

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Testování dlouhodobé stability tištěných teplotních
senzorů**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na testování stability tištěných (flexibilních) NTC termistorů. Pojednává o základní charakteristice termistorů, dále pak popisuje normy, které jsou potřebné k dlouhodobému testování stability těchto specifických součástek. Cílem této práce bylo zhotovit měřicí sestavu na testování a následné praktické testování dostupných vzorků s různými druhy enkapsulace (termosenzitivní vrstvy) a jejich vyhodnocení.

Klíčová slova

NTC termistory, odpor, stabilita, polovodič, flexibilní elektronika, klimatické testování, tištěná elektronika, termosenzitivní elektronika

Abstract

This master thesis is focused on testing the stability of printed (flexible) NTC thermistors. It discusses the basic characteristics of thermistors, then describes the standards needed for long-term stability testing of these specific components. The aim of this work was to make a test set for testing and subsequent practical testing of available samples with different types of encapsulation (thermosensitive layers) and their evaluation.

Key words

NTC thermistors, resistance, stability, semiconductor, flexible electronics, climatic testing, printed electronics, thermosensitive electronics

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 30.5.2019

Tadeáš Pech

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Silvanu Pretlovi Ph.D za cenné rady, připomínky, profesionální přístup a systematické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Davidu Kalašovi za realizaci návrhu kontaktovacích desek plošných spojů a v neposlední řadě Ing. Josefovi Šlaufovi za tisk testovacích přípravků na 3D tiskárně a pomoc při CNC frézování.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 TERMISTORY	13
1.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI TERMISTORŮ.....	13
1.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY TERMISTORŮ.....	13
1.3 MATEMATICKÉ MODELY TERMISTORŮ.....	14
1.3.1 Jednoduchý model.....	15
1.3.2 Fradenův model.....	15
1.3.3 Steinhartův a Hartův model.....	16
1.4 MATERIÁLY NA VÝROBU TERMISTORŮ.....	16
1.4.1 Konvenční materiály.....	16
1.4.2 Flexibilní (organické) materiály.....	17
1.5 FLEXIBILNÍ TERMISTORY.....	17
1.6 POUŽITÍ TERMISTORŮ.....	18
2 STABILITA A SPOLEHLIVOST	19
2.1 MOŽNOSTI SELHÁNÍ ELEKTROTECHNICKÝCH SOUČÁSTEK.....	19
2.1.1 Oblast konstrukce.....	19
2.1.2 Oblast výroby.....	19
2.1.3 Oblast transportu a skladování.....	19
2.1.4 Oblast provozu a užití.....	19
2.2 ČETNOSTI PORUCH V PROVOZU.....	20
2.3 TESTOVÁNÍ STABILITY.....	20
3 NORMALIZOVANÉ TESTOVÁNÍ	22
3.1 NORMY ČSN EN 60068 A JEJÍ PODSKUPINY.....	23
3.1.1 Termíny a definice.....	24
3.1.2 Základní účinky jednotlivých parametrů prostředí.....	25
3.1.3 Expozice (zkoušky a měření).....	27
3.1.4 Normální klimatické podmínky pro měření a zkoušky.....	28
3.1.5 Kategorie klimatické odolnosti součástek.....	28
3.2 JEDNOTLIVÉ ZÁKLADNÍ ZKOUŠKY.....	30
3.2.1 ČSN EN 60068-2-1.....	30
3.2.2 ČSN EN 60068-2-2.....	31
3.3 NORMA ČSN EN 60539-1.....	32
3.3.1 Vyrvalost při teplotě horní meze.....	32
3.3.2 Vlhké teplo a ustálený stav.....	32
3.3.3 Suché teplo.....	33
4 NÁVRH TESTOVÁNÍ TERMISTORŮ	34
4.1 ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ FLEXIBILNÍCH NTC TERMISTORŮ PRO EXPERIMENTÁLNÍ TESTY.....	34
4.2 TESTOVACÍ PŘÍPRAVKY.....	36
4.3 ZHOVOVENÍ A TESTOVÁNÍ ENVIROBOXŮ.....	42
5 EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ TIŠTĚNÝCH NTC TERMISTORŮ	49
5.1 SELEKCE TERMISTORŮ Z CELÉ SADY DODANÝCH VZORKŮ.....	49
5.2 POČÁTEČNÍ MĚŘENÍ KALIBRAČNÍCH KŘIVEK V KLIMATICKÉ KOMOŘE.....	52
5.3 DLOUHODOBÉ STÁRNUTÍ TERMISTORŮ.....	55
5.4 KONEČNÉ MĚŘENÍ KALIBRAČNÍCH KŘIVEK V KLIMATICKÉ KOMOŘE.....	60
5.5 POROVNÁNÍ KALIBRAČNÍCH KŘIVEK.....	61

6	ZHODNOCENÍ TESTOVACÍHO A PRACOVNÍHO POSTUPU	66
6.1	ZHODNOCENÍ Z HLEDISKA TESTOVACÍHO POSTUPU	66
6.2	NÁVRH NA OPTIMALIZACI TESTOVACÍHO POSTUPU	66
6.3	ZHODNOCENÍ Z HLEDISKA PRACOVNÍHO POSTUPU.....	67
6.4	NÁVRH NA OPTIMALIZACI PRACOVNÍHO POSTUPU	68
	ZÁVĚR.....	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	72
	SEZNAM PŘÍLOH	74
	PŘÍLOHA A	75
	PŘÍLOHA B.....	79

Seznam symbolů a zkratk

α	teplotní konstanta (-)
β	materiálová konstanta teploty (-)
τ	teplotní časová konstanta
3D	trojdimenzionální, trojrozměrný
A	bezrozměrná konstanta (-)
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
Ag	stříbro
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj
CoO	oxid kobaltnatý
ČSN	Česká technická norma
DMM	digitální multimetr
DPS	deska plošných spojů
EN	Evropská norma
Fe ₂ O ₃	oxid železitý
FR4	tkanina ze skelných vláken nasycená epoxidovou pryskyřicí
CH	kanál
CH ₃ COOK	octan
GM	Grafisk Maskinfabrik
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
IDE	interdigitální elektroda
KCl	chlorid draselný
LED	světloemitující dioda
ln	přirozený logaritmus
M3	metrický závit matek a závitových tyčí
Mg(NO ₃) ₂	dusičnan hořečnatý
MnO	oxid manganatý
MS	Microsoft
NTC	negativní teplotní koeficient
P3HT	poly3-hexylthiofen
Pb	olovo
PC	počítač
PEDOT:PSS	organický materiál

PES	polyester
PTC.....	pozitivní teplotní koeficient
R	odpor (Ω)
RH.....	relativní vlhkost (%)
R(T)	křivka závislosti odporu na teplotě
SET	sada
SMD	součástka pro povrchovou montáž na desku plošného spoje
Sn.....	cín
T.....	teplota (K, °C)
TiO ₂	oxid titaničitý
THT	součástka s drátovými vývody
UV	ultrafialové záření

Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku testování stability tištěných NTC termistorů, které se poměrně rychle staly důležitými prvky v oblasti elektroniky. V posledních letech jsou tyto specifické elektronické součástky velice skloňovány a prošly obrovským vývojem vzhledem k jejich rozsáhlé použitelnosti a schopnosti měření teploty.

První kapitola je zaměřena na obecné popsání termistorů, které jsou charakterizovány uvedenými matematickými modely. Jsou zde popsány zástupci jednotlivých materiálů a stručný popis flexibilních termistorů a jejich použití.

Druhá kapitola obsahuje problematiku, která se zajímá stabilitou elektronických součástek. Jsou zde uvedeny oblasti, kdy a za jakých podmínek může dojít k selhání součástek. Graficky je tato část práce následně shrnuta vanovou křivkou.

Třetí kapitola uvádí normy, které jsou specializovány na testování vzorků environmentálními vlivy, podle kterých je možné termistory testovat. Jsou zde shrnuty principy zkoušek a kritéria testování. Na závěr je uvedena norma pro testování konvenčních NTC termistorů, kde jsou popsány jednotlivé testy a daná kritéria vztahovaná k vybraným testům. Uvedené normy byly vyselektovány ze souborů českých a evropských norem.

Čtvrtá kapitola popisuje experimentální vzorky flexibilních NTC termistorů poskytnutých k laboratorním testům. V dalších částech této kapitoly je sepsán detailní pracovní postup k sestavení měřicího systému určenému k laboratornímu testování vzhledem k dostupným prostředkům.

Pátá kapitola popisuje jednotlivé environmentální testy vzorků a implementaci výsledků. Z počátku je vysvětlena selekce flexibilních NTC termistorů zvolených pro testování. Ve zbylých podkapitolách jsou systematicky a detailně popsány provedené testy a zpracované výsledky, které jsou graficky vyhodnoceny.

Šestá kapitola zhodnocuje navržený postup. V první části je zaměřena na testovací postup z hlediska průkaznosti výsledků stability získaných v předchozí kapitole. Následující část se zabývá pracovním postupem při osazování a sestavování jednotlivých přípravků testovací sestavy. Závěrem této kapitoly jsou zmíněny návrhy

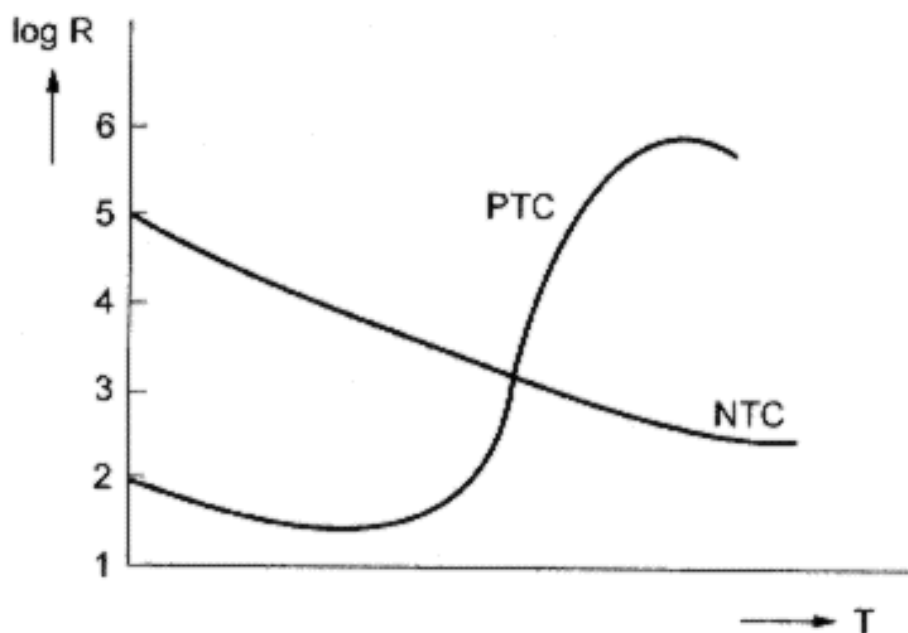
na možnou optimalizaci z obou hledisek.

1 Termistory

Problematika teplotních senzorů je v této diplomové práci představena jedním z nejdůležitějších zástupců, což jsou termistory. Slovo termistor je složeno ze dvou anglických slov Thermal Resistor (tepelný odpor). V této kapitole jsou popsány jednotlivé vlastnosti těchto specifických součástek, jejich rozdělení podle funkce a materiály, které jsou na jejich výrobu používány.

1.1 Základní vlastnosti termistorů

Termistory jsou elektronické součástky, jejichž odpor závisí na teplotě. Podle jejich vlastností a charakteristik se dělí do dvou základních skupin: PTC (pozitivní teplotní koeficient) a NTC (záporný teplotní koeficient). Většina termistorů se vyrábí v provedení NTC, což znamená, že jeho odpor se snižuje s rostoucí teplotou. Zjednodušený příklad charakteristik těchto druhů termistorů s viditelným rozdílem je na *Obr. 1.1*. [1]



Obr. 1.1 Příklad charakteristik PTC a NTC termistorů (změna odporu v závislosti na teplotě, převzato z [2])

1.2 Základní parametry termistorů

V následující části budou popsány jednotlivé důležité parametry termistorů, které výrobci uvádí v katalogových listech (datasheetech). [3]

- **Jmenovitý odpor**

Jmenovitý odpor je měřen při teplotě $25 \text{ °C} \pm 0,1 \text{ °C}$ za takových podmínek, že změna hodnoty odporu vlivem Jouleova tepla je s ohledem na chyby měření

zanedbatelná. [3]

- **Maximální zatížitelnost**

Maximální zatížitelnost je nejvyšší hodnota elektrického příkonu při teplotě prostředí 25°C a normálním atmosférickém tlaku vzduchu. [3]

- **Teplotní časová konstanta**

Teplotní časová konstanta je čas, za který se změní teplota termistoru vlivem výměny tepla s okolím o 63,2 %, když teplota prostředí byla skokově změněna (značení τ). [3]

- **Maximální provozní teplota**

Tato teplota značí maximální teplotu, při které může termistor pracovat s přijatelnou stabilitou parametrů. Maximální provozní teplota vzniká jako důsledek vnitřního a vnějšího ohřevu. [3]

- **Rozměry termistoru**

Uvedení rozměrů termistorů je velmi důležitá informace například vzhledem k umístění na desku plošných spojů (DPS).

1.3 Matematické modely termistorů

Podle matematických modelů termistorů je možné podrobněji zmapovat jejich chování, které je popsáno pomocí jednotlivých fyzikálních veličin a vzorců, podle nichž je možné lépe charakterizovat. Při používání termistoru v nějakém komplexním zařízení, musí být známa jeho teplotní závislost odporu. Tato charakteristika má pokaždé jiný tvar, je nelineární, záleží na použití daného termistoru. Samozřejmě je patrné, že ať už jde o jakýkoliv model, je to pouhá aproximace funkce, tudíž dochází k nepřesnostem. Jen při použití složitějších modelů dochází k větší přesnosti. Všechny modely vychází z vyjádření odporu pomocí logaritmu vzhledem k absolutní teplotě [4]:

$$\ln R_t = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3} \quad (1.1)$$

Tyto modely vycházející z dané rovnice prošly určitou evolucí a jsou popsány v následujících podkapitolách.

