měření v rámci jedné zkoušky a jednoho vzorku ideálně nulové. Pro velké vzorky či komory, ve kterých je těžké udržet teplotu v daném intervalu, je možné rozšířit jeho rozmezí. Pokud zde relativní vlhkost vzduchu nijak neovlivňuje výsledky zkoušek, je možné ji zcela vynechat. Rozmezí normálních klimatických podmínek pro měření a zkoušky je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 3.4 Tabulka normálních klimatických podmínek pro měření a zkoušky

Teplota °C	Relativní vlhkost %	Tlak vzduchu
15 až 35	25 až 75	86 kPa až 106 kPa (880 mbar až 1 060 mbar)
* Včetně krajních hodnot		

3.6 Klimatická, nezávislá a obecná řada zkoušek

Pro součástky, u kterých se vzájemně ovlivňují a jsou na sobě **závislé** zkoušky chladem, suchým teplem, nízkým tlakem vzduchu a vlhkým cyklickým teplem, je nutné sestavit řadu **klimatických zkoušek**. Interval mezi těmito zkouškami nesmí překročit tři dny, kromě testování vlhkým cyklickým teplem a chladem. Zde čas nesmí přesáhnout 2 hodiny a to i s aklimatizací po zkoušce. Měření bývají prováděna na začátku a na konci řady, není-li stanoveno jinak. Tyto zkoušky musejí probíhat v následujícím pořadí:

- Suché teplo;
- Vlhké teplo cyklické (první cyklus zkoušky s horní teplotou 55 °C);
- Chlad;
- Nízký tlak vzduchu;
- Vlhké teplo cyklické (zbývající cykly zkoušky s horní teplotou 55 °C).

Pokud ovšem bereme v úvahu i ostatní kategorie zkoušek a ne pouze na sobě závislé zkoušky klimatické, je poměrně obtížné normalizovat obecnou řadu zkoušek pro všechny typy součástek. Ve všeobecné řadě zkoušek, by časové intervaly mezi jednotlivými expozicemi různých parametrů, neměly mít na sebe žádný významný vliv. Zkoušky jsou na sobě tedy **nezávislé**. Pokud na sebe vliv mají, jak již bylo uvedeno, je nutné použít složenou zkoušku, kde jsou tyto intervaly přesně definovány. Při volbě správné řady zkoušek, je důležité dbát na následující hlediska a dle nich definovat příslušnou řadu:

- a) Zkouška s rychlou změnou teploty by měla být umístěna na začátek řady.
- b) Zkouška pevnosti vývodů a pájení (včetně tepelné odolnosti při pájení) by měla být uvedena blízko začátku řady.
- c) Dále by měly proběhnout veškeré mechanické zkoušky či alespoň jejich části, aby došlo k odhalení vad způsobených rychlými změnami a došlo k vyvolání nových poruchových stavů

například (trhliny nebo netěsnosti). Tyto vady lze snadno odhalit pomocí klimatických zkoušek prováděných na konci řady.

d) V řadě klimatických zkoušek chladem a suchým teplem se mají použít brzy, aby došlo ke zjištění krátkodobých účinků teploty. Zkouška vlhkým cyklickým teplem umožní proniknutí vlhkosti do jakýchkoliv netěsností, trhlin a tento efekt bude ještě podpořen v případě použití zkoušky chladem a zkoušky nízkým tlakem. Použití dalších cyklů s vlhkým teplem pak tento efekt znásobuje a následně se může projevit změnou elektrických vlastností.

e) V určitých případech je možno pro rychlé odhalení trhlin či netěsností použít zkoušku hermetičnosti.

f) Zkouška konstantním vlhkým teplem se většinou používá na konci celé řady zkoušek. Pokud však není zařazena do řady, provádí se na samostatných vzorcích, aby se zjistilo jejich dlouhodobé chování ve vlhké atmosféře.

g) Korozní zkoušky, zkoušky pádem, překlopením a zkouška slunečním zářením se obvykle do řady zkoušek nezařazují. Pokud jsou ovšem nutné, provádí se samostatně.

Obecně by se řada zkoušek však měla stanovit na základě informací o podmínkách provozu vzorku. Pokud však tyto informace nejsou k dispozici, doporučuje se použít řadu, která má nejdůležitější vliv. Tato řada zkoušek se nazývá **obecná řada zkoušek**. Je však důležité dbát na to, aby byly použity pouze ty zkoušky, které jsou vzhledem k použití testovaného vzorku důležité. Příklad takové obecné řady zkoušek je uveden v následující tabulce:

Tab. 3.5 Obecná řada zkoušek

Zkouška	Komentář
A Chlad	Může způsobit mechanické namáhání a vzorek se tak stane citlivější k následujícím zkouškám
B Suché teplo	
N Rychlá změna teploty	
E Nárazy	Působí mechanická namáhání, jejichž následkem může být vznik poruchy či větší citlivost vzorku k následujícím zkouškám
F Vibrace	
M Tlak vzduchu	Tyto zkoušky odhalují vlivy předchozích tepelných a mechanických zkoušek
Vlhké teplo cyklické (cyklus 12 h + 12 Db h)	
C Vlhké teplo konstantní	Tyto zkoušky zesilují vlivy předchozích tepelných a mechanických zkoušek
K Korozní prostředí	
L Prach a písek	
Pronikání pevných těles Pronikání vody, například deště	Po dokončení prací na zkouškách z této normy IEC 60068-2 se používají následující zkoušky dle IEC 60529
Pořadí použití zkoušek E a F může být obrácené. Zkoušky vlhkým teplem konstantním a korozní zkoušky se mají provádět pokud možno samostatně	

3.7 Kategorie klimatické odolnosti součástek

Existuje tak velké množství kombinací zkoušek vlivů různých prostředí, že se v praxi provádí zasazení testovaného vzorku do jedné z několika předem stanovených standardních skupin. Tyto skupiny se dělí do kategorií, které se navzájem odlišují lomítky. Ty ukazují nejprve hodnoty pro zkoušky chladem, teplotu zkoušky suchým teplem a poslední je počet dní, po které je vzorek vystaven vlhkému konstantnímu teplu. Stanovuje tak limity, kterým je součástka schopna odolat. Tyto skupiny jsou:

- První skupina: dvě číslice, které udávají nejnižší teplotu okolí při provozu (zkoušce chladem, které testovaný vzorek odolal). Pokud se jedná pouze o jednu číslici, musí být číslo doplněno číslicí „0“ pro zápornou hodnotu, nebo „+“ pro hodnotu kladnou.

- Druhá skupina: tři číslice, které udávají nejvyšší teplotu okolí při provozu (zkoušce suchým teplem, které testovaný vzorek odolal). Pokud se jedná pouze o dvě číslice, je opět nutné doplnit před číslo „0“, aby vznikla skupina tří čísel.
- Třetí skupina: dvě číslice, které udávají počet dní, po které byl vzorek vystaven vlivu zkoušky vlhkým konstantním teplem (zkoušky Ca). Pokud se jedná o jednu nebo žádnou hodnotu, je zapotřebí doplnit číslice „0“. V případě, že se expozice suchým teplem neprovádí tedy „00“.

Vzorek spadá do určené kategorie pouze v případě, že dokázal vyhovět požadavkům předepsaným pro svoji kategorii.

Tab. 3.6 Kategorie klimatické odolnosti součástek

Vzorek je zařazen do kategorie 55/100/56 pokud splní následující požadavky a),b) a c):	
a) Chlad	-55 °C
b) Suché teplo	100 °C
c) Vlhké konstantní teplo	56 dní
Vzorek je zařazen do kategorie 25/085/04 pokud splní následující požadavky d),e) a f):	
d) Chlad	-25 °C
e) Suché teplo	85 °C
f) Vlhké konstantní teplo	4 dny
Vzorek je zařazen do kategorie 10/070/21 pokud splní následující požadavky g),h) a i):	
g) Chlad	-10 °C
h) Suché teplo	70 °C
i) Vlhké konstantní teplo	21 dní
Vzorek je zařazen do kategorie +5/055/00 pokud splní následující požadavky j) a k):	
j) Chlad	+ 5 °C
k) Suché teplo	55 °C
l) Vlhké konstantní teplo	Nepožaduje se

Na následujících dvou stranách je uveden přehled informací, jmenovitých hodnot a vlastností, dle kmenové normy CECC 43 000: 1982, které musí výrobce uvádět v příslušné specifikaci ke každému vyrobenému typu termistorů.

Identifikace teplotně závislého odporu (termistoru):

- a) Stručný popis termistoru
- b) Údaje o typických konstrukčních znacích
- c) Obrysový náčrt s rozměry, které jsou důležité pro vyměnitelnost, či odvolávku na národní nebo mezinárodní normy pro rozměry. Volitelně může být tento náčrt uveden v dodatku k předmětové normě.
- d) Použití či oblast použití, pokrývaná předmětovou normou a zejména stupeň potvrzené jakosti dle předmětové normy.
- e) Stručné údaje o nejdůležitějších vlastnostech, které umožňují rychlé srovnání s jinými typy termistorů.

Výrobci, kteří vyrábějí součástky povolené, dle této normy, musí mít k dispozici průběžný seznam povolených výrobků. Základní údaje o vyráběných termistorech bývají pak shrnuty pro přehlednost do tabulky.

Tab. 3.7 Základní údaje o vyráběných termistorech

Typ	Rozsah jmenov. odporu*		Jmen. Zátížitelnost (W)	Zátěž. konst.	Časová konst.	Rozměry (mm)			
	R_min	R_max				těleso		vývody	
						L	D	l	d
.									
.									
.									

Jmenovité hodnoty a vlastnosti termistorů

Přednostní hodnoty povolených odchylek:	$\pm \text{--}\%$
Klimatická kategorie:	"-/-/-"
Dlouhodobé rázy:	4000 krát při 390 m/s ² (1333 ve všech 3 směrech)
Rázy:	490 m/s ² ,11 ms, půlvlna-sinus
Vibrace:	10 Hz až 55 Hz, nebo 10 Hz až 500 Hz, nebo (zvolí se méně náročné)
Mezní hodnota změny odporu po 1000 h, zkoušky trvanlivosti:	$\pm \text{--}\%$
Přípustná odchylka B-konstanty:	$\pm \text{--}\%$
Poměr hodnot odporu:	(Uvádí se, je-li žádoucí)
Charakteristika odpor/teplota:	Uvedou se tolerance hodnot odporu a teploty, které přichází v úvahu
Napěťová pevnost (Pouze u izolovaných termistorů):	Stříd. napětí, špičková hodnota (Napětí použité pro zkoušky v podskupinách B 1, C 2 a D1 pro napěťovou zkoušku)

V dokumentaci je též nutné uvádět křivku redukce zatížení termistoru. Pokud v praxi dochází k objednávání termistorů, tak podle této normy je nutno uvádět následující údaje:

- Jmenovitý odpor;
- Povolená tolerance;
- B – konstanta;
- Konstrukční typ a číslo národního vydání této předmětové normy

3.8 Tabulka doporučených testů stability společností TDK Czech s.r.o.

Test	Standard	Testovací podmínky	$\Delta R_{25}/R_{25}$	Vady
Expozice při vysoké teplotě (uložení)	MIL-STD-202, metoda 108	Skladování při $T = 125^{\circ}\text{C}$ $t = 1000\text{h}$	< 2%	Žádné viditelné poškození
Vlhkost	MIL-STD-202, metoda 103	$T = 85^{\circ}\text{C}$ Relativní vlhkost vzduchu 85% $t = 1000\text{h}$ Test zatížení max. 0.3 V DC na NTC*	< 2%	Žádné viditelné poškození
Provozní život	MIL-STD-202, metoda 108	$T = 125^{\circ}\text{C}$ $t = 1000\text{h}$ Test zatížení max. 0.3 V DC na NTC*	< 2%	Žádné viditelné poškození
Teplotní cykly	JESD 22 metoda JA-104	Test nižších teplot: -55°C Test vyšších teplot: 125°C 1000 cyklů Doba setrvání: 30 min při každé teplotě Přecho ve vzduchu: max 1 min	< 2%	Žádné viditelné poškození
Pevnost svorek	MIL-STD-202, metoda 211	Testování celistvosti zařízení Stav A: 2.27 N (AEC-Q200)	< 1%	Žádné viditelné poškození
Mechanický šok	MIL-STD-202, metoda 213, podmínka C	Akcelerace: 40 g Doba impulsu: 6 ms Počet nárazů: 3, všemi směry	< 1%	Žádné viditelné poškození
Vibrace	MIL-STD-202, metoda 204	Akcelerace: 5 g $t = 20\text{ min}$ 12 cyklů ve všech 3 směrech Rozsah frekvence: 10-2000 Hz	< 1%	Žádné viditelné poškození
Skladování v suchém prostředí	IEC 60068-2-2	Skladování při vyšší kategorii teplot $T = 155^{\circ}\text{C}$ $t = 1000\text{h}$	< 3%	Žádné viditelné poškození
Skladování ve vlhkém prostředí, v rovnovážném stavu	IEC 60068-2-78	Teplota vzduchu: 40°C Relativní vlhkost vzduchu: 93% Doba trvání: 56 dní	< 1%	Žádné viditelné poškození
Rychlá změna teploty	IEC 60068-2-14	Test nižších teplot: -55°C Test vyšších teplot: 125°C 100 cyklů	< 2%	Žádné viditelné poškození
Vytrvalost		$P_{\text{max}}: 200\text{mW}$ $t: 1000\text{h}$	< 3%	Žádné viditelné poškození
Dlouhodobá stabilita (empirické hodnoty)		Teplota: 70°C $t: 10000\text{ h}$	< 3%	Žádné viditelné poškození

4 Laboratorní testování stability NTC termistorů

Tato část diplomové práce se věnuje experimentálním měřením tištěných NTC termistorů, které ovlivňují jejich stabilitu. Jsou zde popsány postupy výběru komerčních NTC termistorů, které byly zvoleny pro porovnání vlastností. Dále je zde definována provedená příprava pro měření dle relevantních norem. V poslední části kapitoly jsou uvedeny výsledky z měření a jejich zhodnocení.

4.1 Rozbor zadání a experimentální plán

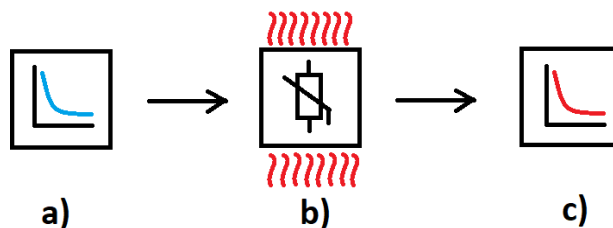
Součástí praktické části diplomové práce bylo navržení efektivního testovacího postupu pro charakterizaci dlouhodobé stability tištěných NTC termistorů. Tento postup byl zvolen na základě existujících norem a za pomoci dostupné laboratorní techniky. Popis laboratorně testovaných flexibilních NTC termistorů je uveden v kapitole 4.2. Výběr relevantních komerčních termistorů, které se svým provedením blíží testovaným je detailněji popsán v kapitole 4.3. Po prostudování dostupných relevantních norem a zhodnocení použitelnosti laboratorní infrastruktury se jako realizovatelné ukázalo testování stárnutí vzorků v následujících podmínkách:

- Stárnutí za konstantní teploty a vlhkosti v horkovzdušné peci Memmert UF55m (T=50 °C; RH=30,50,70 %;500 h)
- Stárnutí za konstantní teploty a vlhkosti v horkovzdušné peci Memmert UFP 400 (T=40 °C; RH=30,50,70 %;500 h)
- Stárnutí při cyklických změnách teploty v šokové komoře (T= -10 °C /50 °C; 200 cyklů)
- Stárnutí za konstantní teploty v mrazáku (T= -20 °C; 595 h)

Celkově bylo tedy navrženo 8 různých testů stárnutí. V případě testování v horkovzdušných pecích byla uvažována vždy konstantní teplota a tři různé úrovně relativní vlhkosti vytvořené v uzavřených boxech uvnitř pece pomocí roztoků glycerolu a vody s rozdílnými hmotnostními poměry jednotlivých složek.