1.3.1 Jednoduchý model

Jednoduchý model je nejjednodušší aproximací funkce termistoru (rovnice 1.2). V poměrně úzkém teplotním rozmezí a s přihlédnutím ke ztrátě určité přesnosti můžeme eliminovat dva poslední členy v rovnici a zapsat ji ve tvaru [4]:

$$\ln R_t \cong A + \frac{\beta}{T} \quad (1.2)$$

kde A je bezrozměrná konstanta a β je další konstanta zvaná materiálová konstanta teploty (v Kelvinech). Pokud je odpor termistoru R_0 při teplotě kalibrační T_0 známý, pak je vztah odporu na teplotě vyjádřen jako [4]:

$$R_t = e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (1.3)$$

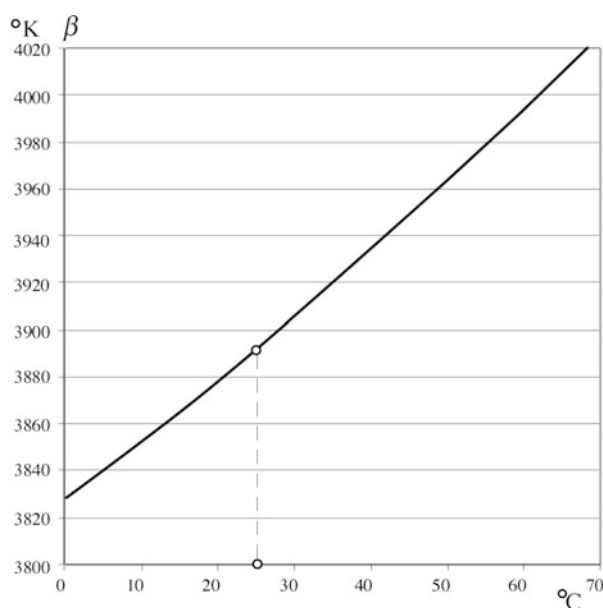
Rovnice (rovnice 1.3) je nejoblíbenější a nejpoužívanější. Lze také odvodit z rovnice Svante Arrhenius, která popisuje rychlost chemických reakcí jako funkci teploty. Zjevnou výhodou tohoto modelu je potřeba kalibrovat termistor pouze v jednom bodě (R_0 při T_0). To ovšem předpokládá, že hodnota β je již známá, pomocí toho lze poté vypočítat negativní teplotní koeficient α (rovnice 1.4) [4]:

$$\alpha_t = \frac{1}{R_t} * \frac{dR_t}{dT} = \frac{\beta}{T^2} \quad (1.4)$$

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. [4]

1.3.2 Fradenův model

V roce 1998 navrhl Jacob Fraden další zlepšení jednoduchého modelu. Je založen na experimentálním faktu, že v mnoha termistorech není charakteristická teplota β konstanta, ale spíše funkce teploty. V závislosti na výrobním procesu a druhu termistoru je možné, že bude mít funkce (křivka) buď pozitivní sklon (Obr. 1.2) nebo negativní. V ideálním případě by se teplota neměla měnit, ale je to jen zvláštní případ, který lze vidět pouze od nejlepších výrobců, kteří pečlivě kontrolují složení keramického materiálu. V takových případech poskytuje jednoduchý model zcela přesný základ pro výpočet teploty. Fradenův model je vhodný pro relativně levný snímač. [4]

Obr 1.2 Pozitivní sklon koeficientu β převzato z [4]

1.3.3 Steinhartův a Hartův model

V roce 1968 Steinhart a Hart navrhli model pro oceánografický rozsah od 3 °C do 30 °C. Později bylo zjištěno, že tento model může být určen pro daleko širší rozsah. Teplotu z uvedeného modelu lze vypočítat jako (rovnice 1.5) [5][6]:

$$T = [\alpha_0 + \alpha_1 \ln R_t + \alpha_2 (\ln R_t)^2 + \alpha_3 (\ln R_t)^3]^{-1} \quad (1.5)$$

Steinhart a Hart dále zjistili, že kvadratický člen je možné z rovnice vyjmout, tudíž výsledný tvar rovnice 1.6 je [5]:

$$T = [\alpha_0 + \alpha_1 \ln R_t + \alpha_3 (\ln R_t)^3]^{-1} \quad (1.6)$$

Správné použití této rovnice zaručuje přesnost pro teploty 0 °C až 70 °C.

1.4 Materiály na výrobu termistorů

Materiály na výrobu termistorů se dělí do dvou základních skupin – konvenční (anorganické) materiály a flexibilní (organické) materiály.

1.4.1 Konvenční materiály

Nejčastějšími konvenčními termistory jsou monokrystalické termistory, které jsou vyrobeny z křemíku. Mohou být i z Germania nebo India, ale prakticky se s nimi na trhu nesetkáme. Dále jsou na trhu polykrystalické termistory, které se vyrábí např. práškovou nebo tenkovrstvou technologií. Tyto termistory jsou většinou ze směsi oxidů kovů (např. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, $\text{MnO} + \text{CoO}$ apod.). [7]

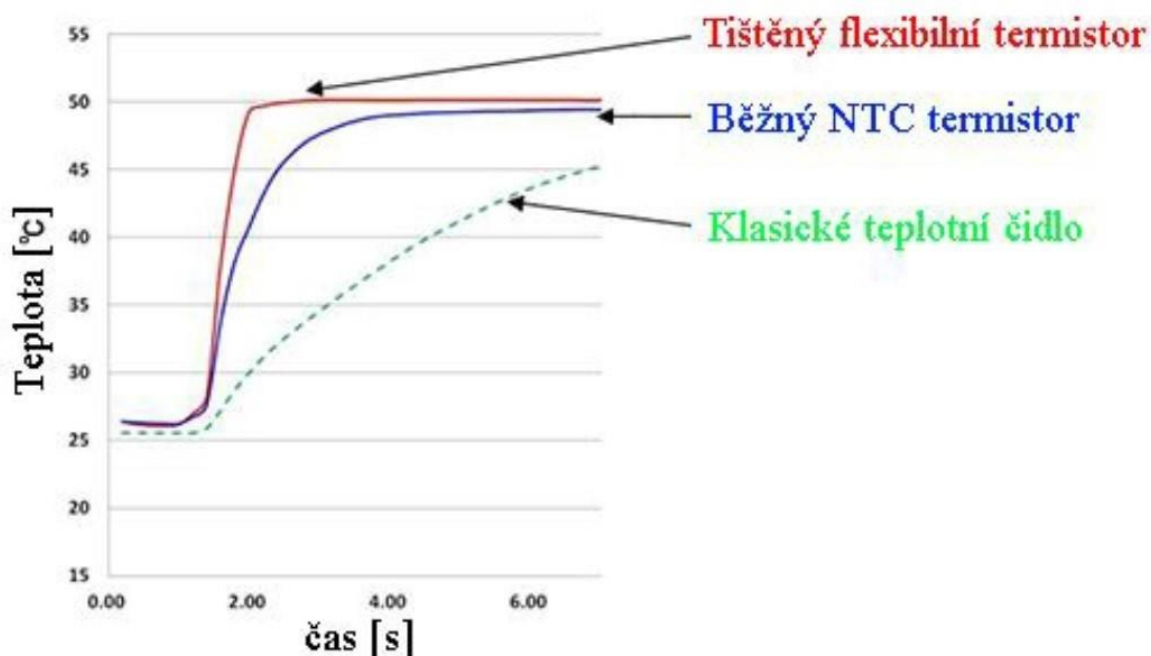
1.4.2 Flexibilní (organické) materiály

Organické polovodičové materiály jsou materiály na bázi uhlíku a dále se větví do dalších dvou podskupin – nízkomolekulární látky a konjugované polymery. Poprvé se s nimi začaly dělat experimenty a testy již v 50. letech minulého století od té doby jejich pokrok ve vědě a technologii zaznamenal enormní pokrok. Hlavními zástupci jsou PEDOT:PSS, P3HT apod. [7][8]

1.5 Flexibilní termistory

Tyto termistory byly vynalezeny z důvodu, že byl kladen důraz na miniaturizaci součástek, což tyto komponenty splňují. Průkopníkem v tomto odvětví je japonská společnost Murata Manufacturing, která přišla tištěným flexibilním termistorem, vyrobeným z malého úzkoprofilového, tenkého, flexibilního materiálu. [9]

Jednou ze základních výhod těchto termistorů, je jejich flexibilita. U těchto termistorů se používá tloušťka flexibilního tištěného obvodu přibližně 100 μm , proto mohou být snadno vloženy uvnitř složitě tvořeného zařízení s úzkým prostorem. Vzhledem k jejich nízké tepelné kapacitě, mají tyto termistory vynikající tepelnou odezvu (Obr 1.3). [10]



Obr 1.3 Srovnání jednotlivých druhů termistorů převzato z [10]

1.6 Použití termistorů

Tento specifický typ odporu se využívá nejčastěji u senzorů k regulaci chladu a tepla. Mohou dělat více než jednoduše regulovat teplotu. Používají se také k regulaci napětí, regulaci hlasitosti, časovým zpožděním a ochraně obvodu. [9]

Obecně se využívají v různých průmyslových odvětvích, kde by je možná někdo ani nečekal. Například v mikrovlnných troubách pro určení a udržování vnitřní teploty trouby. Bez těchto součástí by mohlo dojít k přehřátí a k potenciálním požárům. Potkáváme je v automobilovém průmyslu, používají se k určení teploty oleje a chladicích kapalin. Takto můžete zjistit, zda se auto přehřívá nebo ne. Termistory jsou připojeny k indikátorům na palubní desce vozidla. Slouží pouze jako informační prvek. Ten samý význam mají i v digitálních teploměrech. Jejich uplatnění je i při nabíjení baterií. Když spustíme nabíjení baterií, dochází k tomu, že se zařízení rychle zahřeje. Nízký odpor termistoru umožňuje zastavit nabíjení, pokud k tomuto jevu dojde. [9]

Flexibilní tištěné termistory mají velký potenciál pro využití díky své nízké hmotnosti, mechanické odolnosti, citlivosti a ohebnosti. Mezi některé z mnoha využití lze zařadit již zmíněný senzor tepla, který bývá umístěn v elektronických zařízeních, jako jsou například počítače, tablety nebo chytré telefony. Další využití flexibilního tištěného termistoru je například detekce povrchové teploty těla, kde by byl termistor obsažen v některém z mnoha nošených zařízení. [10]

2 Stabilita a spolehlivost

Stabilita elektronických součástek se dá z části popsat podle spolehlivosti. Pokud je součástka spolehlivá a její vlastnosti se díky určitým vlivům nemění, dá se říci, že je stabilní. Tato kapitola obsahuje detailnější popis stability při různých fázích životnosti dané součástky a vlivům (např. prostředí), kterým je vystavena. [11]

2.1 Možnosti selhání elektrotechnických součástek

Zde budou podrobněji přiblíženy základní 4 oblasti, při kterých dochází k selhání elektrotechnických součástek. Většina těchto selhání je částečně ovlivněna lidským faktorem.

2.1.1 Oblast konstrukce

Oblast konstrukce je doba před uvedením součástky do výroby. I v této době se dá ovšem pochybit. Jde zejména o konstrukční nedokonalosti, nevhodnost pro dané podmínky používání (včetně klimatických), dále je zde nevhodná volba materiálu či technologie, a v neposlední řadě také možné chyby v podkladech a technické dokumentaci. Chybám v této oblasti se nechá předejít důkladným kontrolováním dokumentů, nebo testováním prototypů. [11]

2.1.2 Oblast výroby

Termínem oblast výroby je myšlena doba, kdy se veškeré informace z konstrukce dostanou do hromadné výroby. Zde dochází například k nezvládnutí dané technologie, k neshodám a nedokonalostem ve výrobě (v tomto aspektu se může projevit okolní prostředí výrobní haly – osvětlení, teplota, vlhkost, prašnost, seřízení strojů), a dále může dojít k dodávce nekvalitního materiálu od dodavatele. [11]

2.1.3 Oblast transportu a skladování

Tato část přichází po výrobě komponentů, kdy se výrobky musí nějak převézt a uskladnit. V počátcích by mělo být určeno, jak by měl být výrobek převážen, a v jakých podmínkách skladován. Je to velice důležitý aspekt, jelikož při porušení může dojít až k fatálním ztrátám. [11]