Bylo nutné vzorky proměřit a získat základní informace o jejich chování před a po vystavení externím stresorům. Toto měření probíhalo v termostatické olejové lázni v intervalu $(-10\div 50)$ °C s krokem 5 °C. Měření v olejové lázni je podrobněji popsáno dále v kapitole 4.4.3.

Základní princip celkového testování flexibilních NTC termistorů je v jednoduchém blokovém schématu naznačen na následujícím obrázku:



Obr. 4.1 a) Měření vlastností termistoru v olejové lázni před vystavením externím stresorům, b) Vystavení termistoru zvoleným klimatickým podmínkám, c) Měření vlastností termistoru v olejové lázni po vystavení externím stresorům

Přestože se základní princip měření jeví poměrně jednoduše, příprava na něj je velmi rozsáhlá a samotné testování je velmi časově náročné. Popis příprav k měření zahrnující realizaci měřicí kabeláž, uzavíratelných boxů pro vytvoření specifických úrovní relativní vlhkosti a měřicí a testovací instrumentace je popsán v kapitole 4.4.

4.2 Vzorky tištěných NTC termistorů pro testování stability

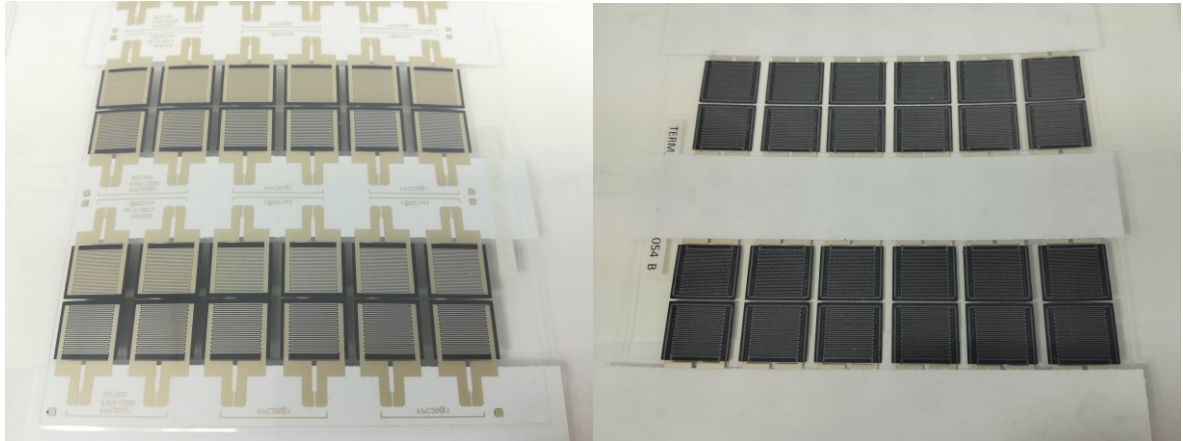
Vzorky testovaných flexibilních NTC termistorů jsou založeny na termosenzitivní tiskové formulaci pro sítotisk, tvořené polovodičovou funkční složkou na bázi metalických oxidů, polymerním pojivovým systémem a rozpouštědlovým systémem. Vzorky zahrnovaly celkem 4 různé termosenzitivní materiálové formulace s rozdílnou polovodičovou složkou. Ve všech případech byly vzorky realizovány na flexibilním polymerním substrátu se sítotiskově nanesenou interdigitální elektrodovou strukturou na bázi Ag a termosenzitivní vrstvou. Finální pouzření pak bylo realizováno dvěma různými způsoby: 1) laminací krycí fólií (PET), 2) přetiskem transparentním lakem. Celkem tedy vzniklo 8 skupin vzorků (4 varianty termosenzitivní formulace ve dvou provedeních pouzření). Z každé skupiny byly pro testování vybrány vždy dva reprezentativní vzorky, tzn. jedna celá sada pro jeden typ

testů zahrnovala celkem 16 vzorků tištěných termistorů. Celkově bylo tedy pro všech 8 navržených testů stárnutí připraveno 128 vzorků. Každý vybraný vzorek prošel vizuální kontrolou, zda nedošlo při výrobě například ke zkratu nebo jiné zjevné vadě. Po vizuální kontrole byl u vzorků proměřen elektrický odpor multimetrem FLUKE 179 za normálních laboratorních podmínek pro odhalení případných skrytých vad, které by ovlivňovaly jeho elektrické vlastnosti..

Následující tabulka reprezentuje způsob, jakým docházelo k agregovaným označením pro vzorky vybraných termistorů. V prvním sloupci je uveden typ senzoru podle jeho termosenzitivní formulace. Ve druhém je způsob enkapsulace, neboli způsob ochrany termistoru laminací nebo transparentním lakem. Následuje označení sady vzorků, ze kterých byl termistor vystřižen a poslední sloupec udávající označení je číslo samotného termistoru:

Tab. 4.1 Tabulka testovaných skupin tištěných termistorů

Termosenzitivní formulace / typ senzoru	Enkapsulace	Panel / sada vzorků	č. vzorku	Agregované označení vzorku
NTC1 2017_03_12_2	Transp.	TERM_39	19	TERM_39_19_T
NTC1 2017_03_12_2	Transp.	TERM_39	20	TERM_39_20_T
NTC1 2017_03_12_2	Lamino	TERM_056_B	22	TERM_056_B_22_L
NTC1 2017_03_12_2	Lamino	TERM_056_B	21	TERM_056_B_21_L
NTC3 2018_02_22_3	Transp.	TERM_095	24	TERM_095_24_T
NTC3 2018_02_22_3	Transp.	TERM_095	23	TERM_095_23_T
NTC3 2018_02_22_3	Lamino	TERM_99	19	TERM_99_19_L
NTC3 2018_02_22_3	Lamino	TERM_99	20	TERM_99_20_L

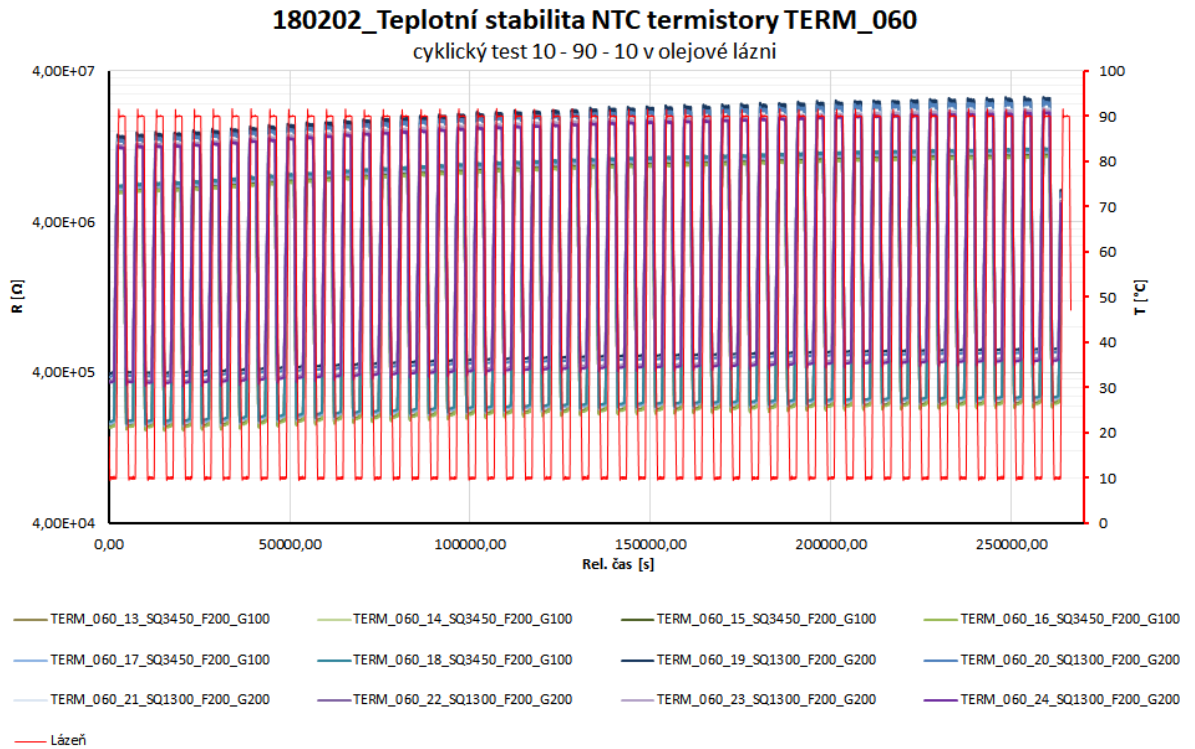


Obr. 4.2. Ukázka dvou tiskových sad NTC termistorů ze spodní strany (vlevo) a z vrchní strany (vpravo).

4.3 Výběr relevantních komerčních NTC termistorů

Pro porovnání výsledků měření stability termistorů bylo nutné vybrat referenční komerčně vyráběné termistory, které projdou stejnými testy, jako tištěné termistory. Tyto komerční termistory byly vybrány primárně na základě nominálního odporu R_{25} . Dalším kritériem bylo fyzické provedení konvenčních termistorů blížící se testovaným tištěným termistorům zejména s ohledem na jejich celkovou velikost a tenkovrstvé provedení na flexibilním nosiči.

Tištěné termistory byly nejprve proměřeny v olejové lázni pro získání základních dat o jejich chování při různých teplotách. Výsledky z prvního měření cyklického testu v olejové lázni pro termistory z řady TERM_060 jsou zobrazeny na následujícím obrázku:



Obr. 4.3 Časový záznam odporové odezvy vybrané sady tištěných termistorů na cyklické změny teploty v rozsahu 10 °C - 90 °C v termostatické lázni

Nejprve bylo provedeno sledování chování všech sad tištěných termistorů v konstantní teplotě v horkovzdušné peci (90 °C), dále i při dynamickém cyklování v olejové lázni (10-90-10).

V obou testech byl zjevný postupný posun odporu vzorků. Určitým nedostatkem byla v tomto případě absence ochranné lakové vrstvy, která by omezovala možnou interakci termosenzitivní vrstvy s okolním prostředím (zejména v přímém styku s olejovou lázní). Na základě těchto prvotních výsledků bylo rozhodnuto, že dojde k úpravě konstrukce termistorů pomocí ochranné krycí vrstvy a snížení teplotního rozsahu výchozího kalibračního profilu. Tato úprava spočívá ve snížení výchozího teplotního stropu ve všech screeningových testech z 90 °C na 50 °C, aby pokud možno došlo k zamezení možným tepelně-degradačním efektům. Při zjištění uspokojivých výsledků stability s nižším teplotním prahem, bylo možné následně teplotní rozsah v několika krocích zvyšovat.

Základní hladiny teplot u měření, kterým prošly všechny testované vzorky tedy byly:

- (10 – 50 – 10) °C

Po základním otestování tištěných termistorů bylo možné ze získaných dat zjistit jejich referenční odpor při 25 °C. Na základě určení této hodnoty mohly být vybrány komerčně vyráběné termistory se stejnou hodnotou odporu při 25 °C a podobnou konstrukcí.

Pro určení hodnot odporu byla tedy vybrána data vždy pro 3. cyklus schodového nárůstu a poklesu teploty. Byly použity hodnoty odporů pro celý časový rozsah odpovídající teplotám 20 °C a 30 °C a spočítán celkový průměr pro orientační určení hodnoty R_{25} . Toto bylo provedeno pro všechny vzorky a následně ze všech průměrů byl určen souhrnný průměr hodnot pro danou dvojici termistorů ze stejné sady.

Došlo tedy k omezení na 3 různé typy termistorů dle zadání práce, které reprezentují řádově podobné hodnoty R_{25} . V první skupině jsou tedy jako reprezentativní hodnoty R_{25} v rozsahu (200 - 250) kΩ, ve druhé cca 20 kΩ a u třetí skupiny cca 1,5 MΩ (všechny hodnoty se pohybují kolem průměrného R_{25} pro danou skupinu). Bylo ovšem nutné přizpůsobit se hodnotám R_{25} reálně komerčně dostupných termistorů, navíc v preferovaném tenkém flexibilním provedení. Celá tato volba byla kompromisem mezi poměrně širokým rozsahem hodnot testovaných termistorů, dostupností komerčních alternativ a celkově přijatelným množstvím všech vzorků, které bylo potřeba paralelně testovat.

S ohledem na daná kritéria výběru byly zvoleny následující komerčně dostupné termistory:

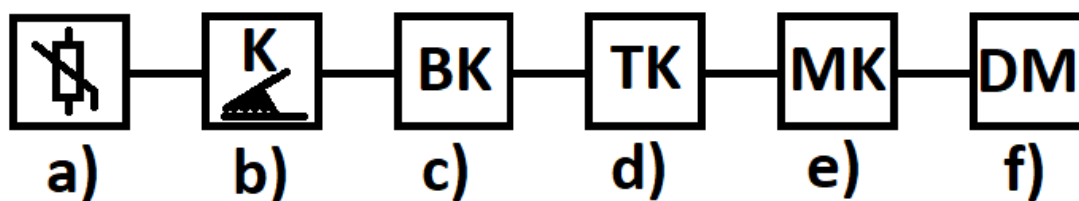
- TKS TTF3A303F39H3AY 30K (jmenovitý odpor při 25 °C: $R_{25} = 30 \text{ k}\Omega$)
- ATC Semitec 104JT-025 100K (jmenovitý odpor při 25 °C: $R_{25} = 100 \text{ k}\Omega$)
- AVX ND03U00105J 1M (jmenovitý odpor při 25 °C: $R_{25} = 1 \text{ M}\Omega$)

4.4 Příprava na měření stability termistorů

Před začátkem měření bylo zapotřebí vytvořit správné podmínky zvolených testovacích prostředí podle předepsaných norem. V následující kapitole jsou popsány jednotlivé části těchto příprav.

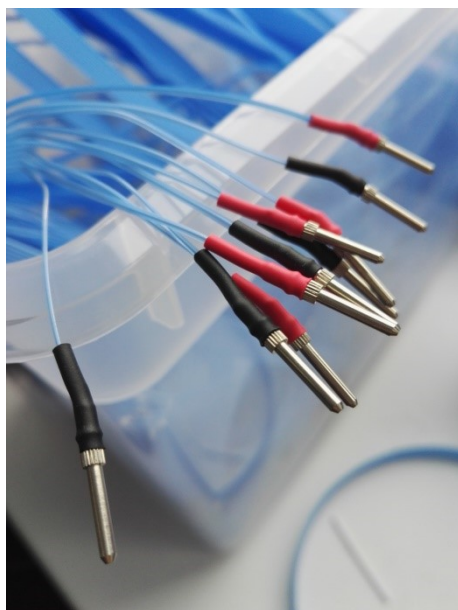
4.4.1 Příprava kabeláže

Pro připojení testovaných termistorů k měřicímu zařízení musel být vytvořen poměrně komplexní systém kabeláže. Na následujícím blokovém schéma je zobrazen celý propojovací systém od úrovně senzorů až po digitální měřicí multimetr:



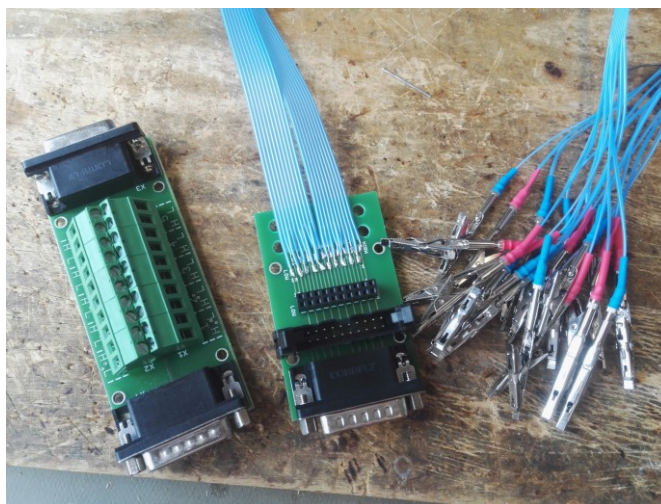
Obr. 4.4.1 Schéma propojovacího systému a) testovaný termistor, b) krokosvorky, c) banánkový konektor, d) teplotně odolný kabel, e) měřicí karta, f) digitální multimetr

S ohledem na zvýšené tepelné namáhání při dlouhodobých testech stárnutí byl pro měřicí kabeláž zvolen plochý deseti žilový kabel (10 žil, rozteč 1,27 mm, 28 AWG, izolace FEP s odolností do 200 °C). Kabel byl nastříhán na 1,5 m dlouhé části a celkem jich bylo vytvořeno 24. Na jedné straně došlo k oddělení jednotlivých žil a na každý konec byl napájen a zaizolován 2mm banánkový konektor, který umožňuje připojení precizních krokosvorek určených pro kontaktování samotných tištěných termistorů. Tato úprava je vidět na následujícím obrázku:



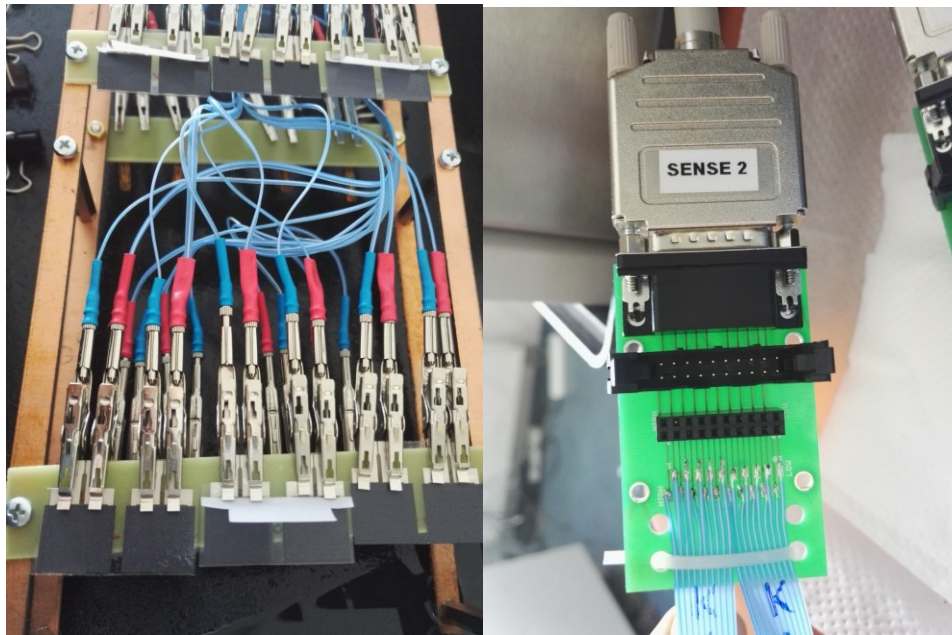
Obr. 4.4.2 Ukázka zaizolovaných konektorů u vícežilového kabelu

Druhá strana tepelně odolného kabelu byla připájena na desku plošného spoje umožňující napojení na měřicí kartu multimetru. Propojovací desky byly navrženy pro dvoubodové připojení deseti vzorků pomocí dvojice deseti-žilových kabelů. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny oba konce takto připraveného měřícího kabelu:



Obr. 4.4.3 Ukázka realizovaného měřícího kabelu pro připojení 10-ti vzorků termistorů.

Takto připravená kabeláž pak byla připojena na jedné straně k termistorům a na straně druhé straně k multiplexerové kartě laboratorního digitálního multimetru (viz. následující obrázek):



Obr. 4.4.4 Ukázka kontaktování tištěných termistorů a připojení měřicího kabelu na měřicí kartu

Pro snadnou orientaci v kabeláži i použití měřících karet byly karty označeny značkou D a pořadovým číslem. Pro orientaci v připojení termistorů na jednotlivé kabely na kartě byly kabely vždy označeny K1 a K2. Jednotlivé žíly na každém kabelu měly přiřazeny pořadové číslo 1 - 10. Výsledné unikátní označení pro konkrétní měřicí kanál s jedním dvoubodově připojeným termistorem pak bylo např. D3 – K1 – 1,2.

4.4.2 Příprava boxů s nastavitelným prostředím

Jelikož měření stability zahrnuje různé podmínky pro měření, jako je teplota, tlak či relativní vlhkost, bylo zapotřebí vytvořit různá prostředí. Je nutné aby vytvořená prostředí pro experimentální měření dodržovala požadavky normy, ale zároveň byla dobře reprodukovatelná a nekomplikovala tak již velmi široký rozsah testů. Z toho důvodu byly termistory při testování v horkovzdušných pecích umístěny do teplotně odolných plastových boxů s uzavíratelným víkem. V těchto boxech, jak již bylo naznačeno v kapitole 4.1, mohly být termistory bezpečně vystaveny konstantním klimatickým podmínkám, aniž by došlo ke změně prostředí.

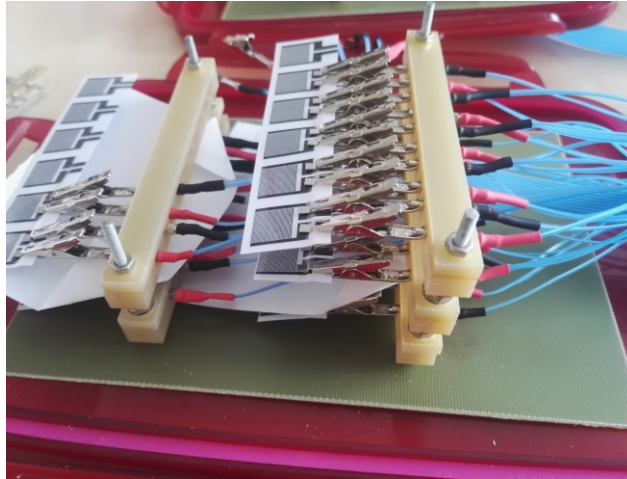


Obr. 4.4.5 Ukázka uzavíratelného boxu

Zvolené obdélníkové plastové dózy o objemu 2,5 l, hmotností 0.28 kg a rozměry 9×24,5×17 cm s dobře těsnícím víkem mají tyto vlastnosti:

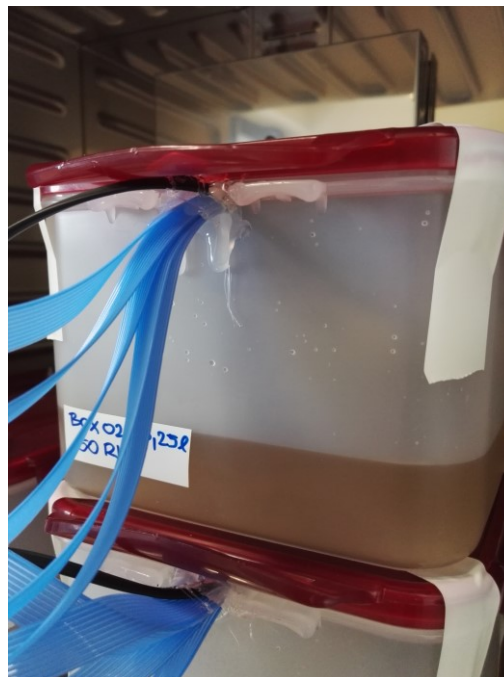
- čtyři pohyblivé klipy zajišťující víko
- vzduchotěsnost pro uchování prostředí
- vhodné do vyšších teplot (+100 °C)
- vhodné do nízkých teplot (-40 °C)

Pro měření termistorů bylo zapotřebí vytvořit odpovídající konstrukci, která umožní snadnou montáž i demontáž jednotlivých vzorků. Vzorky musejí být chráněny před nahodilým dotykem, díky kterému by mohlo dojít například ke zkratu, či ovlivnění naměřených hodnot ostatních vzorků. Z toho důvodu byla navržena konstrukce připevněná na uzamykatelné víko každé dózy. Do víka byly vyvrtány díry, skrz které je možné připevnit nařezané závitové tyče o velikosti M4. Na tyto tyče je možné umístit nastříhané desky, které slouží jako podstava pro konstrukční soustavu. Soustava se skládá frézovaných kompozitových lišt vyrobených k upevnění jednotlivých termistorů. Každá tato lišta je schopná upevnit 5 termistorů. S ohledem na počet testovaných termistorů bylo nutné vytvořit několik pater této konstrukce. Navržená konstrukce je vidět na následujícím obrázku:



Obr. 4.4.6 Konstrukce pro uchycení testovaných termistorů

V uzavřených boxech, které byly vloženy do laboratorní horkovzdušné pece bylo nutné vyvést měřicí kabeláž, která vede z upevněných termistorů až k měřicímu zařízení. Při vyvedení kabelů je důležité, aby nedošlo k vytvoření mezery a narušení vytvořeného prostředí. Byl tedy vytvořen otvor v samotném boxu, kterým byla kabeláž vyvedena ven. Po vyvedení kabeláže byl otvor zalepen pomocí tavného lepidla. Tím došlo k zamezení jakékoli změny ve vnitřní atmosféře. Konečné provedení je vidět na následujícím obrázku:



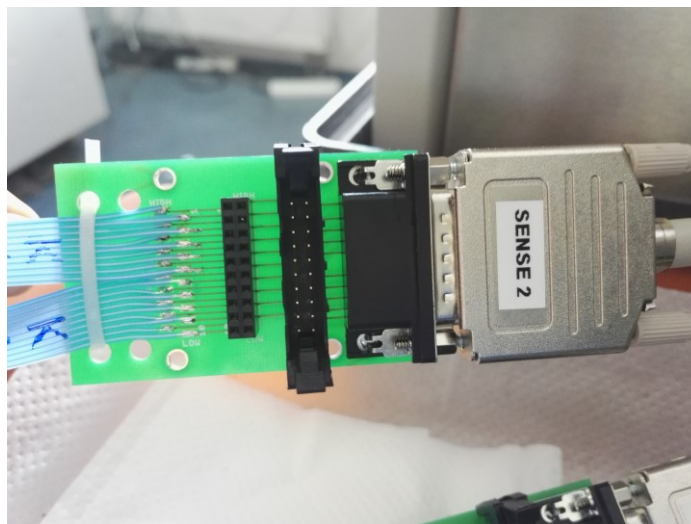
Obr. 4.4.7 Vyvedení kabeláže z boxu testovaných termistorů

Každý takto připravený box se sadou testovaných termistorů obsahoval 1000 g směsi glycerolu a vody ve specifických hmotnostních poměrech, které byly pro testovací teploty v obou pecích experimentálně odladěny pro dosažení tří ustálených úrovní relativní vlhkosti: 30 %, 50 % a 70 %.

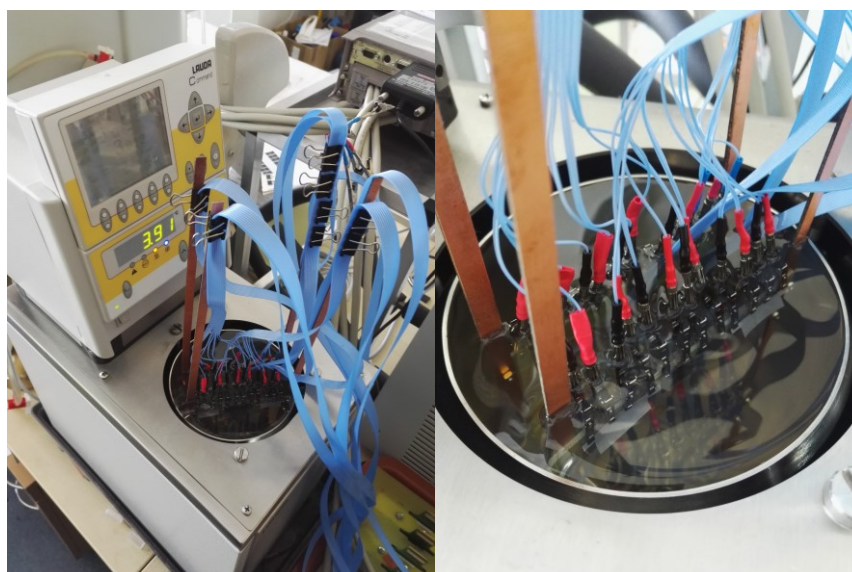
4.4.3 Měření v olejové lázni

Všechny sady testovaných termistorů, včetně komerčních, byly podrobeny základnímu proměření svých vlastností v termostatické olejové lázni. Olejová lázeň Lauda ProLine PJJ 12 je vybavena kompresorem Lauda DLK 45, který zajišťuje chlazení, cirkulaci oleje a rovnoměrné šíření teploty. Lázeň je ovládána pomocí softwaru Wintherm Plus a k počítači byla připojena pomocí sériového portu. Základní funkce programu se dají rozdělit na dvě skupiny. Na jedné straně sběr, zobrazení a uložení dat a na straně druhé ovládání vlastností kapaliny v lázni (teplota, rychlost proudění). Program také nabízí nastavení (naprogramování) celého měřicího cyklu definovaného teplotně-časovým profilem. Rozsah těchto zkoušek byl definován v kapitole 4.3. Lázeň je omezena teplotním intervalem od -40°C do 200°C , ale použití oleje Kryo 51 snižuje horní hranici intervalu na 120°C . Ovšem pro potřeby testování termistorů je tato hranice dostačující.