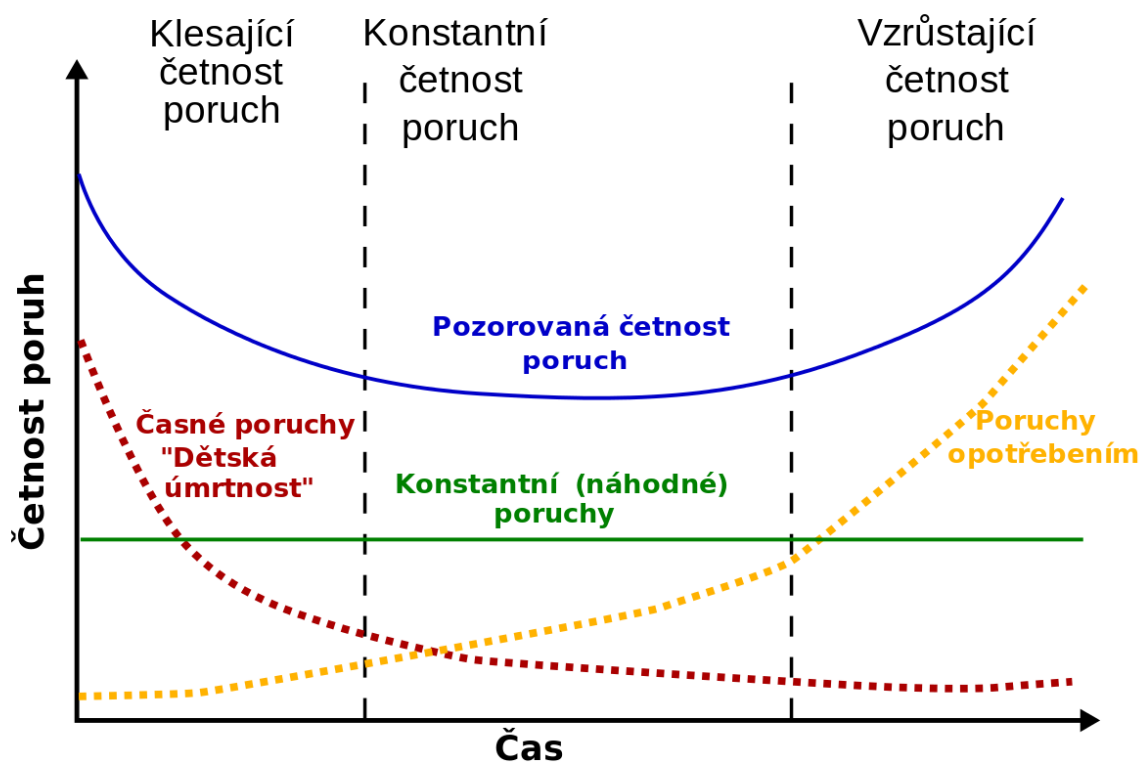
2.1.4 Oblast provozu a užití

Poslední oblastí je uvedení výrobku do provozu a jeho užívání, za předpokladu, že

v již dříve vyjmenovaných oblastech výrobek obstál. Zde může dojít nedodržení provozních a klimatických podmínek, k ignorování údržby či režimu provozu, a také se musí brát v potaz únava materiálu, stárnutí a opotřebení. [11]

2.2 Četnosti poruch v provozu

Četnost poruch v provozu se dá popsat pomocí tzv. vanové křivky (*Obr 2.1*), která zohledňuje poruchy při počátečním uvedení do provozu (klesající četnost poruch), poruchy opotřebením (vzrůstající četnost poruch), a náhodné poruchy (konstantní četnost poruch). Pozorovaná četnost poruch (vanová křivka) je součtem již výše jmenovaných poruch, přičemž pro provoz je nejlepší, když se výrobek dostane do fáze konstantní četnosti poruch, kdy by poruchovost měla být zdaleka nejmenší. [11]



Obr 2.1 Četnost poruch v provozu (vanová křivka) převzato z [12]

2.3 Testování stability

Při testování stability je součástka podrobena různým zátěžovým testům, kterým může být v realitě vystavena. Pomocí těchto testů se dají zjistit limity zkoušených zařízení a dá se konstatovat, zda-li bude daná součástka v určitém prostředí stabilní. Pokud se ukáže, že výrobek není stabilní, je nutné přespecifikovat prostředí, ve kterém může být

použit, po případě zvážit např. jinou technologii výroby na splnění daných parametrů.

Veškeré testy jsou určeny normami, ať už jde o klimatické nebo jiné vlivy prostředí. Většina testů spadá pod kmenovou normu ČSN EN 60068, která má pod sebou řadu norem, které problematiku těchto testů detailněji popisují (*kap. 3*).

K tomu, aby byl výrobek co nejvíce kvalitní (stabilní), je nutné sledovat výrobek ze všech úhlů pohledu. Tím se co nejvíce eliminují možné neúspěchy, dále je žádoucí uvážit správné manažerské rozhodování a marketingové techniky k úspěšnému uvedení výrobku na trh.

3 Normalizované testování

Normy a soubory norem, které souvisí s testováním NTC termistorů, určují a popisují postupy testování (například u vlivů prostředí), a dále také udávají limity, které se musejí splnit. V případě, kdy se udává specifikace výrobku (tzn. jsou dané nějaké požadavky, které musí splňovat), je nutné se těmito normami řídit. Soubor norem je určen převážně pro elektrická zařízení (součástky, PC boxy, monitory, DPS), ale může se jednat i o mechanická, nebo elektromechanická zařízení určená do průmyslu. V následující kapitole budou vyjmenovány (Tab. 3.1) a popsány některé normy (možné použít pro testování termistorů) a vysvětleny základní pojmy a označení v nich uvedené.

Tab. 3.1 Normy úzce spjaté s testováním el. součástek (termistorů)

Označení normy	Název normy
ČSN EN 60539-1	Přímo ohřívání termistorů se záporným teplotním součinitelem- Část 1: <i>Kmenová specifikace</i>
ČSN EN 60738-1	Termistorů - Přímo ohřívání s kladným teplotním součinitelem - Část 1: <i>Kmenová specifikace</i>
ČSN EN 62319-1	Polymerní termistorů - Přímo ohřívání s kladným teplotním součinitelem - Část 1: <i>Kmenová specifikace</i>
ČSN EN 60068-1	Zkoušení vlivů prostředí – Část 1: <i>Obecně a návod</i>
ČSN EN 60068-2-1	Zkoušení vlivů prostředí- Část 2-1: <i>Zkoušky – Zkouška A: Chlad</i>
ČSN EN 60068-2-2	Zkoušení vlivů prostředí- Část 2-2: <i>Zkoušky – Zkouška B: Suché teplo</i>
ČSN EN 60068-2-14	Zkoušení vlivů prostředí- Zkouška N: <i>Změna teploty</i>
ČSN EN 60068-2-27 ed. 2	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-27: <i>Zkoušky - Zkouška Da a návod: Rázy</i>
ČSN EN 60068-2-30 ed. 2	Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-30: <i>Zkoušky - Zkouška Db: Vlhké teplo cyklické (cyklus 12 h + 12 h)</i>
ČSN EN 60068-2-38	Zkoušení vlivů prostředí- Část 2-38: <i>Zkoušky – Zkouška Z/AD Složená cyklická zkouška teplotou a vlhkost</i>
ČSN EN 60068-2-40	Zkoušení vlivů prostředí- Část 2: <i>Zkoušky – Zkouška Z/AM: Kombinované zkoušky chladem a nízkým tlakem vzduchu</i>

ČSN EN 60068-2-38	Zkoušení vlivů prostředí- Část 2-38: Zkoušky – Zkouška Z/AD Složená cyklická zkouška teplotou a vlhkost
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 60068-3-5	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 Normy ČSN EN 60068 a její podskupiny

Tento soubor norem obsahuje základní informace, kde jsou vysvětleny jednotlivé zkoušky vlivů prostředí, včetně jejich postupů a limitů.

Skládá se ze třech hlavních částí:

- ČSN EN 60068-1 – *Obecně a návod*, kde jsou uvedeny obecné záležitosti
- ČSN EN 60068-2 – *Zkoušky*, kde jsou osvětleny různé zkoušky pro daná prostředí
- ČSN EN 60068-3 – *Doprovodná dokumentace a návod*, tato část obsahuje jednotlivé informace a postupy pro skupiny zkoušek

Dělení zkoušek v ČSN EN 60068-2 je obsaženo v následující *tabulce*.

Tab. 3.2 Dělení zkoušek ČSN EN 60068-2

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: (Na Doplnky) - dříve "hořlavost"

E: Nárazy (například rázy)	Q: Hermetičnost
F: Vibrace	R: Voda
G: Stálé zrychlení	S: Záření
H: (Na Doplnky) - dřívě "skladování"	T: Pájitelnost
J: Plísně	U: Pevnost vývodů součástí
K: Korozní prostředí	V: (Na Doplnky) - dřívě "akustický šum"

Pozn.: Dále se ještě uvádí *W* a *Y*, které jsou Na Doplnky, *Z* se používá u kombinovaných zkoušek.

3.1.1 Termíny a definice

V této podkapitole budou stručně definovány základní termíny uvedené v normě ČSN EN 60068.

- **Zkouška** – Sada úkonů, které jsou požadovány, většinou: aklimatizace před zkouškou, počáteční vyšetření a měření, expozice, aklimatizace po zkoušce, konečně vyšetření a konečná měření.
- **Aklimatizování před zkouškou** – Zacházení se vzorkem před expozicí s cílem odstranit, nebo snížit vlivy, kterým byl vystaven v minulosti.
- **Expozice** – Vzorek je vystaven vlivům prostředí podle specifikace a zkoumá se jeho chování.
- **Aklimatizace po zkoušce** – Zacházení se vzorkem po expozici s cílem dosažení vlastností vzorku před zkouškou.
- **Podmínky volné výměny vzduchu** – Oblast, kde jsou podmínky ovlivněny pouze vzorkem uvolňujícím teplo.
- **Příslušná specifikace** – Zkoušky a požadavky, které musí daný vzorek splnit.
- **Teplota okolí u vzorků uvolňujících teplo** – Teplota okolo vzorku ve vzdálenosti, kde je ovlivňování teploty vzorkem zanedbatelné.

- **Teplota okolí u vzorků neuvolňujících teplo** – Teplota okolo vzorku.
- **Teplota povrchu** – Teplota naměřená na jednom nebo více bodech na povrchu vzorku.
- **Komora** – Prostor nebo místnost, která je uzavřená a vytváří se v ní specifické podmínky.
- **Pracovní prostor** – Část komory, kde se drží určité podmínky s určitou tolerancí (dáno normou).
- **Kombinovaná zkouška** - Zkouška, při níž je vzorek vystaven více vlivům prostředí najednou (dvě a více zkoušek).
- **Složená zkouška** – Soubor zkoušek, kdy se na vzorku testují různé vlivy prostředí, zkoušky jsou po sobě jdoucí. Mezi zkouškami není žádný časový interval, tudíž nedochází k aklimatizaci vzorku.
- **Řada zkoušek** – Soubor zkoušek, kterým je vzorek vystaven. Tyto zkoušky mají různé vlivy prostředí a jsou po sobě jdoucí (dvě a více zkoušek). Mezi zkouškami jsou intervaly, kdy se vzorek aklimatizuje před i po expozici.

3.1.2 Základní účinky jednotlivých parametrů prostředí

V této podkapitole jsou uvedeny jednotlivé parametry prostředí, základní účinky prostředí na součástku a vyvozené poruchy.

- **Vysoká teplota** – Dochází k tepelnému stárnutí, oxidaci, praskání, chemickým reakcím, měknutí, tavení, sublimaci, snížení viskozity, odpařování a rozpínání. To způsobuje poruchy izolace, mechanické poruchy, zvýšené mechanické namáhání a opotřebení pohyblivých částí v důsledku rozpínání nebo ztráty mazacích vlastností.
- **Nízká teplota** – Nízká teplota způsobuje křehnutí, tvoření námraz, zvýšení viskozity a tuhnutí, ztrátu mechanické pevnosti a fyzické smrštění. To zapříčiňuje poruchy izolace, praskání, mechanické poruchy, zvýšené opotřebení pohyblivých

částí v důsledku smrštění nebo ztráty mazacích vlastností, poruchu těsnění a poruchu těsnících kroužků.

- **Vysoká relativní vlhkost** – Účinky vysoké relativní vlhkosti jsou absorpce a adsorpce vlhkosti, bobtnání, ztráty mechanické pevnosti, chemické reakce, koroze a elektrolýzy a zvýšení vodivosti izolantů. To způsobuje fyzikální průrazy, poruchy izolace a mechanické poruchy.
- **Nízká relativní vlhkost** – Nízká relativní vlhkost působí na výrobek tak, že vysychá, křehne, ztrácí mechanickou pevnost, smršťuje se a zvyšuje se otěr mezi pohyblivými kontakty. Z toho vyplývají poruchy, které jsou mechanické, a také dochází k praskání.
- **Vysoký tlak** – Má za příčinu stlačení a deformaci, to způsobuje mechanické poruchy a poruchy těsnění.
- **Nízký tlak** – Nízký tlak rozpíná, snižuje elektrickou pevnost vzduchu, vytváří koronu a ozon a zhoršuje chlazení. To způsobuje poruchy typu přeskočení, přehřátí, netěsnosti (poruchy těsnění) a mechanické poruchy.
- **Sluneční záření** – Tvoří chemické, fotochemické a fyzikální reakce, znehodnocuje povrch, tvoří křehnutí materiálu, blednutí barev, zahřívání, selektivní zahřívání a mechanická namáhání. Poruchy jsou podobné jako u vysokých teplot.
- **Prach a písek** – V tomto prostředí se produkt vystavuje otěrům a erozím, zadřením, ucpáním, snížením tepelné vodivosti a zvýšením odporu kontaktů. To má za důsledek zvýšené opotřebení a vyšší náchylnost k mechanickým a elektrickým poruchám.
- **Korozní prostředí** – Při vystavení vzorku koroznímu prostředí dochází k chemickým reakcím, korozi, elektrolýze, poškozením povrchu, zvýšení vodivosti a zvýšení odporu kontaktů. To má za následek mechanické a elektrické poruchy a zvýšené opotřebení.

- **Vítr** – Vítr působí silou, dochází k únavě materiálu, usazování a ucpání materiálu, erozím a vyvolaným vibracím. Díky tomu je možnost zřícení základní konstrukce, vyskytují se i mechanické poruchy a poruchy uvedené u korozního prostředí a u prostředí s prachem a pískem.
- **Děšť** – Účinky deště jsou absorpce vody, teplotní rázy, eroze a koroze. V tomto důsledku jsou možné zaznamenat elektrické poruchy, praskání, netěsnosti a poškození povrchu.
- **Kroupy** – Kroupy mechanicky deformují výrobek, dochází k teplotním rázům a erozím. To dává za důsledek, že se může zřítit základní konstrukce a poškodit povrch.
- **Sníh a led** – Způsobuje absorpci vody, teplotní rázy a mechanická zatížení. Tyto účinky jsou neblahé pro základní konstrukci.
- **Rychlá změna teploty** – Při rychlých změnách teploty dochází k teplotním rázům a selektivnímu zahřívání, což je viditelné na praskání, poškození těsnění a mechanických poruchách.
- **Ozón** – Při vystavení ozónu může produkt rychle zoxidovat, křehnout a snižuje se elektrická pevnost vzduchu. Kvůli tomu může dojít k elektrickým a mechanickým poruchám, vzniku vlasových trhlinek a praskání.
- **Stálé zrychlení, vibrace, ráz či opakovaný ráz** – Zde dochází k rezonancím, únavám materiálu a mechanickým namáháním. To způsobuje mechanické poruchy, zvýšené opotřebení pohyblivých částí a zřícení základní konstrukce.