Pro měření základních vlastností flexibilních tištěných termistorů v olejové lázni bylo nutné termistory bezpečně prostorově oddělit, aby nedošlo k jejich vzájemnému ovlivnění. Toho bylo dosaženo fixací termistorů k pomocné konstrukci pomocí krokosvorek, které zároveň zajistily jejich elektrické připojení. Každý termistor byl po připojení na konstrukci proměřen multimetrem, aby bylo ověřeno jeho spolehlivé nakontaktování. Celá měřicí soustava pak byla vložena do termostatické lázně a došlo k nastavení požadovaných teplot. Propojení termistorů s měřícím přístrojem bylo zajištěno pomocí vytvořených kabelových soustav zakončených propojovacími deskami. Každá deska obsahující 20 kontaktoých pinů byla vodivě spojena s kabely umožňující měřit až 10 termistorů najednou. Každá deska byla připojena k multiplexerové kartě multimetru Keithley 2700, který prováděl měření dvoubodovou metodou. Záznam hodnot multimetrem byl programově řízen z počítače softwarem Kickstart pomocí GPIB rozhraní. Výsledná data byla dále exportována a zpracována v MS Excel.



Obr. 4.4.8 Připojení měřicí kabeláže k multiplexerové kartě pomocí propojovací desky.



Obr. 4.4.9 Měření termistorů upevněných na pomocné konstrukci v olejové lázni

4.5 Výsledky měření stability NTC termistorů

Po testování termistorů vystavených různým klimatickým podmínkám bylo nutné zpracovat naměřená data. Pro každé měření všech termistorů, ať už před vystavením externím stresorům nebo po té, dosahoval počet naměřených dat pro každý termistor řádu tisíců. Všechna naměřená data byla zpracována v MS Excel, kde bylo možné jejich efektivní roztřídění. Na následujícím obrázku jsou exportovaná data, která se omezují vždy na jedno testování v olejové lázni u konkrétního vzorku. V tomto případě se jedná o vzorek TERM_54_11_L. Jak je možné vidět v levém horním rohu, vzorek byl vždy označen dle dne jeho měření a kanálem na který byl připojen:

Tab. 4.5.1 Ukázka finálních naměřených dat pro konkrétní otestovaný termistor

180401: CH104 TERM_54_11_L														
RAMP_UP	T (°C)	R_AVG	R_MED	COEF_VAR	RAMP_UP	T (°C)	R_AVG	R_MED	COEF_VAR	RAMP_UP	T (°C)	R_AVG	R_MED	COEF_VAR
1	-10	409461,7932	409442,031	0,12%	2	-10	417594,814	417656,531	0,09%	3	-10	425617,8674	425655,531	0,08%
1	-5	379670,2634	379875,656	0,13%	2	-5	392801,875	392730,094	0,11%	3	-5	395796,7694	395701,062	0,11%
1	0	351338,6577	351404,094	0,12%	2	0	363875,7813	363936,531	0,12%	3	0	367150,5194	367172,937	0,10%
1	5	324002,7113	323878,781	0,12%	2	5	335577,5521	335598,313	0,15%	3	5	339261,0163	339172,375	0,12%
1	10	297625,6413	297817,812	0,25%	2	10	308490,2947	308441,875	0,12%	3	10	312735,9182	312652,375	0,12%
1	15	274369,421	274503	0,16%	2	15	282551,0804	282577,25	0,08%	3	15	286823,2085	286821,844	0,11%
1	20	251142,2387	251208,422	0,08%	2	20	259020,8081	259014,141	0,11%	3	20	261912,881	261887,469	0,06%
1	25	226702,3244	226654,734	0,10%	2	25	235684,3989	235699,484	0,11%	3	25	236196,0259	236183,469	0,07%
1	30	202259,916	202229,125	0,09%	2	30	213539,453	213508,797	0,12%	3	30	210622,0156	210618,531	0,06%
1	35	177887,6958	177908,406	0,09%	2	35	190398,7841	190399,953	0,09%	3	35	185692,4903	185692,703	0,09%
1	40	154646,9063	154646,125	0,12%	2	40	165628,782	165609,75	0,17%	3	40	161882,7767	161907,281	0,10%
1	45	133286,2836	133291,391	0,12%	2	45	141974,4233	142001,812	0,19%	3	45	139713,7582	139710,875	0,15%
1	50	114163,9961	114181,258	0,12%	2	50	120811,3586	120813,273	0,18%	3	50	119495,5826	119448,211	0,15%
RAMP_DWN	T (°C)	R_AVG	R_MED	COEF_VAR	RAMP_DWT (°C)	R_AVG	R_MED	COEF_VAR	RAMP_DWT (°C)	R_AVG	R_MED	COEF_VAR		
1	50	114163,9961	114181,258	0,12%	2	50	120811,3586	120813,273	0,18%	3	50	119495,5826	119448,211	0,15%
1	45	130991,2314	130995,711	0,07%	2	45	137597,6578	137585,016	0,09%	3	45	136483,4858	136518,937	0,09%
1	40	150128,0069	150142,797	0,09%	2	40	156963,1719	156997,844	0,08%	3	40	155850,2493	155846,594	0,09%
1	35	171219,6458	171154,453	0,09%	2	35	178224,0758	178178,187	0,09%	3	35	177288,2975	177283,094	0,07%
1	30	194249,2009	194244,391	0,08%	2	30	201502,689	201496,172	0,09%	3	30	200625,3467	200637,109	0,08%
1	25	218904,1599	218896	0,08%	2	25	226205,6979	226228,406	0,08%	3	25	225492,401	225484,844	0,08%
1	20	245059,2292	245031,672	0,09%	2	20	252442,1615	252417,516	0,07%	3	20	251805,5119	251810,75	0,08%
1	15	271400,9464	271406,937	0,10%	2	15	278702,2485	278669,406	0,12%	3	15	278331,6459	278419,719	0,12%
1	10	298989,052	299062,938	0,15%	2	10	306556,1875	306448,625	0,12%	3	10	306302,3006	306321,094	0,14%
1	5	327556,2589	327615,938	0,15%	2	5	335344,2961	335263,594	0,10%	3	5	334743,9583	334705,406	0,09%
1	0	356843,2142	356831,844	0,14%	2	0	364565,5655	364459,219	0,12%	3	0	364622,2128	364607,188	0,12%
1	-5	386760,3184	386689,25	0,09%	2	-5	394480,5626	394563,969	0,12%	3	-5	394405,1652	394374,719	0,08%
1	-10	417594,814	417656,531	0,09%	2	-10	425617,8674	425655,531	0,08%	3	-10	425430,046	425469,031	0,09%

V tabulce je možné vidět naměřená data pro tři opakované teplotní cykly se schodovitým profilem v rozsahu -10 °C až 50 °C a krokem 5 °C. Všechna data jsou rozdělena pro jednotlivé teplotní rampy. Ke každé konstantí hodnotě teploty lázně je z naměřených dat určen aritmetický průměr, medián a variační koeficient odporu daného vzorku termistoru. Z těchto dat je zkonstruovat základní kalibrační křivky termistoru.

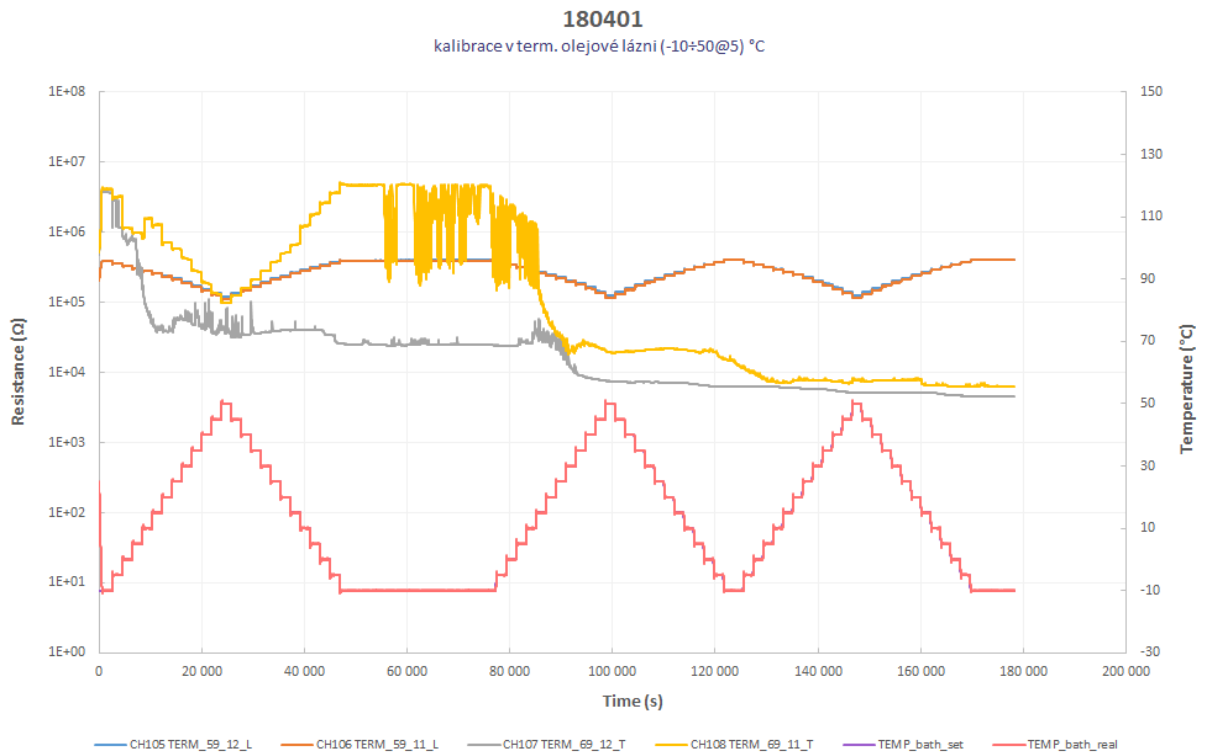
Základní myšlenkou celého měření je získat přehled o chování jednotlivých skupin testovaných termistorů před a po stárnutí v definovaných podmínkách. Po ukončení stárnutí byla nejprve provedena selekce termistorů, které z nějakého důvodu neuspěly při testování. Tato selekce byla důležitá pro zjištění, která řada termistorů a s jakým typem enkapsulace nejlépe odolává vnějším stresorům. Následující tabulka uvádí přehled termistorů, které odolaly nebo neodolaly vystavení klimatickým podmínkám a testování v olejové lázni:

Tab. 4.5.2 Tabulka životnosti termistorů (červená barva označuje vzorky, které selhaly).

		Pec 1: 40°C						Pec 2: 50°C						Mrazák: -20°C		Šok. Komora: -10°C/50°C		
		30%		50%		70%		30%		50%		70%		Před	Po	Před	Po	
		Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po					
TF1-1	T	1																
		2																
	L	1																
		2																
TF1-2	T	1																
		2																
	L	1																
		2																
TF2	T	1																
		2																
	L	1																
		2																
TF3	T	1																
		2																
	L	1																
		2																
REF1	ATC100k	1																
		2																
REF2	TKS30k	1																
		2																
REF3	AVX1M	1																
		2																

Tabulka je rozdělena dle kritérií pro termistory a klimatických podmínek, kterým byly vystaveny. TF značí materiálové označení termosenzitivní formulace, T (Transparentní „lakované“) a L (laminace) jsou dva různé druhy enkapsulace, 1 nebo 2 značí číslo testovaného vzorku. Při testování v pecích byly vzorky vystaveny různým druhům relativní vlhkosti vzduchu. Tyto hodnoty jsou v grafu vyznačeny v procentech. Každý termistor je zhodnocen před vystavením a po vystavení daným klimatickým podmínkám.

Z takto vytvořené tabulky je jasné vidět, že některé materiálové řady odolávaly testování mnohem lépe než jiné. Na následujícím grafu je ukázka toho, jak docházelo k selekci termistorů, které odolaly nebo neodolaly podmínkám měření:

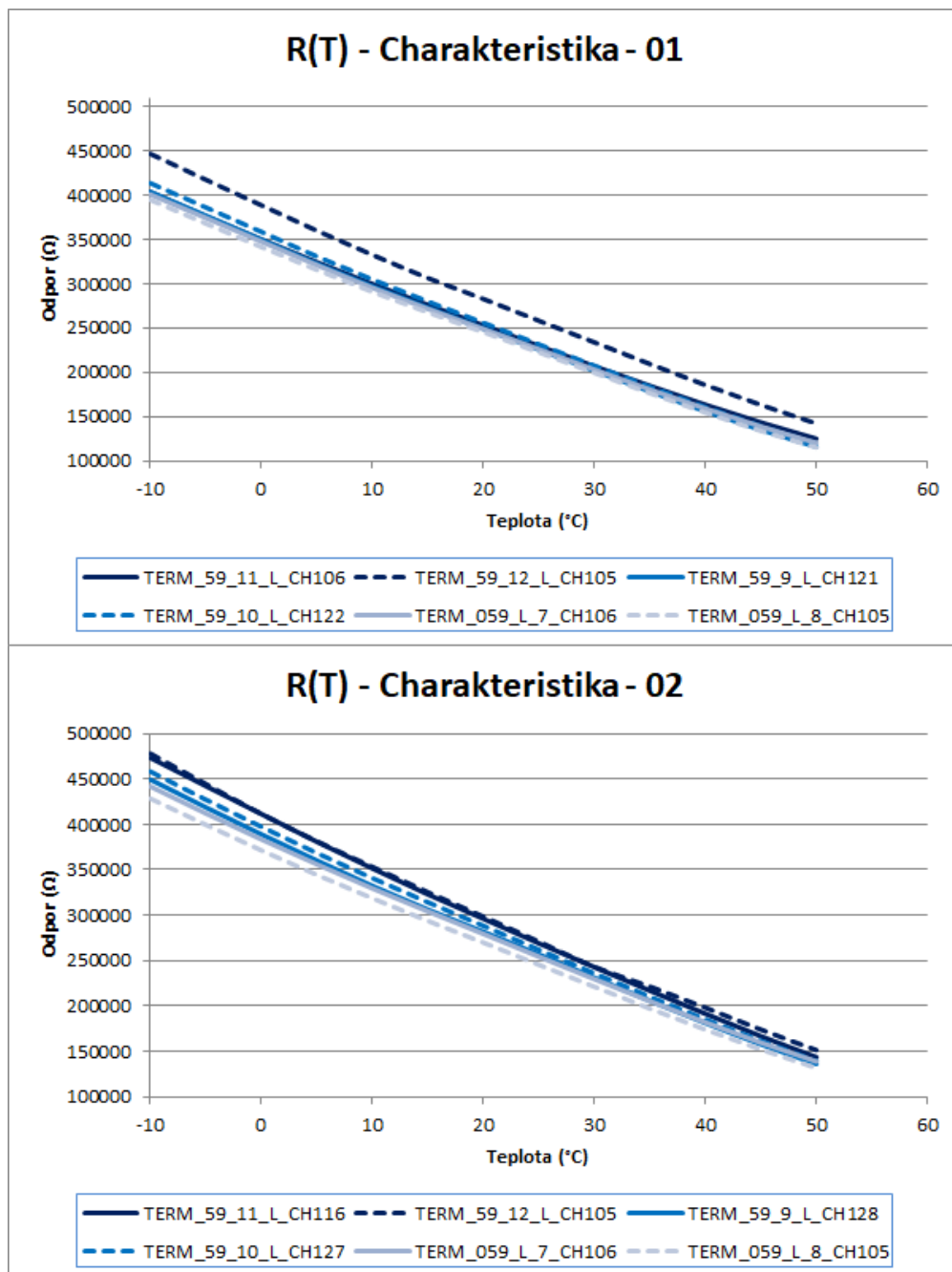


Graf 4.5.1 Kalibrace termistorů v olejové lázni

V grafu je vidět chování termistorů při schodovité změně teploty. Termistorová dvojice řady TERM_69_T zde jasně vykazují nepřípustné chování a proto byla v tabulce označena červeně. Naproti tomu řada TERM_59_L se chová dle teoretických předpokladů.

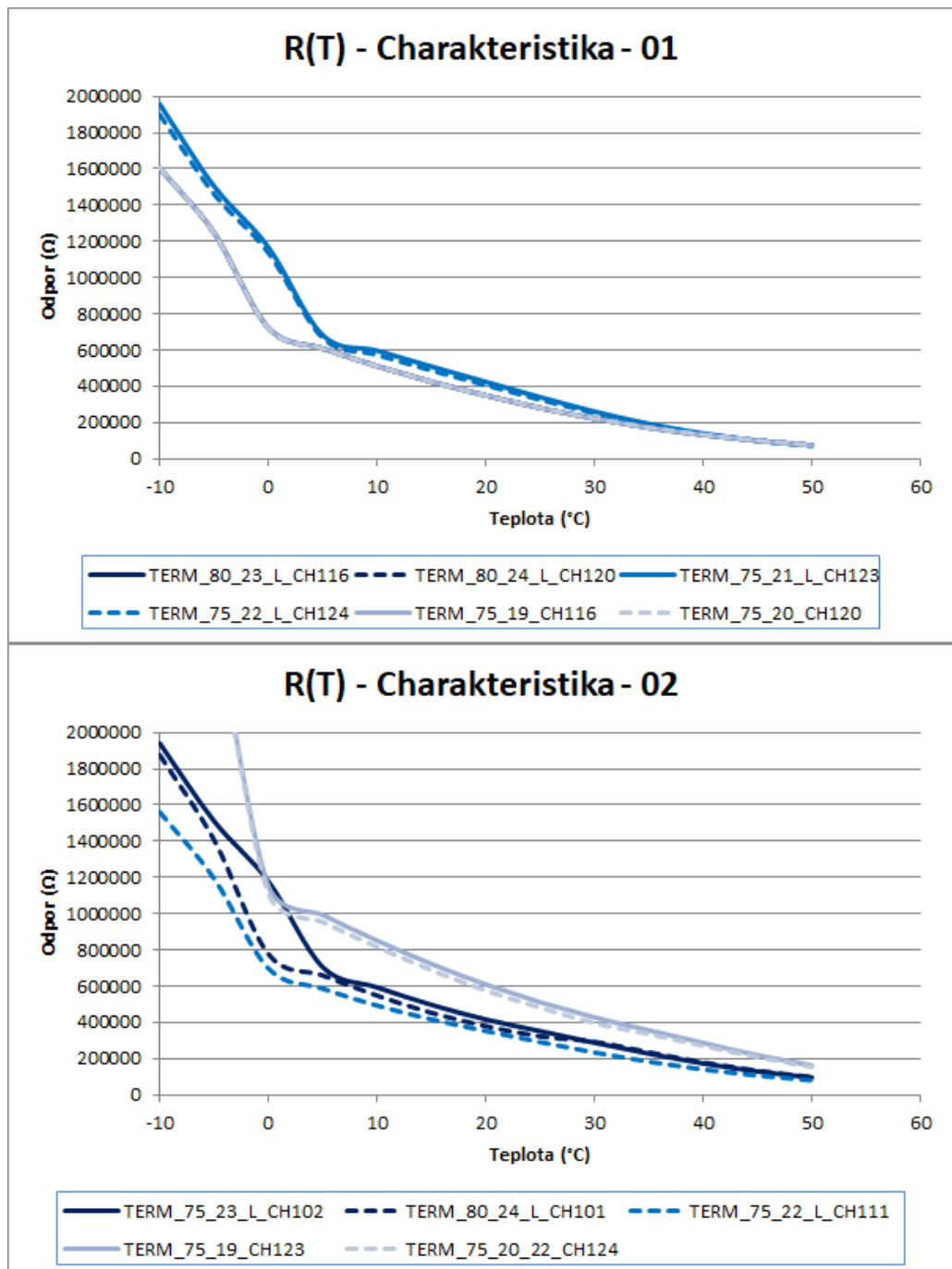
Pro zvolené řady s dostatečným počtem termistorů, které úspěšně prošly testováním, byly vytvořeny samostatné kalibrační charakteristiky $R(T)$. Tyto charakteristiky poskytují přehled o chování termistorů v závislosti odporu a teploty. Díky tomu je možné určit vliv klimatických podmínek na jednotlivé termistory. Z celkového testování vychází, že termistory které mají laminovaný způsob enkapsulace byly klimaticky odolnější. Byly tedy zvoleny čtyři série termistorů laminovaných, u kterých bylo provedeno srovnání $R(T)$ charakteristik. Označení 01 bylo použito pro zobrazení průběhu před vystavením klimatickým podmínkám

označení 02 po vystavení. V následujících grafech byla jako reprezentativní řada zvolena TF1-2-L. Průběhy ostatních řad jsou uvedeny v příloze. Na následujícím grafu je zobrazena $R(T)$ charakteristika této řady pro testování v peci při 40 °C za různých úrovní relativní vlhkosti. Graf je koncipován tak, že s rostoucí hodnotou RH (30 %, 50 %, 70 %) jsou průběhy tmavší. Dvojice termistorů je vždy reprezentována plnou a přerušovanou čarou:



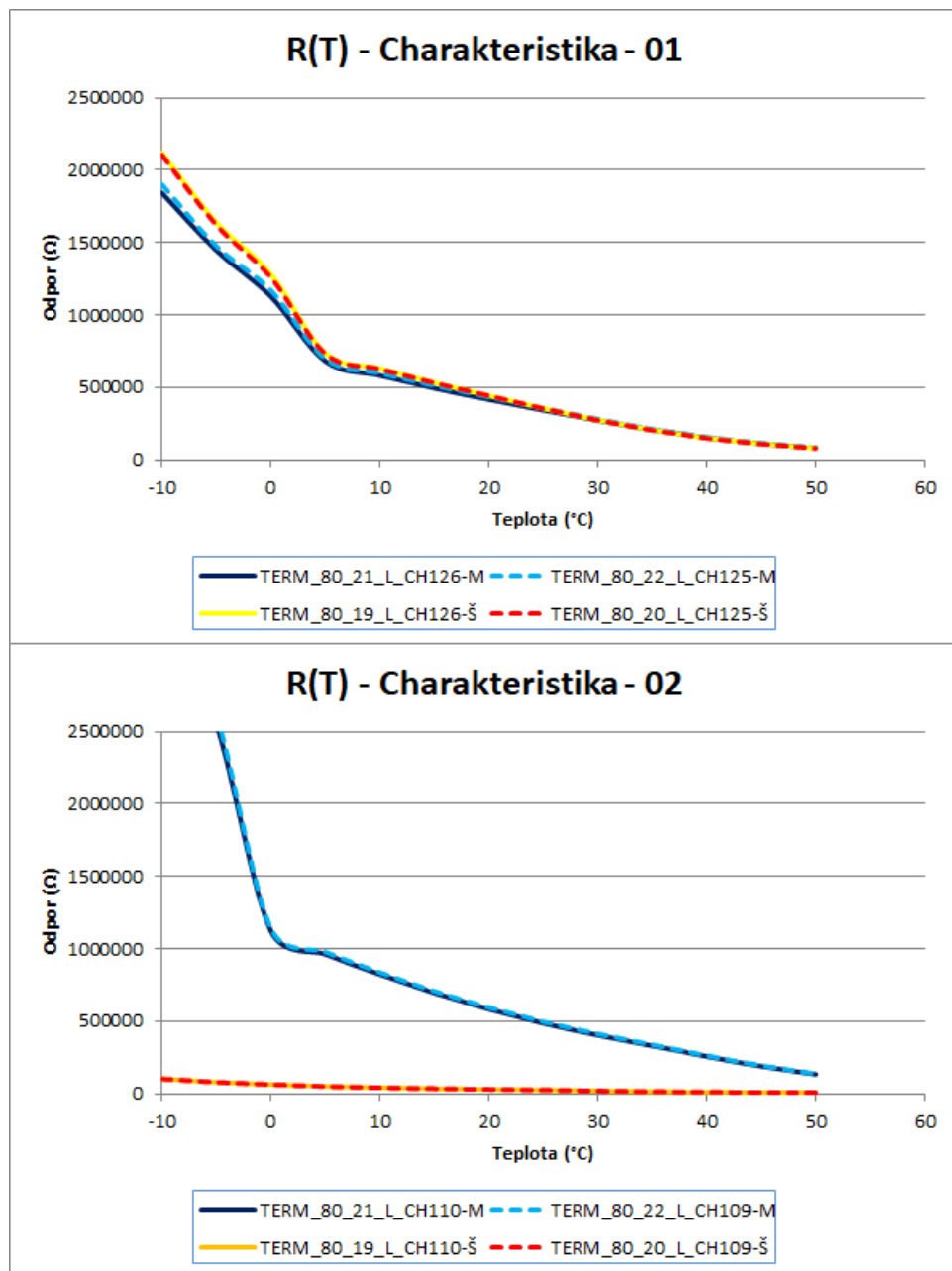
Graf 4.5.2 Charakteristika před a po testování v peci při 40 °C, (30 %,50 %,70 %) RH

Testované vzorky tištěných termistorů se zde chovají podle teoretických předpokladů se záporným teplotním koeficientem a vliv klimatických podmínek se zde nijak výrazně neprojevuje. Na následujícím grafu je zobrazena $R(T)$ charakteristika stejné řady pro testování v peci při 50 °C za různých úrovní relativní vlhkosti:



Graf 4.5.3 Charakteristika před a po testování v peci při 40°, (30 %, 50 %, 70 %) RH.

Během všech měření se navzdory teoretickým předpokladům v grafech objevovalo zkreslení hodnot po překročení hodnoty odporu 1 M Ω . Toto zkreslení je přisuzováno změně měřicího rozsahu multimetru, kdy dochází ke změně úrovně měřicího proudu. Dále jsou zobrazeny výsledky pro vzorky testované v mrazáku při -20 °C a v šokové komoře -10 °C / 50 °C; 200 cyklů. Pro přehlednost je studenými barvami označen mrazák a teplými šoková komora:



Graf 4.5.4 Charakteristika před a po testování v mrazáku a šokové komoře (M – mrazák s konstantní teplotou -20 °C; Š – šoková komora s cyklickými změnami teploty v rozsahu -10 °C a 50 °C v počtu 200 cyklů)

4.6 Diskuze výsledků

Výstupem testování NTC termistorů je získání uceleného přehledu, které sady vzorků dokáží nejlépe odolat realizovaným klimatickým testům. Z měření je zřejmé, že lépe odolávají stárnutí termistory s laminovanou formou enkapsulace. To je pravděpodobně způsobeno tím, že zalaminované vzorky dokáží daleko lépe ochránit termosenzitivní vrstvu, než vzorky lakované. Přesto, že určitá část experimentálně připravených vzorků vykazovala nedokonalé zapouzdření (například laminace přesahovala až na elektrody nebo naopak nepokrývala celý povrch termosenzitivní vrstvy), prokázaly laminované vzorky podstatně lepší životnost. Řady TF1-1-L, TF1-2-L, TF2-L a TF3-L se ukázaly jako nejspolehlivější. Naproti tomu řady TF1-1-T, TF1-2-T se ukázaly jakožto téměř nepoužitelné, protože ve většině případů neprošly ani základním proměřením v olejové lázni.

Komerční testované termistory se chovaly dle teoretických předpokladů. Dva komerčně testované termistory neprošly přes testovaná kritéria. Jelikož jsou komerční termistory navrženy do těchto testovaných podmínek, je tento jev přisuzován špatnému kontaktování. Přesto, že před vložením do měřicí olejové lázně byly termistory proměřeny, mohlo zde dojít k částečnému uvolnění kontaktů a vzniku chyb, které se mohly projevit v samotném měření. Tato chyba se mohla projevit i v případě ostatních měřených termistorů. Ovšem toto kontaktování bylo díky použití miniaturních precizních krokosvorek podstatně jednodušší, takže zde je chybovost méně pravděpodobná. Nicméně tuto hypotézu potvrzuje měření TF3-L v šokové komoře. Zde nejprve vzorek č.2 neprošel kalibračním měřením v lázni, ale po vystavení klimatickým podmínkám prokazoval normální funkci. To může být způsobeno již zmíněnou občasnou špatnou laminací, kde laminace zasahuje do oblasti elektrod a komplikuje tak jejich připevnění.

Po srovnání $R(T)$ charakteristik měřených termistorů lze konstatovat, že zalaminované NTC termistory jsou schopné odolat testovaným klimatickým podmínkám. Jak je vidět v předchozích grafech, v případě některých termistorů zde ovšem dochází k posunu hodnot odporu a to zejména v oblasti pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro další měření termistorů se doporučuje použití fixního měřicího rozsahu multimetru, aby nedocházelo k ovlivnění měření velikostí měřicího proudu při přepínání mezi rozsahy.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo nejprve prostudování a shrnutí normovaného testování stability NTC termistorů. K tomu posloužily tuzemské i zahraniční normy, které přesně definují testovací postupy klimatických zkoušek. Díky informacím získaným z těchto norem byl vytvořen plán realizovatelných klimatických zkoušek, respektující dostupné laboratorní podmínky.

Hlavní částí práce byla praktická příprava laboratorního testování tištěných termistorů, která zahrnovala zejména návrh experimentálního plánu, přípravu měřicí kabeláže, úpravu vzorků tištěných termistorů a konstrukci testovacích boxů pro vytvoření definovaných úrovní relativní vlhkosti. Před zahájením měření bylo nutné vybrat komerčně vyráběné referenční NTC termistory, které se svými vlastnostmi budou blížit těm testovaným. Samotné testování termistorů bylo založeno na stárnutí vzorků v několika zvolených klimatických prostředích: v pecích při teplotách 40 °C a 50 °C a při RH 30%, 50% a 70%, v mrazáku při teplotě -20 °C a v šokové komoře při teplotách pohybujících se mezi -10 °C / 50 °C s použitím 200 cyklů.