3.1.3 Expozice (zkoušky a měření)

Při návrhu se součástka navrhuje tak, že není známo, v jakém prostředí bude svoji funkci provádět. Také může dojít k situaci, kdy několik výrobců navrhne součástku se zdánlivě stejnými parametry, ale tyto komponenty byly vyrobeny za odlišných podmínek, tudíž může docházet k odlišným chováním při uvedení do provozu. V dnešní době je

ovšem možné objednat vzorky a ozkoušet je, ale jejich cena bývá poněkud vyšší a na dané komponenty se poměrně dlouho čeká. Ovšem stává se, že vzorky pro zkoušení jsou vzhledem k jejich ceně špatně dostupné a jejich výroba je buď drahá, nebo konstrukčně náročná. Tudíž je důležitá posloupnost testů, které jsou provedeny, jelikož může dojít k destrukci součástky, což je nepříliš žádoucí. Je tedy nutné tyto testy poskládat tak, aby testy, kde je možná destrukce součástky, byly až na posledních místech.

Testuje se většinou dvojím způsobem, kdy se uvádí provozní (operating) a skladovací podmínky (non-operating nebo storage). Dále musí být uvedena ochrana vzorku, zda-li musí být zapouzdrěný apod. Poté dochází ke zkouškám, kterých jsou čtyři typy (vysvětleno v *kap 3.1.1*):

- a) **Jednoduchá zkouška**
- b) **Kombinovaná zkouška**
- c) **Složená zkouška**
- d) **Řada zkoušek**

3.1.4 Normální klimatické podmínky pro měření a zkoušky

Normální klimatické podmínky jsou takové, kdy při vystavení vzorku daným podmínkám nedojde ke znatelnému ovlivnění vlastností. Pokud měřené parametry závisí na teplotě nebo tlaku a tato závislost je známa, měří se jejich hodnoty za specifikovaných podmínek (*Tab. 3.3*) 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.

Tab. 3.3 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		

3.1.5 Kategorie klimatické odolnosti součástek

Jak bylo již uvedeno, existuje velké množství zkoušek, tudíž i velké množství kombinací při testování různých druhů prostředí. V praxi se zavedly kategorie, kde jsou určeny některé kombinace zkoušek i s hodnotami, takže pokud je vzorek zařazen do nějaké

skupiny, je jasné, jakým environmentálním zkouškám byl nebo bude podroben včetně teplot potažmo dob vystavení.

Dané kategorie jsou tři a obsahují tři stěžejní hodnoty, které jsou odděleny lomítky. První hodnota je pro zkoušku chladem, kde se udává dvojčíslí nejnižší teploty, které byl vzorek vystaven a odolal. Při této zkoušce se většinou očekávají záporné hodnoty, ale pokud by došlo k tomu, že daná teplota je kladná, je nutné před něj dát znaménko „+“. Druhé číslo je trojmístné a dává informaci o tom, jaké nejvyšší teplotě byl vzorek vystaven při zkoušce suchým teplem a obstál. Poslední dvojčíslí udává počet dní, kdy byl environmentálně testován vlhkým konstantním teplem.

V případě nižších hodnot se před čísla dávají nuly, aby byla dodržena daná topologie. Splňuje-li vzorek daná kritéria, je možné jej zařadit do zmiňovaných kategorií klimatické odolnosti součástek (Tab 3.4).

Tab. 3.4 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

3.2 Jednotlivé základní zkoušky

V následující kapitole jsou popsány některé jednotlivé klimatické zkoušky, které jsou obsaženy v hlavní normě ČSN EN 60068-1.

3.2.1 ČSN EN 60068-2-1

- **Stupně přísnosti** - jsou vyjádřeny teplotou a dobou trvání. Tyto stupně jsou uvedeny z hodnot v *tabulce 3.5*, nebo jsou odvozeny z prostředí, do kterého je vzorek určen, anebo jsou odvozeny z jiných známých zdrojů příslušných dat (např. IEC 60721).

Tab. 3.5 Stupně přísnosti ČSN EN 60068-2-1

Teplota		Doba trvání
-65 °C	-25 °C	2 h
-55 °C	-20 °C	16 h
-50 °C	-10 °C	72 h
-40 °C	-5 °C	96 h
-33 °C	5 °C	

- **Průběh měření**

Vzorek je vložen do komory s teplotou shodnou, jako je teplota laboratoře. Dále se nastavuje teplota tak, aby odpovídala stupni přísnosti, který je uveden v příslušné specifikaci. Po dosažení teplotní rovnováhy je vzorek vystaven dané podmínkám po určitý čas. Pokud se jedná o komponent, u kterého se požaduje provozní stav, je nutné připojit napětí a provede se zkouška funkce.

- **Informace uváděné v příslušné specifikaci** - Pokud je do příslušné specifikace přidána zkouška A: Chlad, je nutné zobrazit následující informace:
 - Typ zkoušky
 - Počáteční aklimatizace
 - Počáteční měření
 - Podrobnosti o upevnění a podpěrách
 - Stav vzorku včetně chladicího systému během expozice
 - Stupeň přísnosti a doba trvání expozice
 - Rychlost změny teploty
 - Měření a/nebo zatížení během expozice
 - Aklimatizování po zkoušce, není-li toto aklimatizování standartní

- j) Konečná (výsledná) měření
- k) Odchyly od postupu
- l) Teplotní rozdíl

3.2.2 ČSN EN 60068-2-2

- **Stupně přísnosti** - jsou vyjádřeny teplotou a dobou trvání. Tyto stupně jsou uvedeny z hodnot v *tabulce 3.6*, nebo jsou odvozeny z prostředí, do kterého je vzorek určen, anebo bývají odvozeny z jiných známých zdrojů příslušných dat (např. IEC 60721).

Tab 3.6 Stupně přísnosti ČSN EN 60068-2-2

Teplota		Doba trvání
1000 °C	100 °C	2 h
800 °C	85 °C	16 h
630 °C	70 °C	72 h
500 °C	65 °C	96 h
400 °C	60 °C	168 h
315 °C	55 °C	240 h
250 °C	50 °C	336 h
200 °C	45 °C	1000 h
175 °C	40 °C	
155 °C	35 °C	
125 °C	30 °C	

- **Průběh měření**

Stejný průběh viz *kap 3.2.1 odst. Průběh měření*

- **Informace uváděné v příslušné specifikaci** - Pokud je do příslušné specifikace přidána zkouška B: Suché teplo, je nutné zobrazit následující informace:
 - a) Typ zkoušky
 - b) Počáteční aklimatizace
 - c) Počáteční měření
 - d) Podrobnosti o upevnění a podpěrách
 - e) Stav vzorku včetně chladicího systému během expozice
 - f) Stupeň přísnosti a doba trvání expozice
 - g) Rychlost změny teploty
 - h) Měření a/nebo zatížení během expozice
 - i) Aklimatizování po zkoušce, není-li toto aklimatizování standartní
 - j) Konečná (výsledná) měření

- k) Odchyly od postupu (mezi zákazníkem a dodavatelem)
- l) Teplotní rozdíl

3.3 Norma ČSN EN 60539-1

Tato norma se zabývá testováním NTC termistorů, kde jde hlavně o jednotlivé důležité parametry, které jsou uvedené v *Kap. 1.3* a dále se uvádí v datasheetech. Vychází z norem uvedených v *Tab. 3.1* a je s nimi provázaná. Příslušná norma stanovuje normalizované podmínky, kontrolní postupy a metody zkoušení pro použití v určitých sekcích a specifikacích elektronických součástí pro hodnocení kvality nebo pro jakýkoli jiný účel.

Pro testování, které se týká této diplomové práce, byly vybrány části normy, kde jsou zmíněna klimatická prostředí a jejich zákonitosti.

3.3.1 Vytrvalost při teplotě horní meze

Termistory musí být umístěny v komoře tak, aby jejich teplota zůstala v mezích stanovených limitů. Komora musí splňovat požadavky stanovené pro zkoušku EN 60068-2-2. Vzorky se umístí do zkušební komory a vystaví se teplotě horní kategorie + -2 ° C po dobu 42 d (1000 h).

Po 168 hodinách a 500 hodinách se termistory vyjmou z komory a nechají se regenerovat za standardních atmosférických podmínek zkoušení po dobu jedné až dvou hodin. Příslušné parametry uvedené v podrobných specifikacích se poté měří podle uvedené metody. Změna oproti hodnotám nesmí překročit mez stanovenou v příslušné specifikaci.

Po průběžných měřeních se termistory vrátí do zkušebních podmínek. Interval mezi vyjmutím a návratem do zkušebních podmínek jakéhokoliv termistoru nesmí překročit 12 hodin.

Po 1000 h \pm 48 h se termistory vyjmou a nechají se ve standardních atmosférických podmínkách po dobu hodiny až dvou hodin. Termistory musí být po testech vizuálně zkontrolovány. Nesmí být viditelně poškozené a označení musí být čitelné.

3.3.2 Vlhké teplo a ustálený stav

Neizolované termistory se podrobí zkoušce podle EN 60068-2-78 s použitím závažnosti odpovídající klimatické kategorii termistoru, jak je uvedeno v podrobném popisu.

Pro izolované typy se použije stejný postup a měl by být použit pro specifikaci

zkušebního napětí v podrobných specifikacích, která je založena na zvážení jeho praktického použití.

Na konci měření se termistory vyjmou z komory a poté se podrobí regeneraci podle EN 60068-1.

3.3.3 Suché teplo

Termistory určené k měření musí být podrobeny postupu podle normy EN 60068-2-2 s použitím teploty horní meze, jak je podrobně specifikováno. Teplota horní meze musí být zvolena z tabulky a doba trvání zkoušky musí být zvolena ve jmenovitých hodnotách: 2h, 16h, 72h, 96h, 168h, 250h, 500h a 1000h.

Vzorek může být vložen do zkušební komory v jakékoliv teplotě mezi teplotou místnosti a teplotou spodní meze určené ve specifikaci.

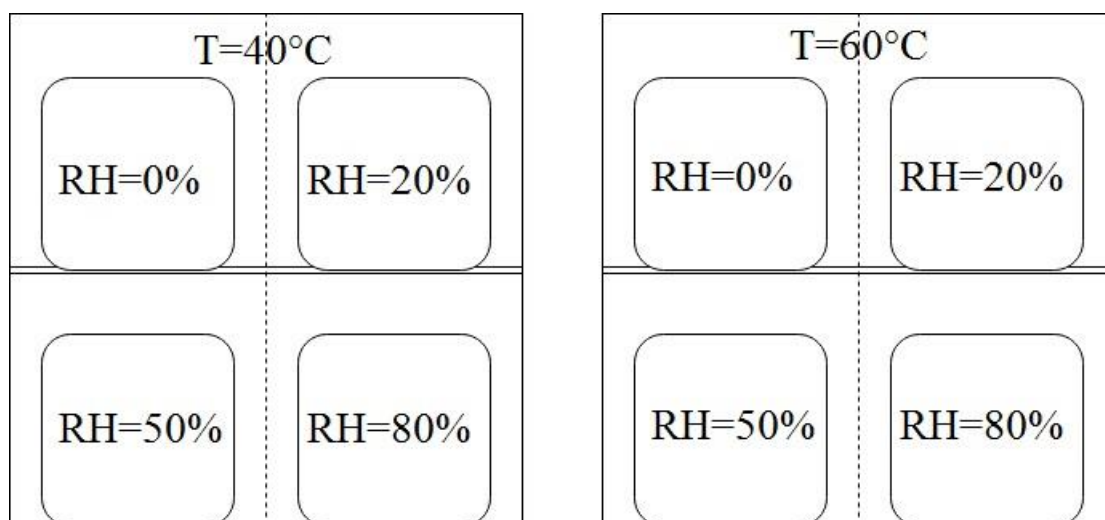
4 Návrh testování termistorů

V následující kapitole je popsána praktická část diplomové práce, kde bylo za úkol navrhnout a sestavit aparát na testování termistorů. Pro níže uvedené experimentální laboratorní měření byly dodány vzorky NTC termistorů. Dále se navrhly i testy, které byly zvoleny k prokázání stability vzorků.

Celkový plán testování zahrnoval tři fáze:

- 1) Měření výchozích teplotních kalibračních křivek $R(T)$ všech termistorů v rozsahu 0 - 60 °C.
- 2) Dlouhodobé stárnutí v definovaných klimatických podmínkách po dobu 500 h.
- 3) Měření teplotních kalibračních křivek $R(T)$ všech termistorů v rozsahu 0 - 60 °C po dlouhodobém stárnutí

Pro dlouhodobé testování bylo stanoveno celkem 8 variant klimatických podmínek zahrnujících dvě úrovně teploty v kombinaci se čtyřmi hodnotami relativní vlhkosti po dobu 500 hodin dle normy ČSN EN 60539 popsané v kapitole 3.3. Přehled zvolených kombinací klimatických podmínek testovacích prostředí je možné vidět na obr. 4.1.