Klíčovou úlohou praktické části práce pak bylo samotné zpracování a vyhodnocení velkého množství naměřených dat. Data byla pro přehlednost zpracována do grafů a na jejich základě bylo vyhodnoceno, zda vzorky vyhověly jednotlivým testům. Jako nejvíce vyhovující varianty tištěných termistorů se ukázaly vzorky s laminovanou vrstvou enkapsulace, které nejlépe splňují požadavky na klimatické zkoušky. Pro sady laminovaných vzorků, které nejlépe odolaly testům klimatických zkoušek, pak byly vyhodnoceny $R(T)$ charakteristiky z hlediska vlivu klimatických zkoušek na jejich průběh. Průběhy testovaných termistorů ukázaly, že testované tištěné NTC termistory se svými vlastnostmi blíží komerčním termistorům a mají potenciál pro další výzkum a odladění jejich materiálového složení a topologie pro konkrétní aplikační využití.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SANTA CLARA CONVENTION CENTER, Santa Clara. STFA 2001: proceedings of the 27th International Symposium for Testing and Failure Analysis. 2001.
- [2] H. U., Component Business Headquarters. Reliability of electronic components. <https://www.murata.com/products/emiconfun/special/2012/04/16/en-20120416-p1>. 2012.
- [3] NOVOTNÝ, R. Analýzy vad při zabezpečování spolehlivosti elektronických součástí. *Elektrorevue*. 2001.
- [4] FRADEN CORP.SAN DIEGOUSA. Optical Components of Sensors. In: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications [online]. nedatováno, s. 155–189. ISBN 978-3-319-19303-8. Získáno z: doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8_5
- [5] FRADEN J. Physical Principles of Sensing. In: Handbook of Modern Sensors. Springer, Cham. 2016, s. 69–154.
- [6] FRADEN, Jacob. Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications [online]. 2016. ISBN 9783319193038. Získáno z: doi:10.1007/978-3-319-19303-8
- [7] SAPOFF, M. Thermistor thermometers. In: The measurement, instrumentation and sensors handbook. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999, s. (pp. 3225–3241).
- [8] FRADEN J. A two-point calibration of negative temperature coefficient thermistors. In: Review of Scientific Instruments. 2000, s. 1901–1905.
- [9] STEINHART, J. S., & Hart. Calibration curves for thermistors. In: Deep Sea Research. 1968, s. 497.
- [10] MANGUM, B. W. Triple point of succinonitrile and its use in the calibration of thermistor thermometers. In: Review of Scientific Instruments. 1983, s. 1687.

- [11] SAPOFF, M. The exactness of Δt of resistance—temperature data. In: *Temperature Its measurement and control in science and industry*. College Park: MD: American Institute of Physics, 1982, s. 875.
- [12] MURATA, Tsuneo. Murata announces mass production of low profile flexible film temperature sensors ideal for wearable products [online]. 2014. Získáno z: https://www.murata.com/en-global/about/newsroom/news/product/thermistor/2014/1022?intcid5=com_XXX_XXX_cmn_hd_XXX
- [13] ŠULC, Michal. *Charakterizace tištěných flexibilních termistorů*. B.m., 2015. Západočeská univerzita v Plzni.
- [14] NEFF, Joel Emerson. *Investigation of the effects of process parameters on performance of gravure printed ito on flexible substrates*. B.m., 2009. b.n.
- [15] PETR, Kačírek. *Materiály pro rezistory integrované ve flexibilních propojovacích strukturách*. B.m., 2015. Západočeská univerzita v Plzni.
- [16] DZIEDZIC, Andrzej. *Carbon/polyesterimide thick-film resistive composites - Experimental characterization and theoretical analysis of physicochemical, electrical and stability properties*. 2007.

Seznam příloh

Příloha A

R/T Charakteristiky – FT-1-1-L – 40°C

R/T Charakteristiky – FT-1-1-L – 50°C

R/T Charakteristiky – FT-1-1-L – Šoková komora a mrazák

Příloha B

R/T Charakteristiky – FT-2-L – 40°C

R/T Charakteristiky – FT-2-L – 50°C

R/T Charakteristiky – FT-2-L – Šoková komora a mrazák

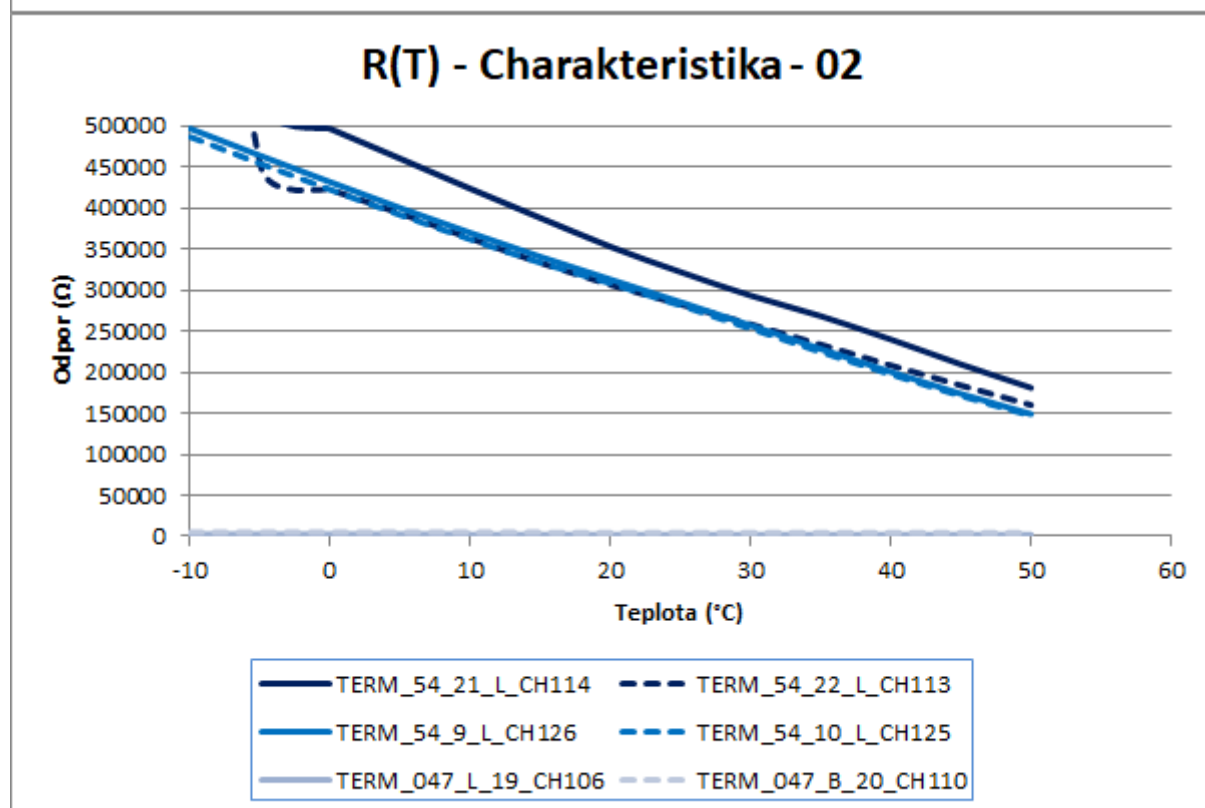
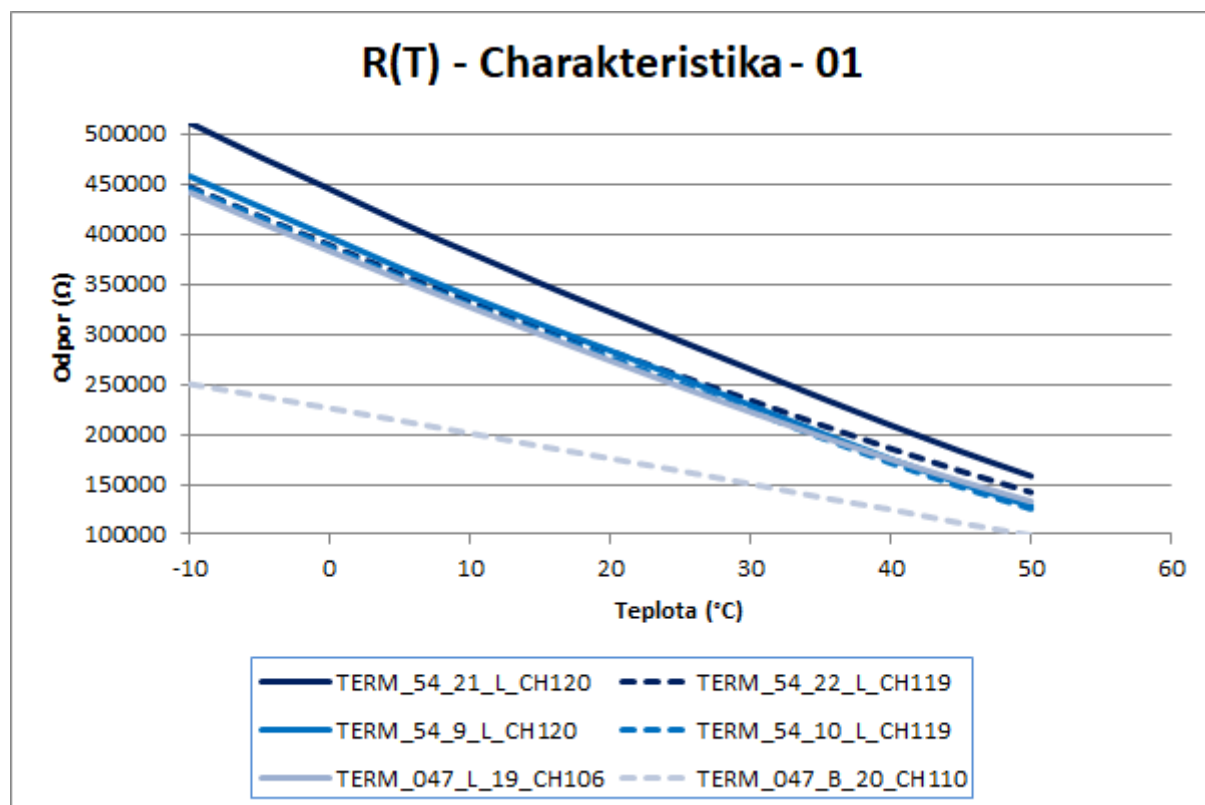
Příloha C

R/T Charakteristiky – FT-3-L – 40°C

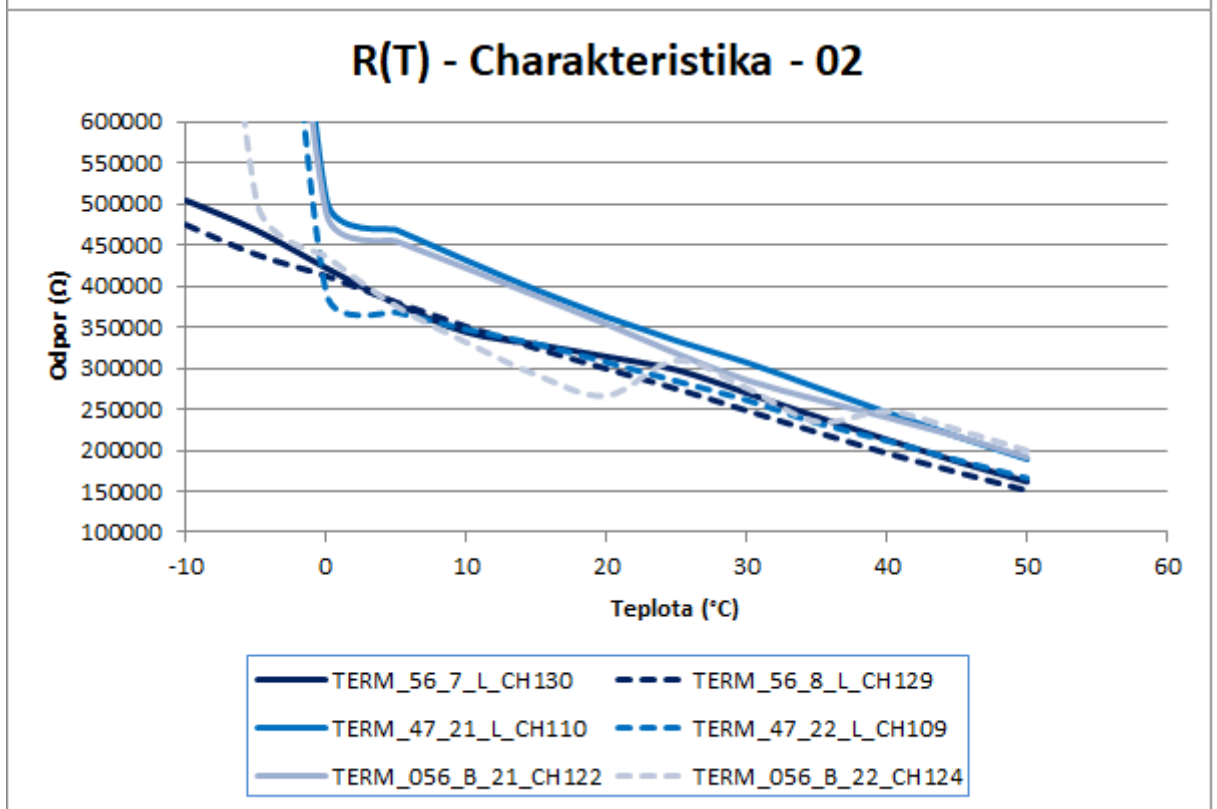
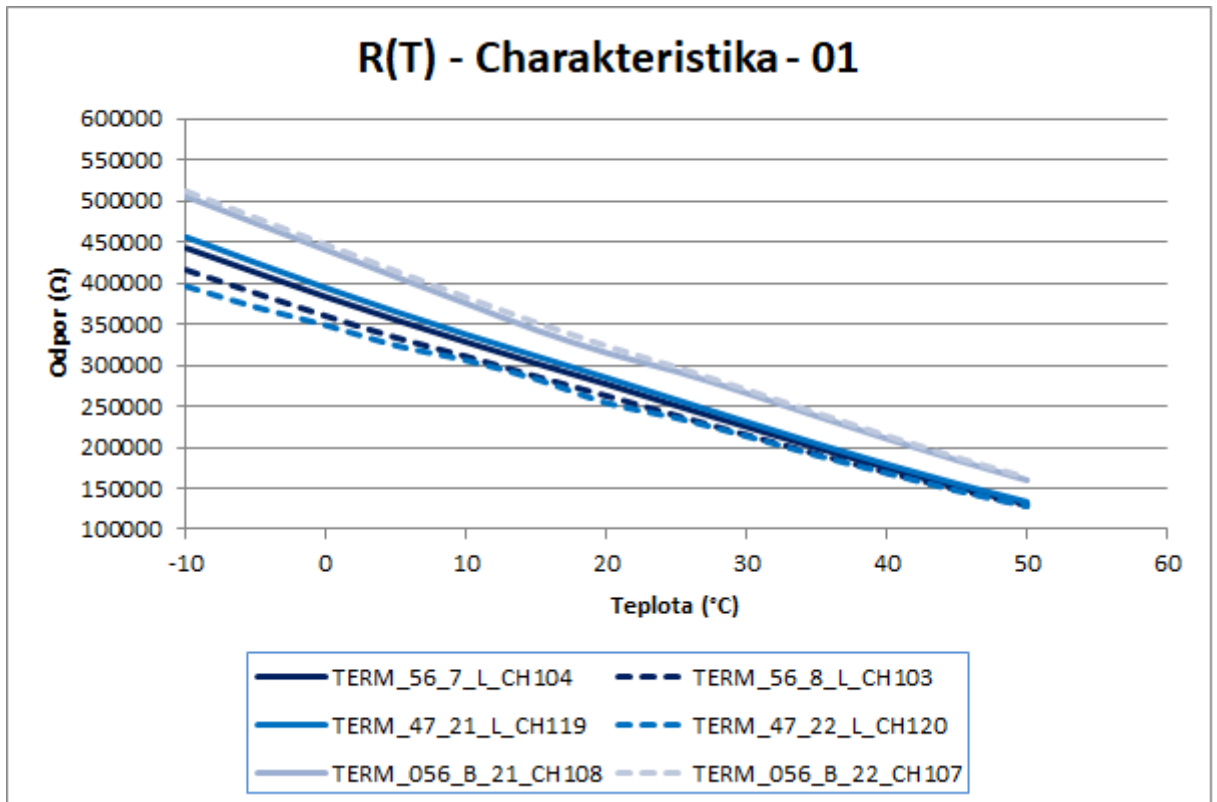
R/T Charakteristiky – FT-3-L – 50°C

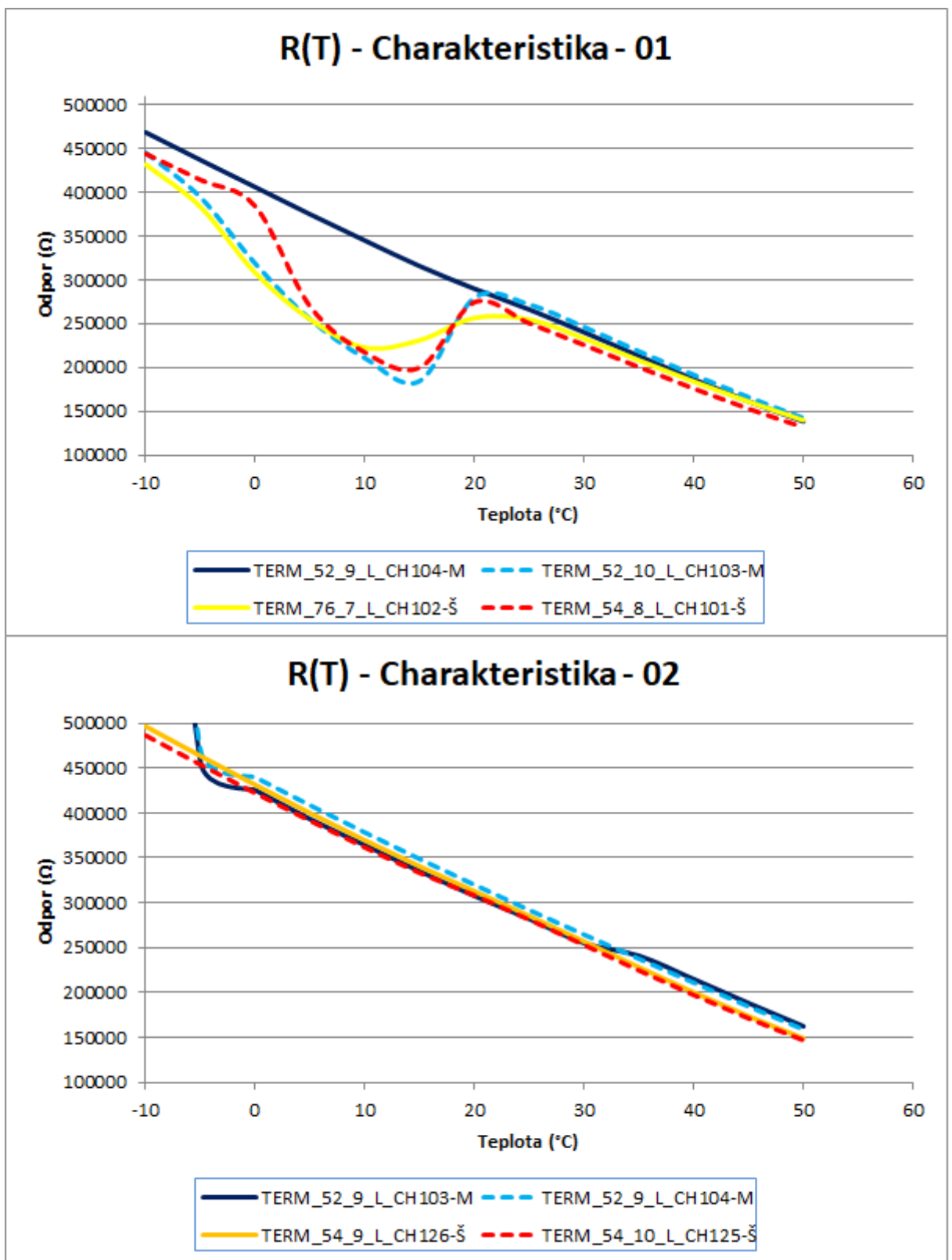
R/T Charakteristiky – FT-3-L – Šoková komora a mrazák

Příloha A - R/T Charakteristiky – FT-1-1-L – 40°C

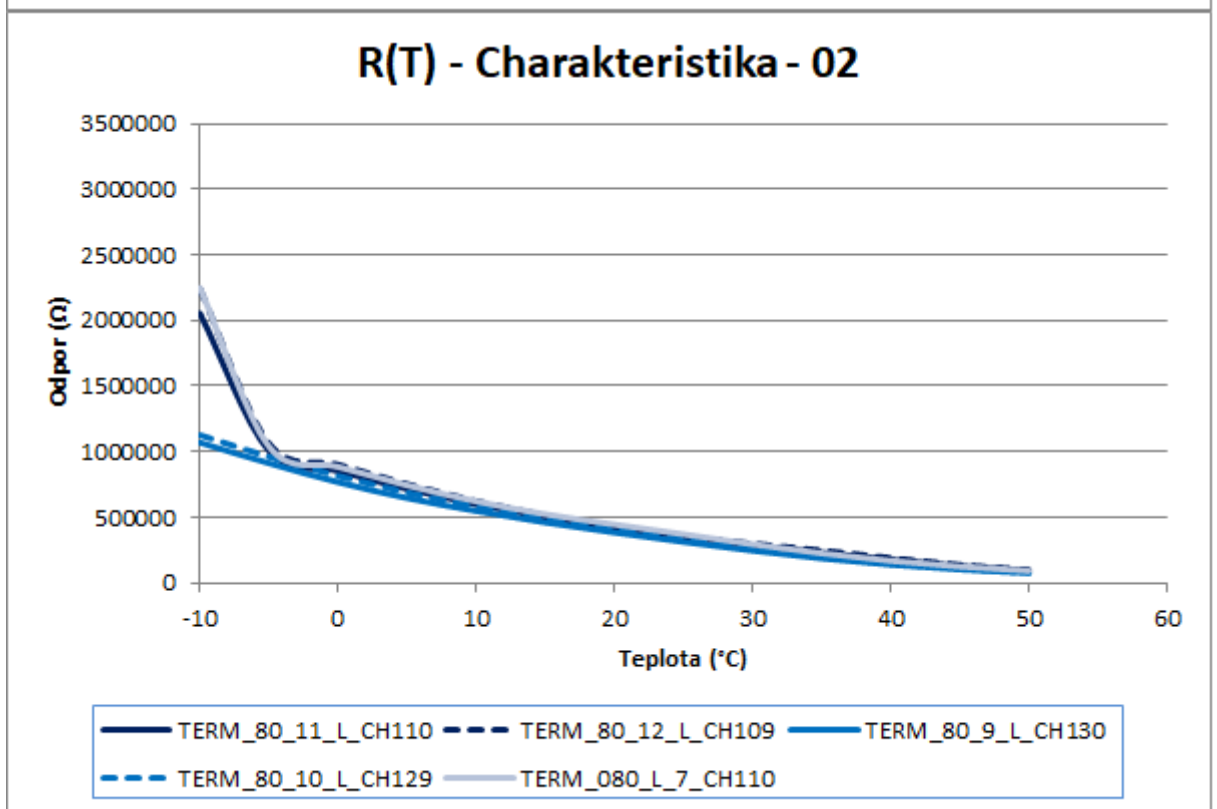
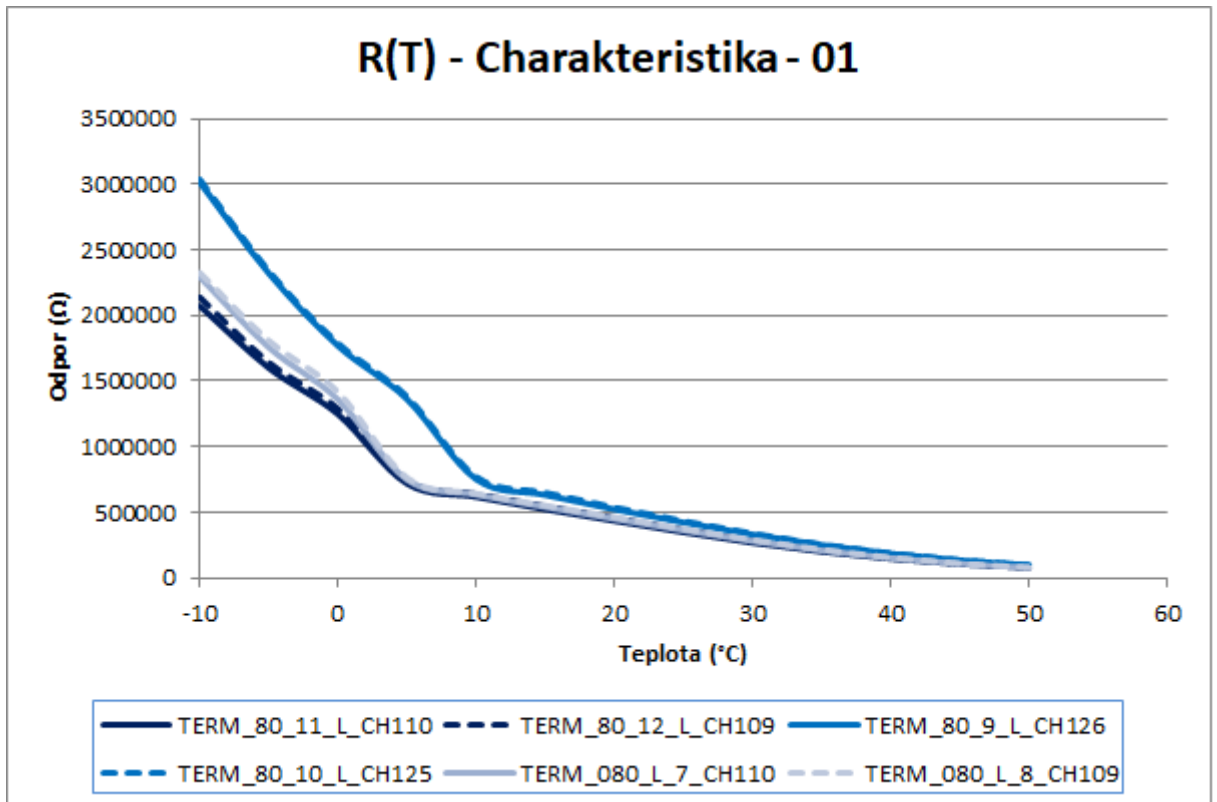


Příloha A - R/T Charakteristiky – FT-1-1-L – 50°C

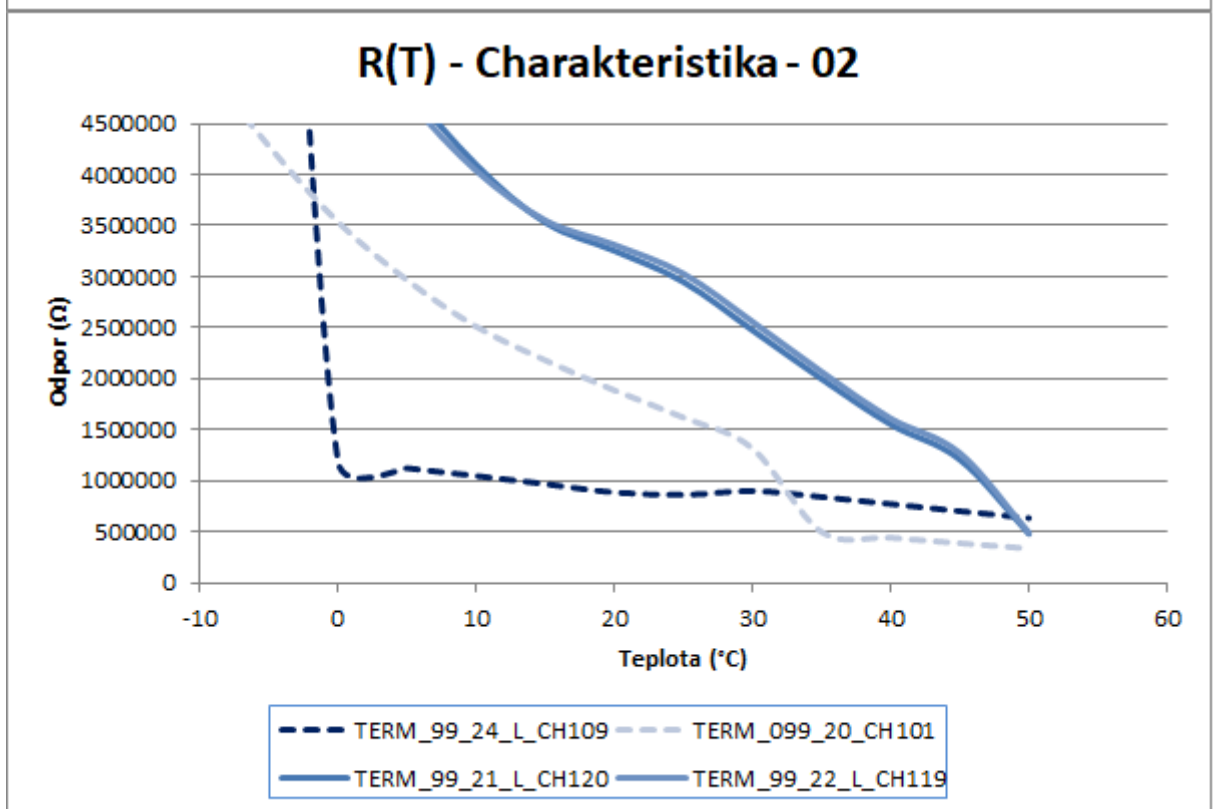
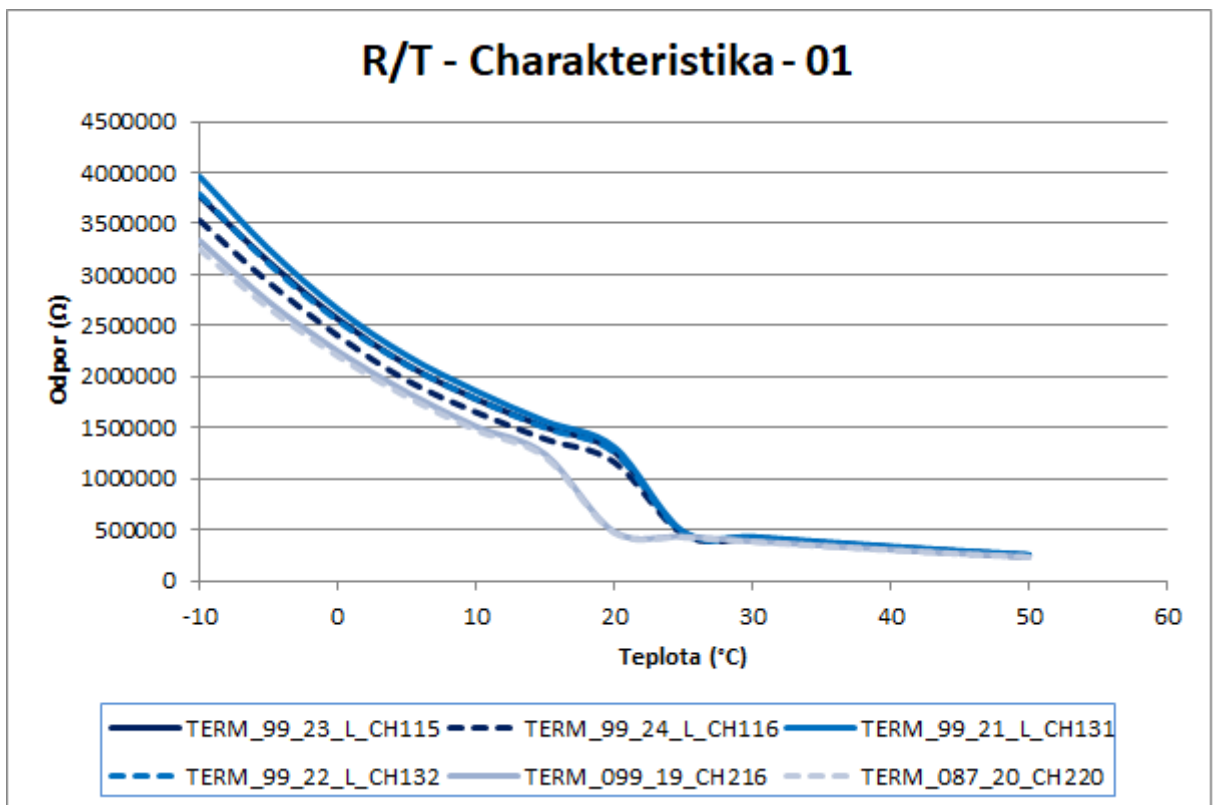