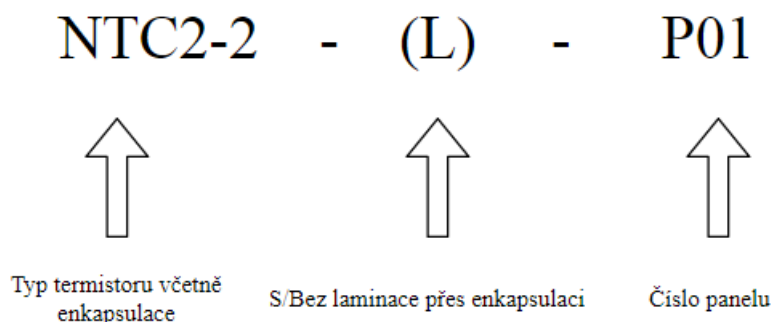
Obr.4.1 Přehled zvolených kombinací klimatických podmínek testovacích prostředí

4.1 Zpracování vzorků flexibilních NTC termistorů pro experimentální testy

Tištěné NTC termistory byly připraveny Doc. Syrovým na pracovišti katedry polygrafie a fotofyziky na Univerzitě Pardubice. Senzory byly realizovány technikou sítotisk za použití sítotiskových šablon na bázi PES sítovin. Tisk probíhal na R2R sítotiskovém stroji GM SC330 v režimu tisku z role na roli. Jako tiskový substrát by použit Melinex ST506 o tloušťce 125 μm . Jako první vrstva byla tištěna sítotisková značka na

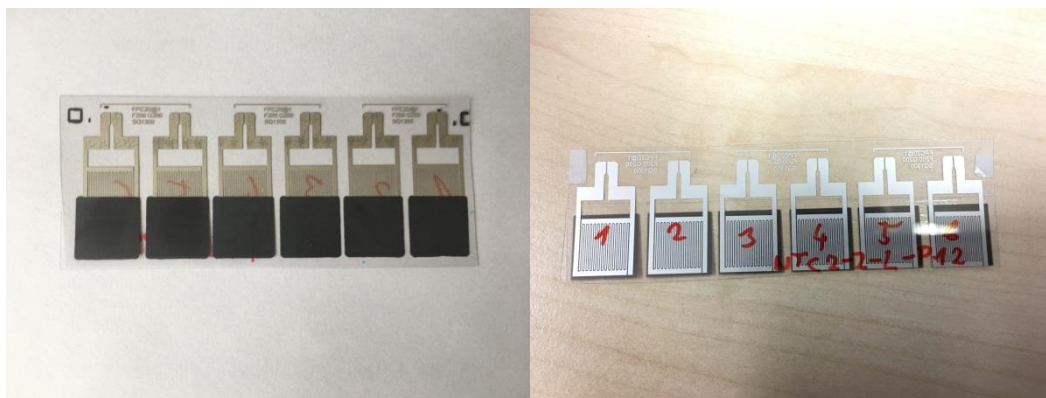
bázi UV zářením tvrditelného dielektrika modré barvy, na kterou byly následně poziciovány další tištěné vrstvy. Následně byl tištěn IDE systém za použití tiskové formulace na bázi stříbrných mikrovločkových částic. Stříbrná IDE struktura byla v dalším průchodu přetištěna sítotiskovou formulací obsahující aktivní materiál s NTC charakteristikou. K tisku byly použity tři tiskové formulace: NTC1, NTC 2-1 (šarže 2019_04_04_1) a NTC 2-2 (šarže 2019_04_08_1), které se lišily pojivovým a rozpouštědlovým systémem. Tisk všech vrstev byl realizován při tiskové rychlosti 1,2 m/minutu a horkovzdušné sušení probíhalo při 120 °C (Ag), resp. 100 °C (NTC vrstvy). UV zářením tvrditelná vrstva dielektrika byla vytvořena UV LED zdrojem s vlnovou délkou 395 nm. Vybraná část termistorů byla enkapsulována na rolovém laminátoru Easymount 1400H v režimu studené laminace.

Tyto vzorky dorazily vytištěné na velkých fóliích. Jednotlivé panely byly nastříhány, popsány kvůli snadnému rozklíčování dle příkladu (*Obr.4.2*).



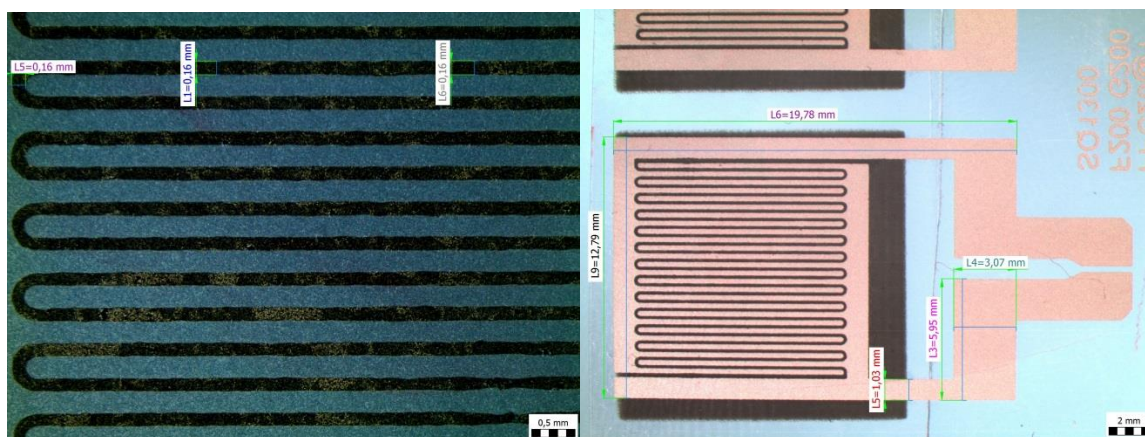
Obr.4.2 Příklad značení termistorů

Jeden panel odpovídá šesti termistorům. Tyto panely byly značeny od spodní strany fólie vzestupně. Pro formulaci NTC1 bylo poskytnuto 25 panelů, NTC2-1 30 panelů, NTC2-2 13 panelů, NTC1-L 17 panelů, NTC2-1-L 17 panelů a pro formulaci NTC 2-2-L taktéž 17 panelů. Všechny tyto panely byly ještě rozklíčovány na jednotlivé senzory čísly 1-6 ve směru zleva doprava. Poté všechny panely prošly optickou inspekcí. Některé panely musely být vyřazeny jelikož termosenzitivní vrstva zcela nepřekrývala IDE. Na *Obr.4.3* je vidět rozdíl mezi dobře vytisknutým (*vpravo*) a špatně vytisknutým (*vlevo*) panelem. Na tomto obrázku je také vidět příklad rozklíčování.



Obr.4.3 Optická inspekce a klíčování termistorů. Vlevo zobrazen defektní panel s výraznou chybou sesazení tiskových vrstev.

Dále byl náhodně vybrán panel NTC2-2-L-P13, konkrétně termistor č. 3 pro detailnější inspekci. Mikroskopem s dvojnásobným zvětšením byl v několika místech zakótován kanál mezi elektrodami (Obr.4.4 vlevo) a poté také celkové rozměry termistoru a rozměry tištěných kontaktovacích plošek (Obr.4.4 vpravo). Dle návrhu měla být délka izolační mezery i šířka elektrody jednotný rozměr $200\mu\text{m}$. Což zcela neodpovídá znázorněné inspekci.



Obr.4.4 Inspekce a zakótování termistoru pod mikroskopem

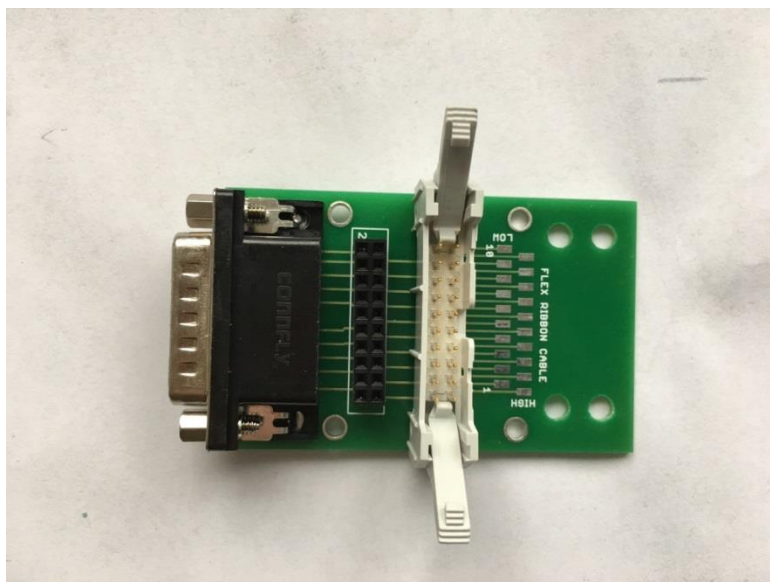
4.2 Testovací přípravky

Následující testovací přípravky byly dimenzovány tak, aby bylo možno měřit 320 vzorků termistorů najednou.

Měřicí systém pro měření termistorů byl koncipován tak, že panely s termistory byly nakontaktovány pomocí tzv. kontaktujících modulů osazených pogopiny. Pro dosažení kontaktu mezi kontaktujícími ploškami termistoru a pogopiny byly na 3D tiskárně vytisknuty přítlačné přípravky. Kontaktující desky byly následně zapojeny master deskami (velké DPS). Tyto desky byly během testů uvnitř boxů s určitými klimatickými podmínkami (dále envirobox), detailněji popsány v *kap. 4.3*. Master desky byly propojeny

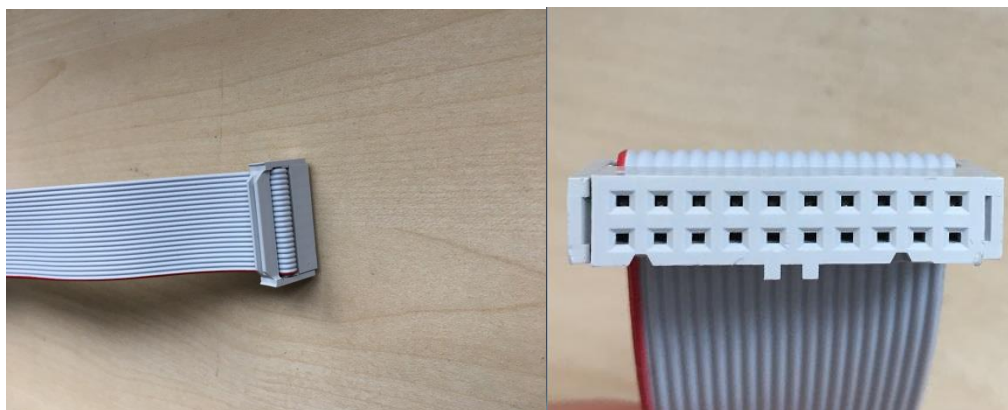
pomocí plochých kabelů s konektorovými deskami (malé DPS). Konektorové desky byly následně pomocí D-Sub konektorů připojeny na multiplexové karty, které jsou součástí digitálního měřicího přístroje. Detailní pracovní postup je popsán v této podkapitole.

Nejprve bylo osazeno šedesáti čtyř konektorových desek plošných spojů THT konektory (*Obr.4.5*). Tyto konektory byly pájeny pomocí klasické olovnaté pájecí slitiny (Sn 60 % Pb 40 %). D-Sub konektory (CONNFLY DS1038-26MBNSIA74) slouží pro propojení sestavy s měřicím přístrojem Keithley 2701, konkrétně pomocí multiplexových karet taktéž od společnosti Keithley řady 7708, které jsou zapojeny v měřicím přístroji. Druhý konektor (CONNFLY DS1023-2*10S21) slouží pro propojení velkých (master) desek pomocí dutinek. A třetí konektor (AMPHENOL 71918-120LF) se zámkem je určen pro propojení master desek s těmito DPS.



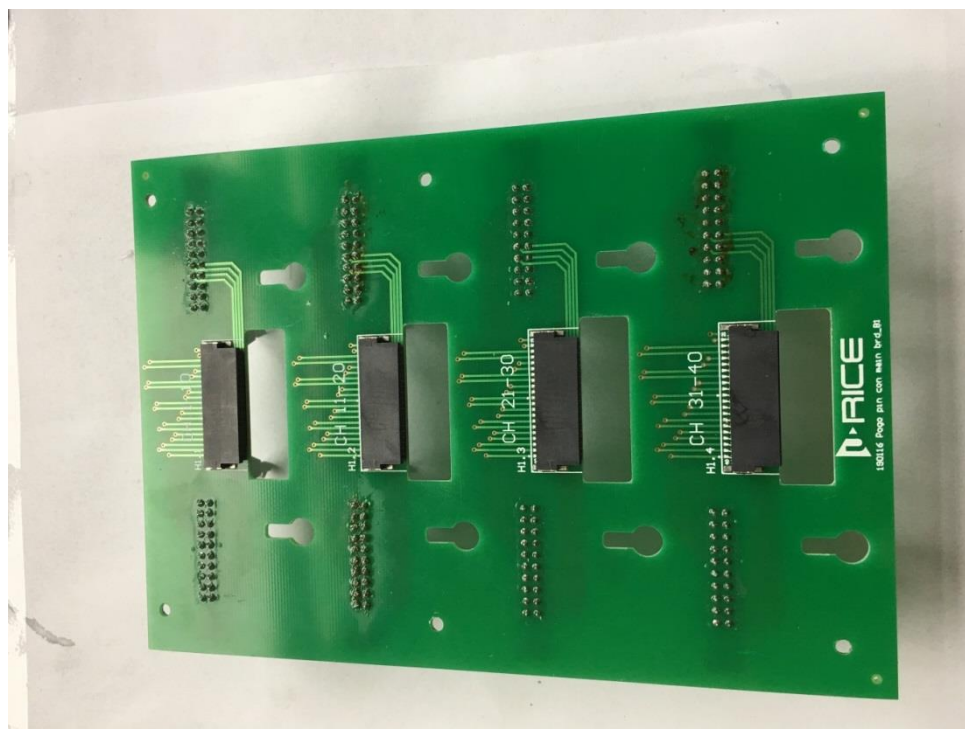
Obr.4.5 Konektorové DPS sloužící pro propojení mezi master deskami a měřicím přístrojem

Následně bylo nutné připravit kabeláž pro propojení master desek a malých konektorových desek. To bylo realizováno pomocí plochého kabelu, který byl nejdříve našťipán na 1,5m dlouhé části a na každý konec byl nakrimpován konektor od společnosti AMPHENOL typu 71600-020LF (*Obr.4.6*). Těchto kabelů bylo nutno zhotovit 64 kusů.



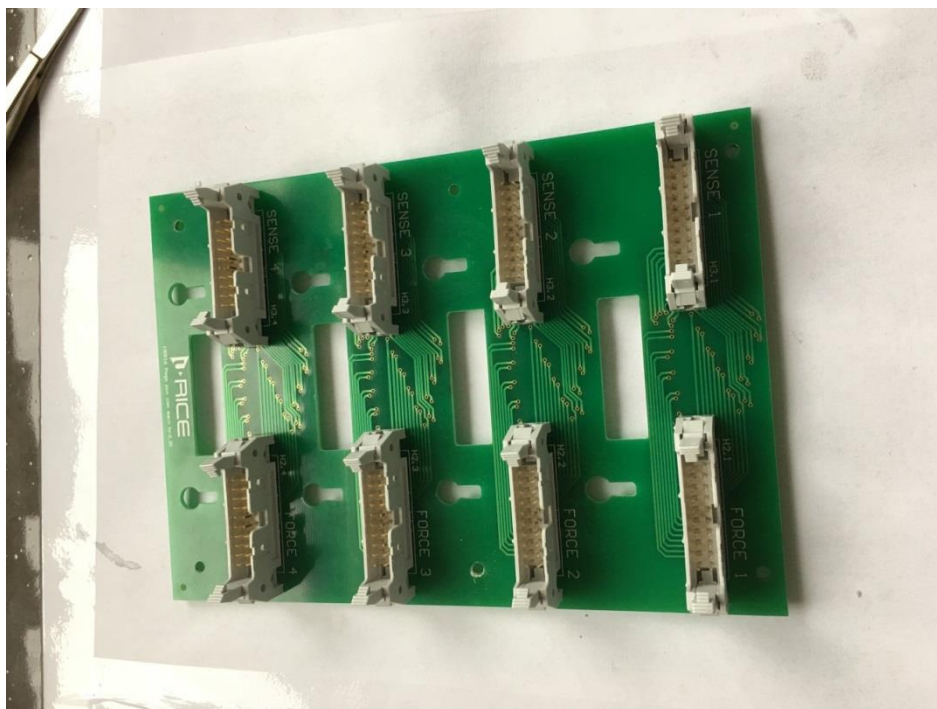
Obr.4.6 Konektor nakrimpován na 1,5m dlouhý plochý kabel

Po nakrimpování kabelů bylo nutné sestavit master desky. Z jedné strany byly tyto desky osazeny SMD konektory od firmy Harwin typ M55-6104042R pro propojení s kontaktovacími deskami termistorů (Obr.4.7). Na desku byla nejprve nanesena pomocí šablony a těrky pájecí pasta, aby došlo k přesnému nanesení na plošky. Poté byly osazeny konektory a došlo k přetavení pájecí pasty v průběžné přetavovací peci. Těchto desek bylo zhotoveno osm.



Obr.4.7 Master deska s SMD konektory pro propojení s kontaktovacími deskami termistorů

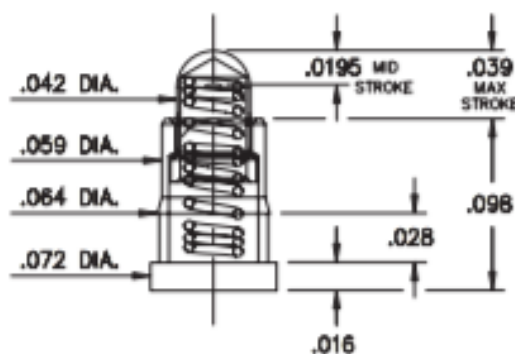
Z druhé strany této desky (Obr.4.8) byly osazeny konektory se zámkem opět pro propojení malých a master desek pomocí plochých kabelů, jak je již výše uvedeno. Konektory taktéž od firmy AMPHENOL typu 71918-120LF.



Obr.4.8 Master deska s THT konektory se zámkem pro propojení s kabeláží

Dále na řadu přišlo osazení kontaktovacích desek pro termistory, na které byla nejprve přes šablonu nanесena pasta, na kontaktní plošky byly umístěny SMD konektory Harvin M55-7004042R a pasta byla opět přetavena v průběžné přetavovací peci.

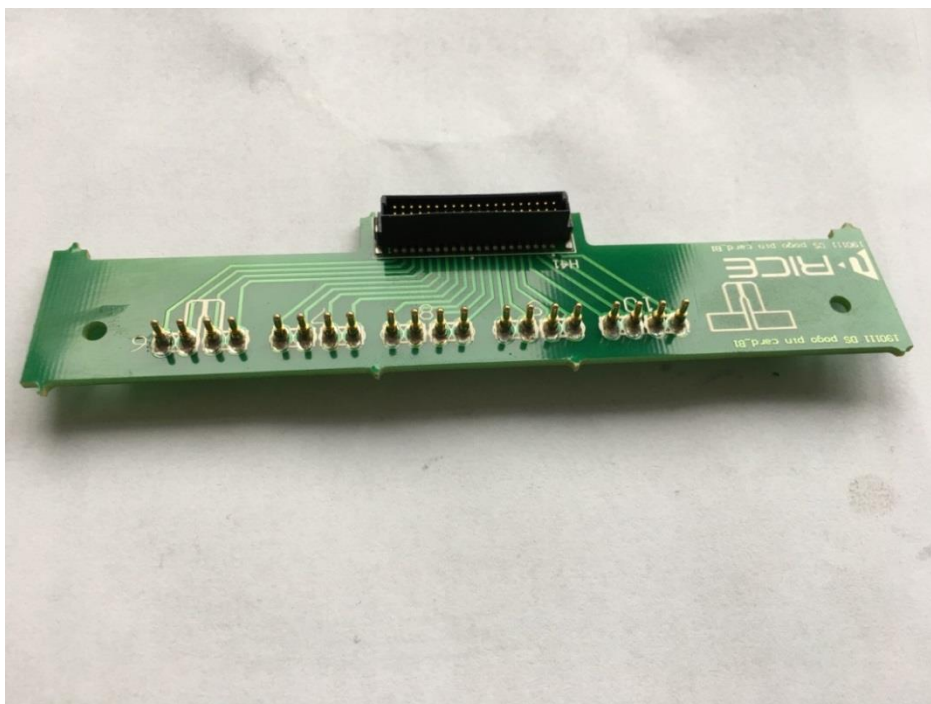
Poté byly osazeny pogopiny (Obr.4.9) od společnosti MILL-MAX, kdy se na kontaktující plošky DPS nanесla pomocí dispensingu pájecí pasta. Dále musely být zhotoveny desky z materiálu FR4, které sloužily k vycentrování a správnému osazení pogopinů, aby byly kolmo k desce a měly tak co největší přítlak na vodící plošky u flexibilních termistorů (Obr.4.10).



Obr. 4.9 Výkres pogopinu převzato z [13]

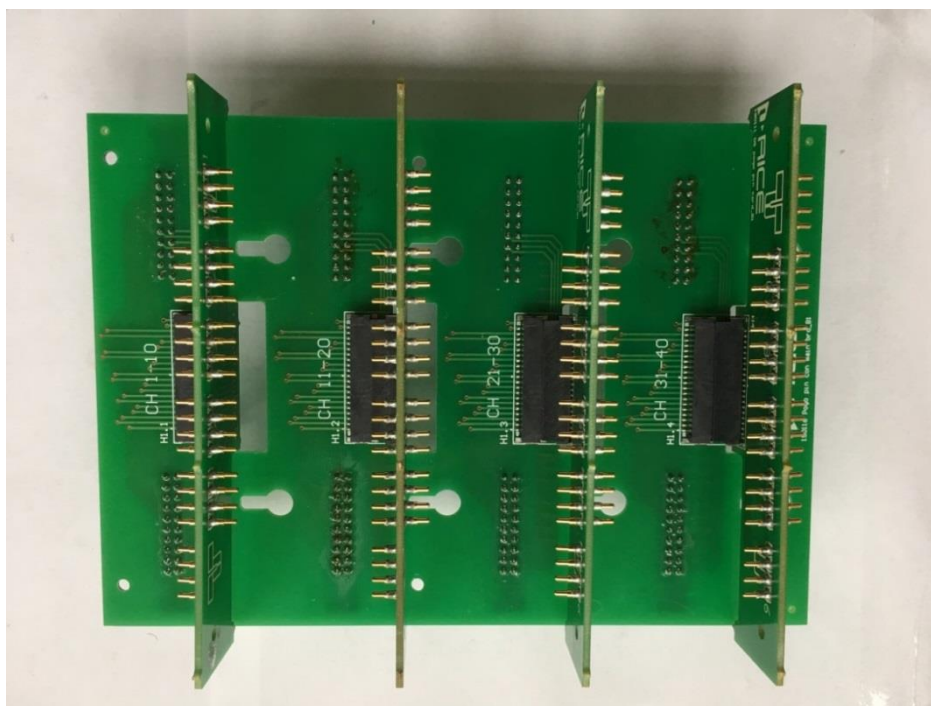
Při prvotním přetavení pájecí pasty ve speciálních pájecích kapalinách na bázi perfluoropolyetheru došlo k degradaci materiálu, ze kterého byla tvořena pružina uvnitř pogopinu, tudíž se muselo přistoupit k horkovzdušnému dávkovému přetavování v peci

Memmert UF55m, jelikož se dané desky včetně pomocných desek z materiálu FR4 nevešly do průběžné přetavovací pece.



Obr.4.10 Kontaktovací deska pro flexibilní termistory

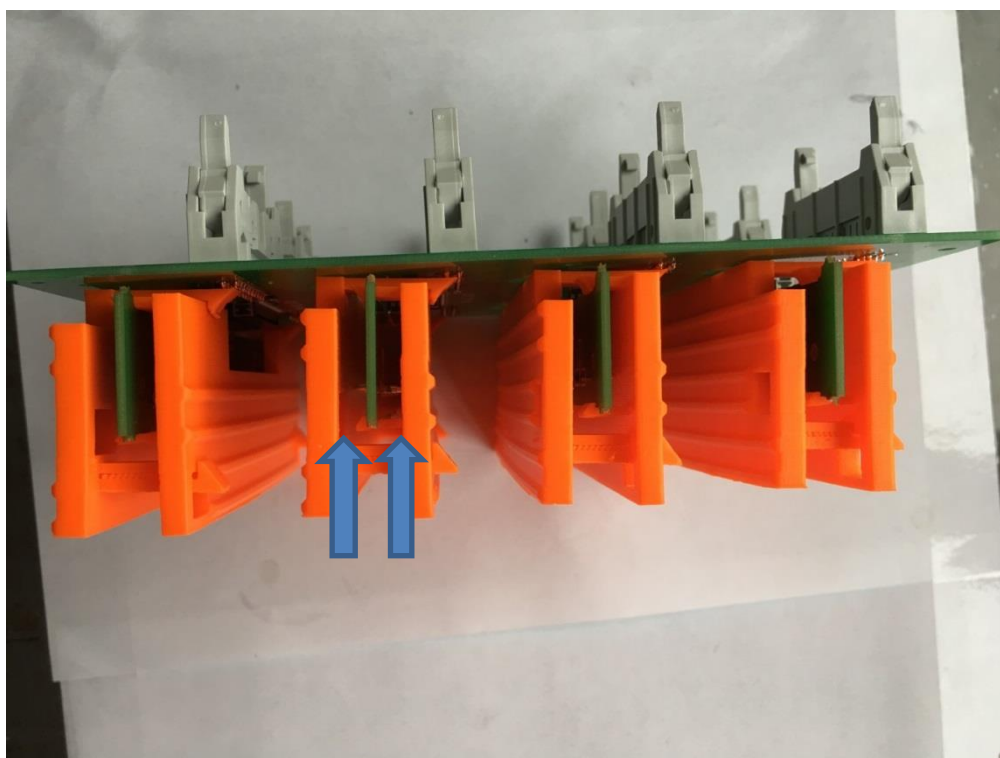
Na následujícím obrázku (Obr.4.11) byla sestavena část aparátu, která se poté nacházela uvnitř enviroboxu. Na snímku je vidno, že je možné při plném osazení měřit na jedné Master desce 40 termistorů pomocí dvoubodové případně i čtyřbodové metody.



Obr.4.11 Master deska osazená čtyřmi kontaktovacími moduly umožňujícími připojení až 40-ti senzorů ve 4-bodovém zapojení

Poté byly na 3D tiskárně PRUSA vytisknuty přítlačné přípravky, které byly složeny ze dvou do sebe zapadajících částí, měly zaručit dostatečný přítlak pogopinů na kontaktovací plošky termistorů. Tyto přípravky byly navrženy v 3D modelovacím programu SolidWorks a vytvořeny z materiálu ABS a prošly několika obměnami z důvodu nedostatečného přítlaku. Tento materiál byl vybírán tak, aby vydržel dané teploty bez jakékoli deformace. Bohužel je tento materiál velmi křehký, tudíž zacházení s ním bylo poměrně obtížné. Výkres tohoto přípravku včetně 3D modelu je obsažen v příloze A.

Na obrázku 4.12 je možné vidět část sestavy, která byla při testech vložena v enviroboxu včetně přítlačných přípravků z 3D tiskárny. Šipky znázorňují místo, pro umístění flexibilních fólií s termistory.



Obr.4.12 Část sestavy umístěná v enviroboxu včetně přítlačných přípravků

V této fázi již byla zhotovena celá měřicí sestava, tudíž bylo nutné otestovat správnou funkčnost celého zapojení a spolehlivost kontaktování pomocí pogopinů. Pro ověření byly použity flexibilní desky (Obr.4.13) osazené SMD odpory od firmy Vishay s hodnotami 10-26 Ω s tolerancí 1%. Jako první byla opět přes šablonu nanесena pasta, následně byly pomocí pinzety osazené SMD rezistory. Poté bylo upřednostněno přetavení horkovzdušnou pistolí, jelikož při přetavení v průběžné přetavovací peci by mohlo dojít u těchto flexibilních desek k deformaci skroucením, což bylo nežádoucí pro spolehlivé kontaktování.