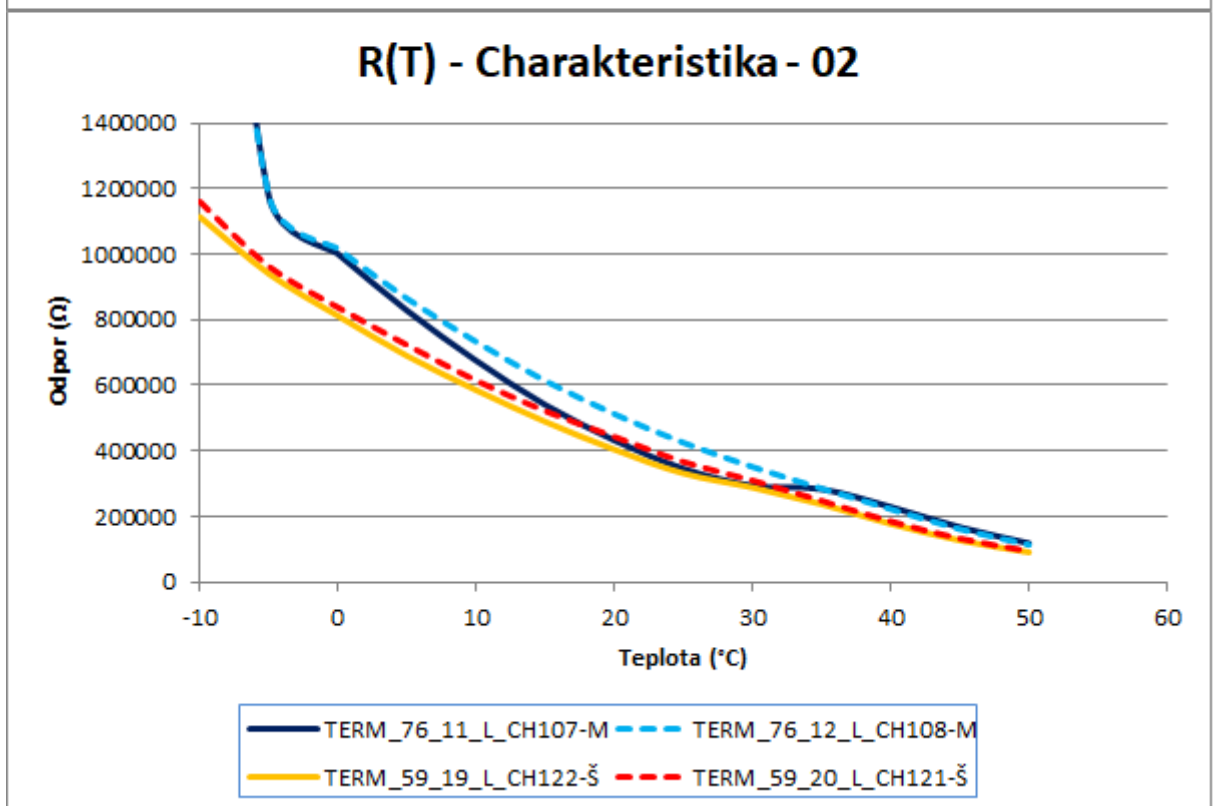
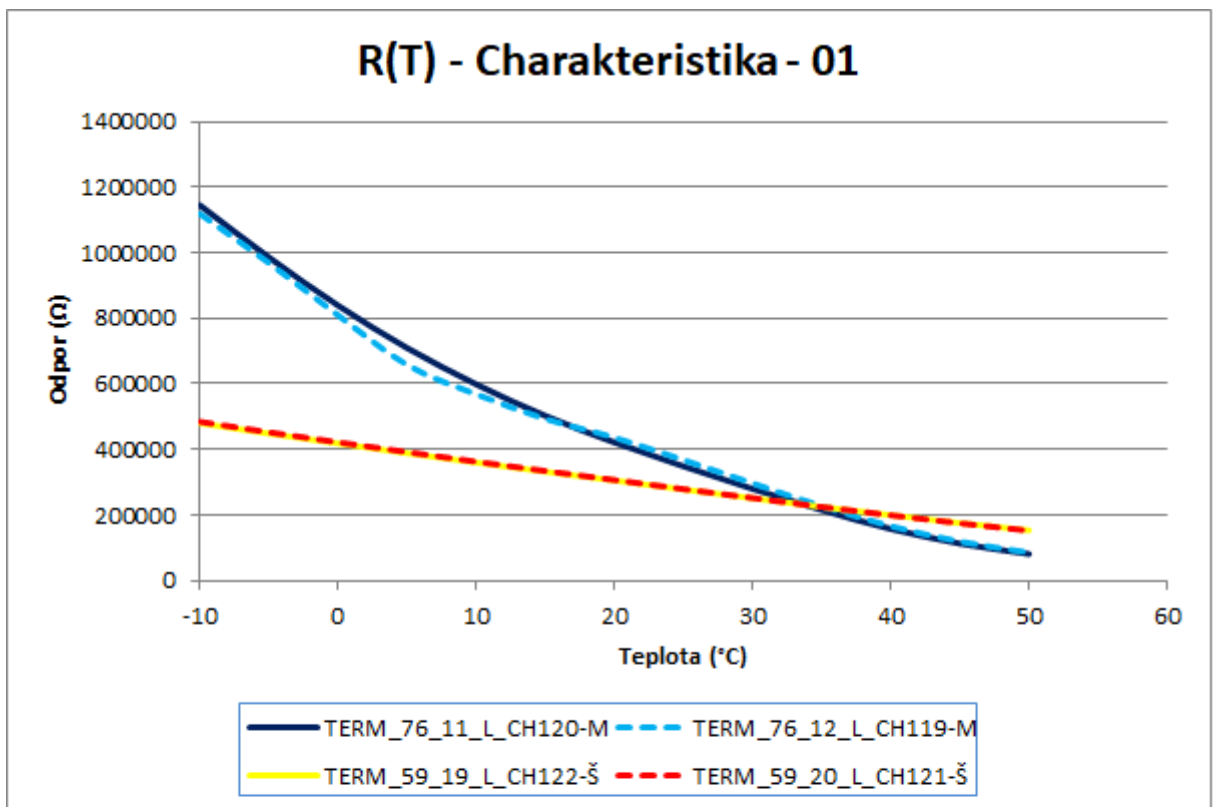
Příloha B - R/T Charakteristiky – FT-2-L – 40°C



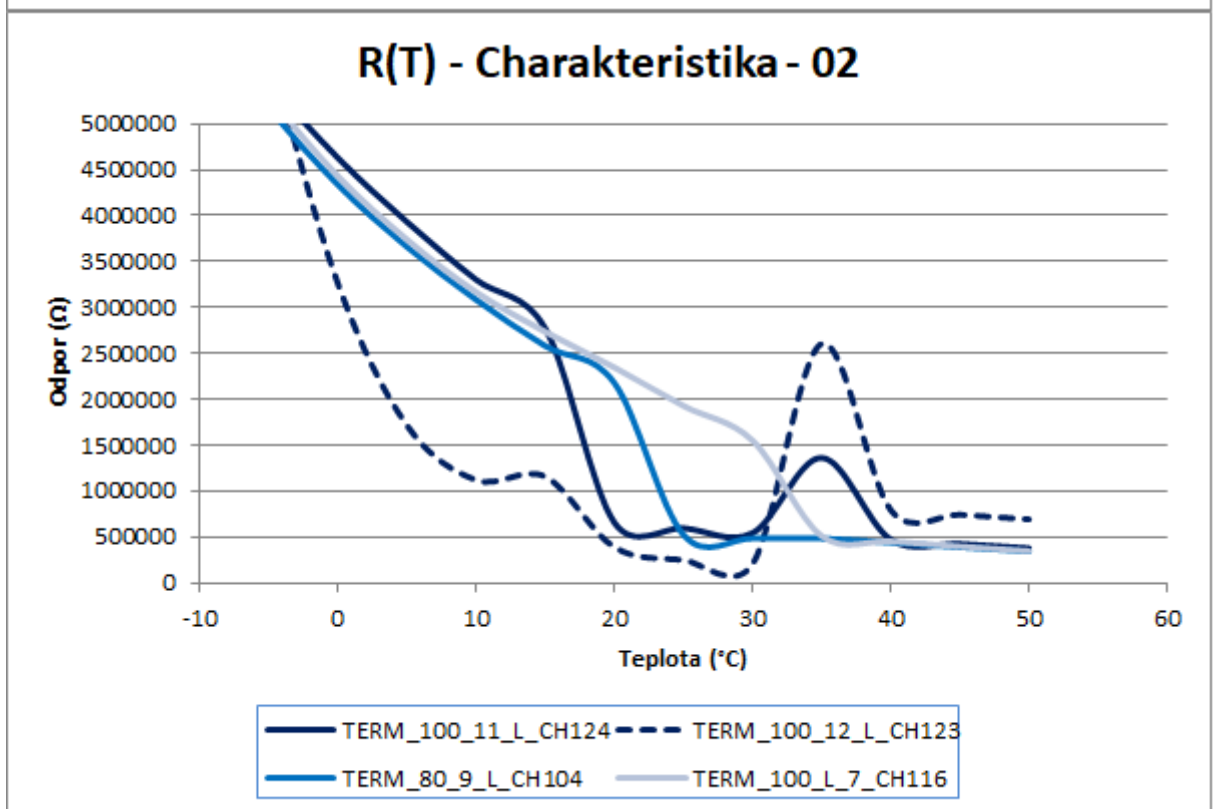
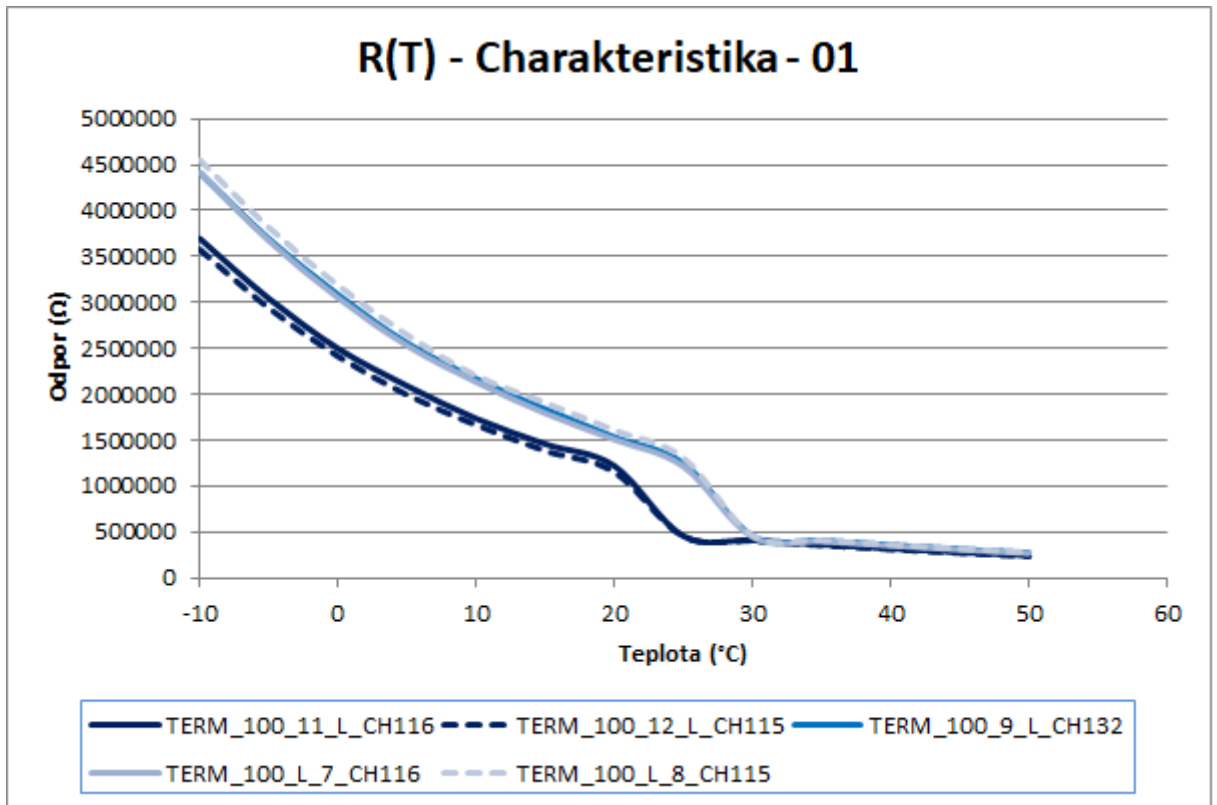
Příloha B - R/T Charakteristiky – FT-2-L – 50°C



Příloha B - R/T Charakteristiky – FT-2-L – Šoková komora a mrazák



Příloha C - R/T Charakteristiky – FT-3-L – 40°C



Příloha C - R/T Charakteristiky – FT-3-L – 50°C