Obr.4.13 Zkušební flexibilní desky pro testování funkčnosti měřicí sestavy

Po dokončení testu bylo u některých desek nutné přepájet pogopiny, jelikož u některých desek nebyl dostatečný kontakt mezi kontaktovacími ploškami rezistorů a pogopiny. Po drobných úpravách se mohlo přistoupit k úpravě enviroboxů.

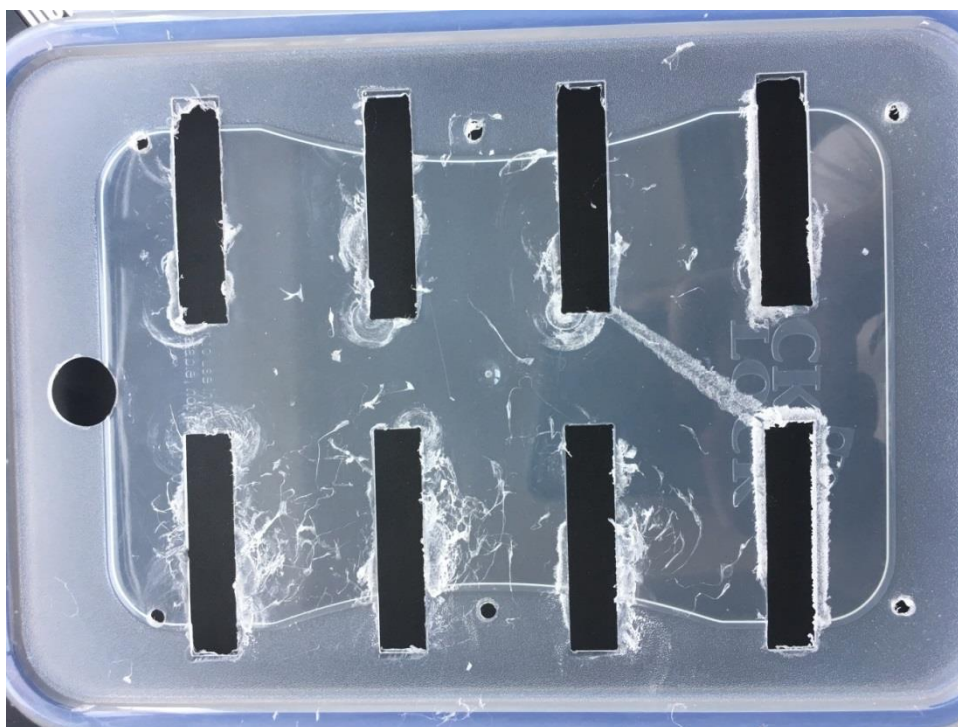
4.3 Zhotovení a testování enviroboxů

K tomu, aby bylo testování stability reprodukovatelné, bylo nutné vybrat box, kde by bylo možné vytvořit hermeticky uzavřený prostor, tudíž docílení konstantních klimatických podmínek a dosažení podmínek dle zadání. Muselo se ovšem také počítat s tím, aby daný materiál, ze kterého byl box vytvořen, vydržel již předem určené teploty v horkovzdušných pecích bez známek jakékoli deformace. Po zvážení již výše uvedených parametrů byl vybrán box od společnosti Lock&Lock HPL829 (Obr.4.14) s objemem 3,9 l, rozměry 16,5x23,4x16,5 cm a s garantovaným teplotním rozsahem $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez známky deformace. Tato hodnota je ovšem uváděna pro samostatný box bez víčka. Víka uvedeného boxu mají zaklapovací klipy, které zajišťují hermetické uzavření boxu.



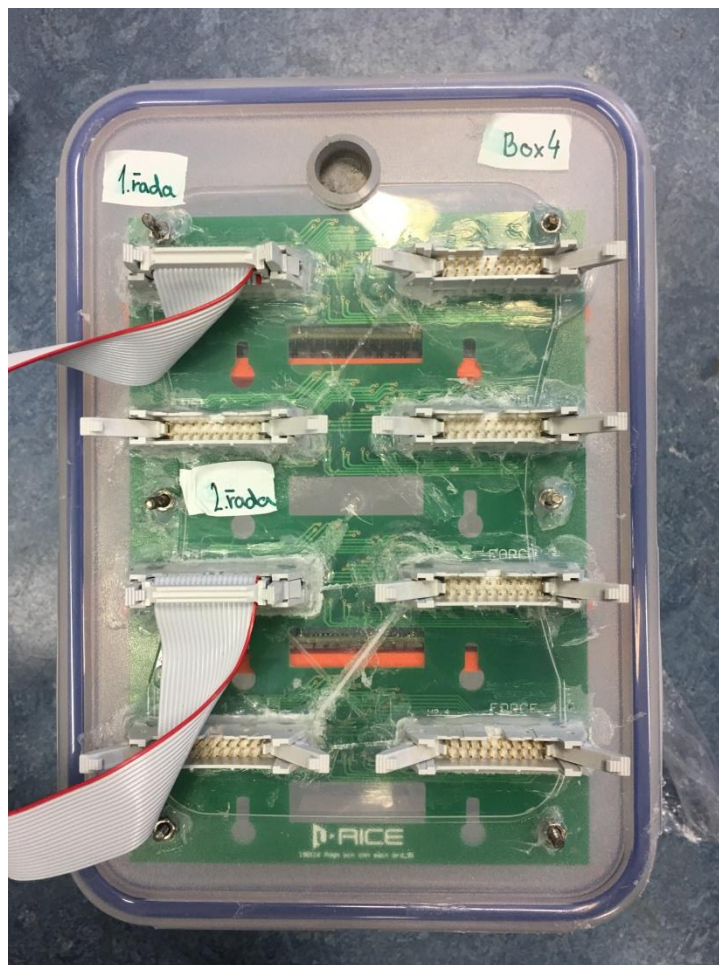
Obr.4.14 Box Lock&Lock HPL829, detail víka se zaklapovacími klipy

Následně bylo nutné do vík boxů vyfrézovat otvory pro konektory a uchycení Master desek a ještě jeden otvor pro senzor, který je schopen měřit relativní vlhkost a teplotu, aby bylo možné zjistit, zda-li se v boxu dosáhlo cílené teploty a vlhkosti. Otvory byly vyfrézovány pomocí CNC frézy, upravené víko je znázorněno na *obrázku 4.15*.



Obr.4.15 Víko enviroboxu s vyfrézovanými otvory pro konektory, závitové tyče a senzor

Následně byly Master desky přichyceny k víkům pomocí závitových tyčí M3 a matek M3. Dále byla přidána záslepka, která byla naříznuta kvůli umístění senzoru do boxu. Nakonec došlo k zasilikonování prostor okolo konektorů, matek a kabelů senzoru k dosažení hermeticky uzavřeného prostoru (*Obr.4.16*). Pro zatěsnění byl použit běžný univerzální silikon.



Obr.4.16 Ukázka hotového zasilikovaného víka enviroboxu

Pro zajištění definovaných úrovní vlhkosti dle experimentálního plánu byl použit silicagel a saturované solné roztoky, jejichž příprava je popsána níže. Jednotlivé poměry jsou vyčísleny na jeden box.

- **Suché prostředí (~0 %RH)- Silicagel**

Vzhledem k nedostatku granulovaného silicagelu nejprve ověřena použitelnost práškové formy (50 um), tato forma byla bohužel nevyhovující pro dosažení suchého prostředí, tudíž se pro finální testování použil granulový silicagel s indikátorem.

- **Nízká vlhkost (~20 %RH) – roztok CH_3COOK**

Pro nízkou vlhkost byl použit roztok octanu draselného v demineralizované vodě (dále zkráceně uváděno jako demivoda). Tato sůl má tabulkovou rozpustnost 492 g / 100 ml při 62 °C. Ve skutečnosti bylo do enviroboxu nasypáno 700 g soli a zalito 100 ml vody s teplotou 65 °C. Většina soli zůstala ve výchozím stavu suchá.

- **Střední vlhkost (~50 %RH) – roztok $Mg(NO_3)_2$**

Pro dosažení vlhkosti přibližně 50 % RH byl použit roztok dusičnanu draselného v demivodě. Tato sůl má tabulkovou rozpustnost 125 g / 100 ml. Realizovaný přesycený roztok byl tvořen 500 g soli a 300 ml demivody při teplotě 65 °C, což je 167 g / 100 ml. Při 65 °C se sůl jevila plně rozpuštěná, po poklesu na 60 °C (testování v peci 2) se v roztoku vysrážela hustá solná směs.

- **Vysoká vlhkost (~80 %RH) – roztok KCl**

Pro dosažení vysoké vlhkosti byl použit roztok chloridu draselného v demivodě. Tabulková rozpustnost této soli je 46 g / 100 ml při 60 °C. Zrealizovaný přesycený roztok obsahoval 500 g soli a 800 ml demivody při 65 °C, což je 62,5 g / 100 ml. Při 65 °C se sůl v plné míře nerozpustila, na dně zůstala hustá kašovitá směs.



Obr. 4.17 Názorná ukázka míchání roztoku chloridu draselného (KCl)

Ověření klimatických podmínek v enviroboxech bylo realizováno v plně testovací sestavě pro dlouhodobě stárnutí termistorů tvořené dvěma horkovzdušnými pecemi (Memmert UF55m) pro konstantní teploty $T_1 = 40\text{ °C}$ a $T_2 = 60\text{ °C}$. V každé peci byla vždy umístěna sestava 4 enviroboxů (Obr. 4.18) připravených pro dosažení vnitřních úrovní $RH_1 = 0\%$, $RH_2 = 20\%$, $RH_3 = 50\%$ a $RH_4 = 80\%$. Pro měření parametrů byly použity senzory vlhkosti a teploty a moduly Sensirion SHT31, které byly zapojeny do

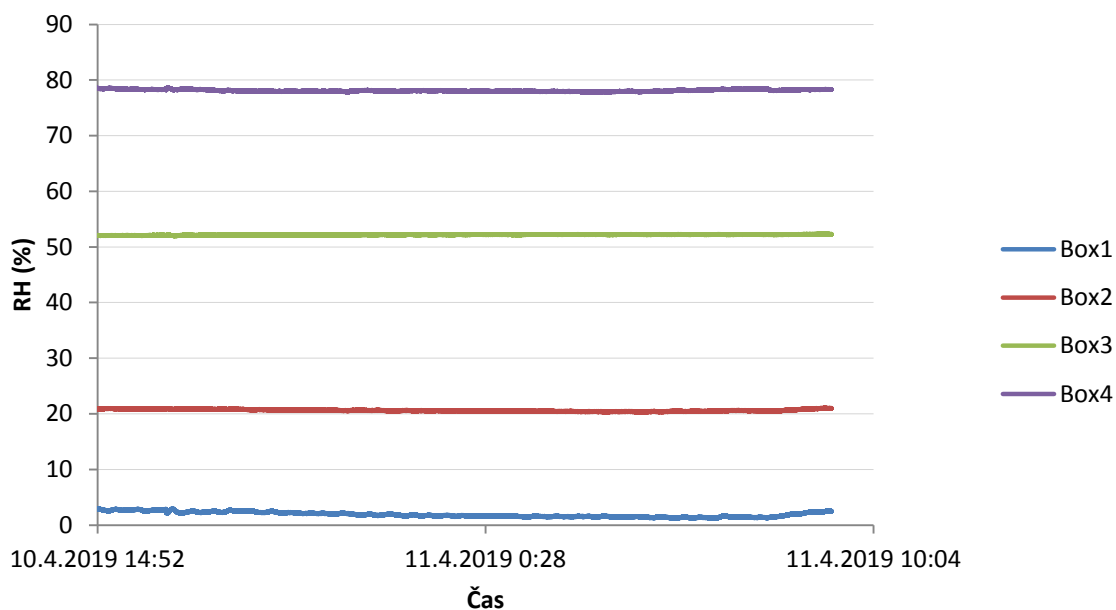
notebooků přes rozhraní USB. Hodnoty byly v notebookech zaznamenávány pomocí datalogeru EK-H4.



Obr.4.18 Měřicí sestava pro monitorování prostředí v enviroboxech

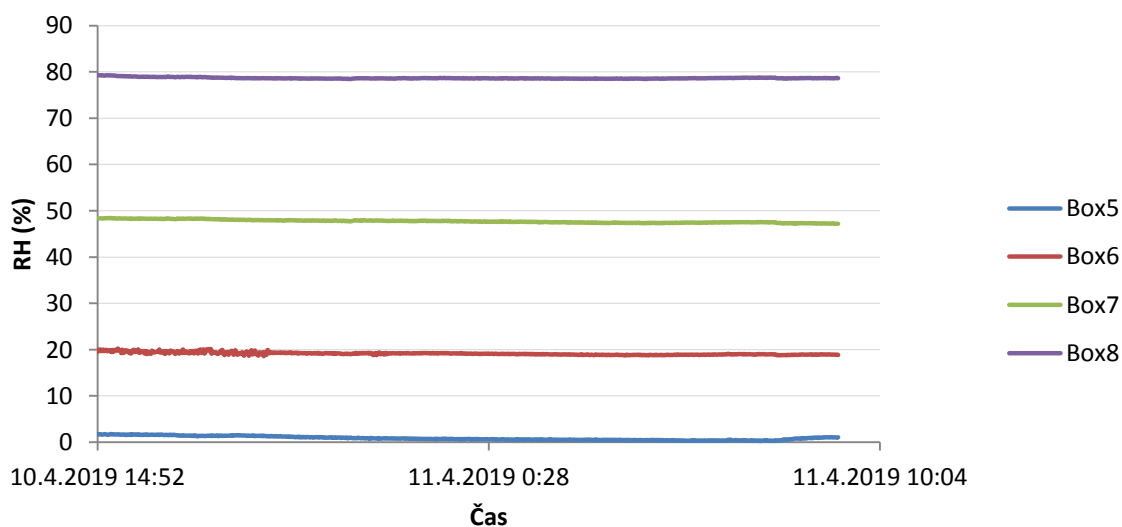
Snímání hodnot relativní vlhkosti a teploty probíhalo po dobu 24 hodin pro ustálení vnitřních klimatických podmínek. Hodnoty v ustáleném stavu jsou rozděleny pro měření v obou pecích, tyto údaje jsou znázorněny na *grafech 4.1 a 4.2*.

Hodnoty RH v enviroboxech při teplotě 40°C



Graf 4.1 Relativní vlhkost v enviroboxech pro teplotu 40°C

Hodnoty RH v enviroboxech při teplotě 60°C

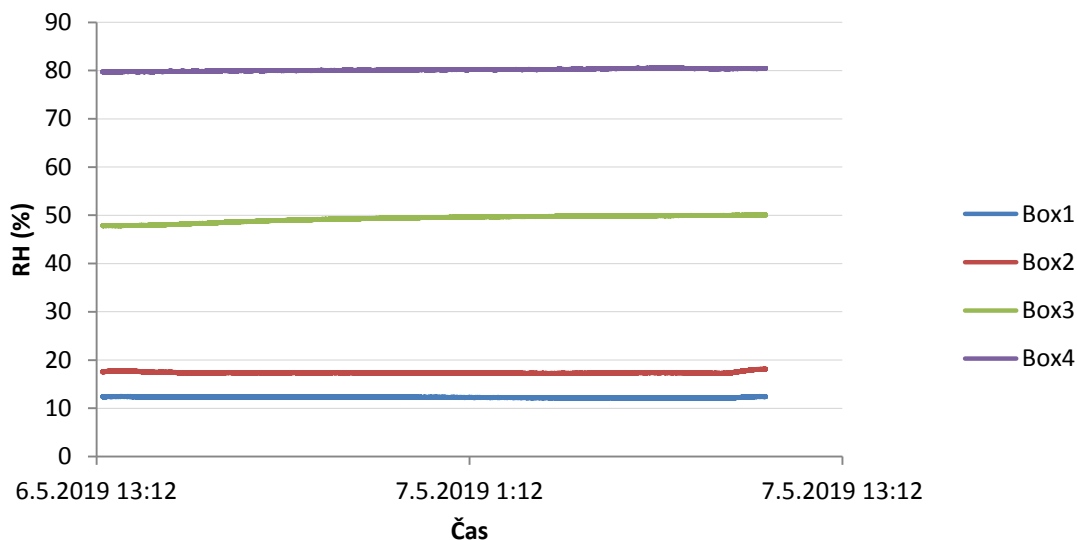


Graf 4.2 Relativní vlhkost v enviroboxech pro teplotu 60°C

Toto měření bylo provedeno i po dlouhodobém stárnutí (Graf 4.3 a 4.4), aby se zjistilo, zda-li podmínky v enviroboxech vydržely po celou dobu testování. Po zpracování dat bylo zjištěno, že v některých enviroboxech došlo ke změně relativní vlhkosti. Enviroboxy v peci s teplotou 40 °C vykazovaly velmi podobné hodnoty i po konci 500 hodinového testu. U enviroboxů, které byly v peci s teplotou 60 °C, došlo k výraznému poklesu RH pro boxy 6 a 7. Tudiž výsledky testování stárnutí termistorů v těchto

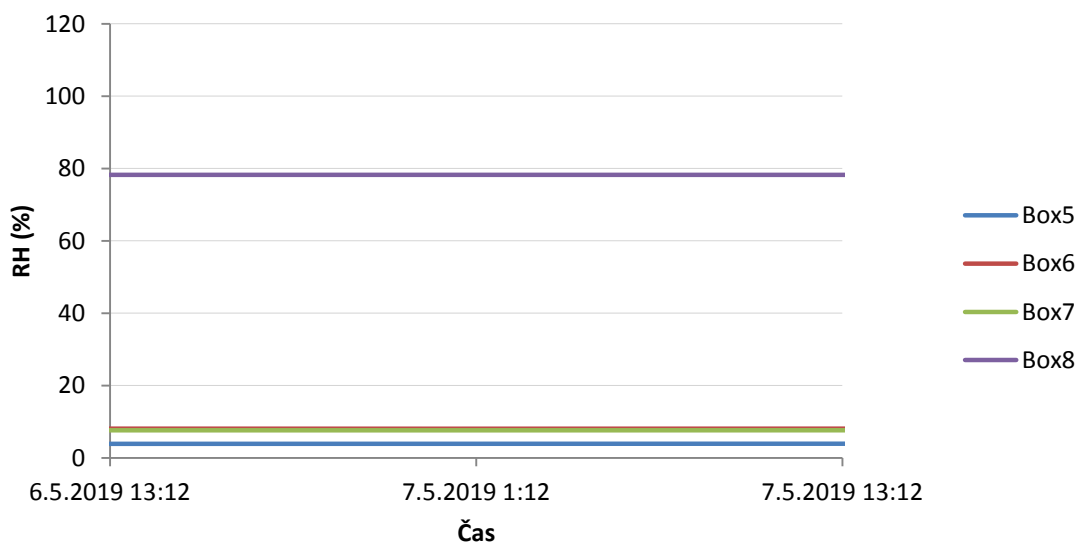
podmínkách zřejmě nebudou relevantní. Tyto změny se dají přičíst např. nedostatečnému zasilikonování otvorů. Bohužel senzory relativní vlhkosti a teploty nebyly zapojeny po celý průběh testu, aby nedošlo ke zničení. Tudiž nelze zjistit, v jaké fázi testu došlo k degradaci prostředí.

Hodnoty RH v enviroboxech při teplotě 40°C



Graf 4.3 Relativní vlhkost v enviroboxech po dlouhodobém stárnutí pro teplotu 40°C

Hodnoty RH v enviroboxech při teplotě 60°C



Graf 4.4 Relativní vlhkost v enviroboxech po dlouhodobém stárnutí pro teplotu 60°C

5 Experimentální testování tištěných NTC termistorů

V této kapitole je detailněji popsáno samotné testování termistorů, postup jednotlivých testů pro získání relevantních dat, pro sestavení grafů a vyhodnocení jednotlivých druhů vzorků. Pro experimentální měření byl testovací aparát dimenzován na celkový počet 320 vzorků. Vzhledem k omezené kapacitě dostupné měřicí instrumentace byl maximální limit počtu paralelně testovaných vzorků omezen na 160 ks.

Experimentální testování bylo rozděleno na čtyři základní části:

- 1) Selektce termistorů z celé sady dodaných vzorků
- 2) Měření výchozích kalibračních křivek
- 3) Dlouhodobé stárnutí
- 4) Měření konečných kalibračních křivek

Pro měření všech testů byly použity DMM Keithley 2701, každý z nich byl osazen dvěma multiplexovými kartami Keithley 7708, každý z nich disponoval měřicí kapacitou 40 kanálů ve dvoubodovém zapojení. Tzn., celková kapacita měření byla 160 kanálů. Data z každého DMM byla logována vždy do samostatného notebooku pomocí SW Keithley Kickstart v1.98.

5.1 Selektce termistorů z celé sady dodaných vzorků

Tato podkapitola popisuje test, který byl proveden pro získání úvodních dat pro vyhodnocení vzorků.

Nejprve byly vybrány vzorky vhodných pro testování (*Obr.5.1*). To proběhlo pro získání referenčních hodnot NTC termistorů. Nejprve byly testovány všechny panely uvedených šesti druhů termistorů, které prošly optickou kontrolou. Poté se z množství panelů vybraly ty s nejmenším rozptylem hodnot. Tyto panely byly vybrány pomocí variačního koeficientu pomocí MS Excel.



Obr.5.1 Ukázka testování jednotlivých vzorků termistorů při přibližné ref. teplotě 25 °C

Pro zajištění, aby byl každý druh termistoru testován ve všech environmentálních prostředích, bylo nutné sestavit měřicí plán osazení flexibilních NTC termistorů do jednotlivých boxů (tab. 5.1).

Tab. 5.1 Měřicí plán pro environmentální testování

	T (°C)	RH (%)			SET	CH	NTC
PEC01	40	0	DMM01	BOX01	S1	101-105	NTC2-1-P12
					S2	106-110	NTC2-2-P03
					S3	111-115	NTC2-1-L-P01
					S4	116-120	NTC2-2-L-P01
		20	BOX02	S1	121-125	NTC2-1-P14	
				S2	126-130	NTC2-2-P04	
				S3	131-135	NTC2-1-L-P03	
				S4	136-140	NTC2-2-L-P04	
	50	BOX03	S1	201-205	NTC2-1-P15		
			S2	206-210	NTC2-2-P05		
			S3	211-215	NTC2-1-L-P04		
			S4	216-220	NTC2-2-L-P05		
	80	BOX04	S1	221-225	NTC2-1-P16		
			S2	226-230	NTC2-2-P07		
			S3	231-235	NTC2-1-L-P05		
			S4	236-240	NTC2-2-L-P06		
PEC02	60	0	DMM02	BOX05	S1	101-105	NTC2-1-P17
					S2	106-110	NTC2-2-P08
					S3	111-115	NTC2-1-L-P08
					S4	116-120	NTC2-2-L-P14
		20	BOX06	S1	121-125	NTC2-1-P18	
				S2	126-130	NTC2-2-P10	
				S3	131-135	NTC2-1-L-P09	
				S4	136-140	NTC2-2-L-P15	
	50	BOX07	S1	201-205	NTC2-1-P19		
			S2	206-210	NTC2-2-P11		
			S3	211-215	NTC2-1-L-P15		
			S4	216-220	NTC2-2-L-P16		
	80	BOX08	S1	221-225	NTC2-1-P20		
			S2	226-230	NTC2-2-P13		
			S3	231-235	NTC2-1-L-P16		
			S4	236-240	NTC2-2-L-P17		

5.2 Počáteční měření kalibračních křivek v klimatické komoře

Pro následné měření kalibračních křivek byly dle *kap. 5.1* vybrány 4 varianty vzorků na bázi dvou různých termosenzitivních formulací: bez enkapsulace (NTC2-1, NTC2-2) a s enkapsulací realizovanou laminací krycí fólií (NTC2-1-L, NTC2-2-L). Vzorky ve variantách NTC1 a NTC1-L nebyly použity z důvodu přílišného rozptylu hodnot, tudíž bylo usouzeno, že případná další měření těchto vzorků by nemusela být průkazná. Pro každý druh termistoru bylo vybráno 8 panelů dle 8-mi variant klimatických podmínek pro testování dlouhodobé stability (*tab 5.1*). Měření probíhalo v klimatické komoře Vötsch VCV3 7060-5.



Obr.5.2 Sestavený testovací aparát pro měření kalibračních křivek v klimakomoře

Pro zjištění kalibračních křivek byl v klimakomoře Vötsch naprogramován profil (*graf 5.1*), podle kterého bylo možné vykreslit kalibrační křivky, a tudíž i zmapovat chování při určitých stupních vlhkosti a skokových změnách teploty.

Profil se skládal ze 3 hlavních částí:

- 1) Testovací sekvence pro charakterizaci $R(T)$ závislosti při $RH = 10 \%$
- 2) Testovací sekvence pro charakterizaci $R(T)$ závislosti při $RH = 50 \%$
- 3) Testovací sekvence pro charakterizaci $R(RH)$ závislosti při $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ (ta nebyla

v této práci vyhodnocována)

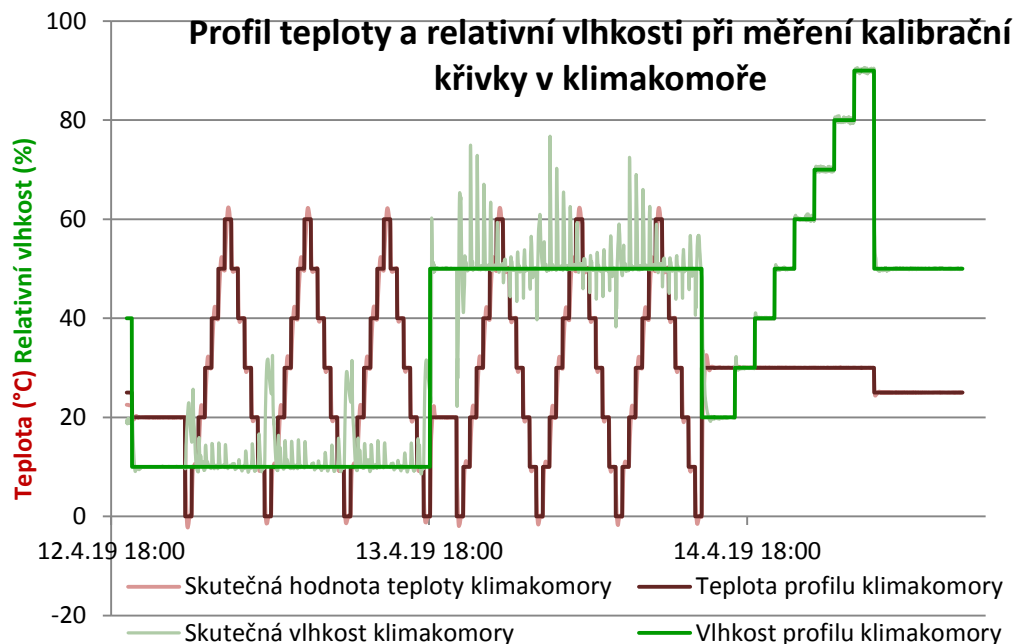
Tento test trval 63 hodin a začal aklimatizační částí ($T = 20\text{ °C}$, $RH = 10\%$) pro ustálení vzorků i vnitřního prostředí v komoře, poté následovalo skokové zvyšování teplot s minimem v 0 °C a maximem v 60 °C se skokem 10 °C a konstantní relativní vlhkosti 10% . Z tohoto maxima se poté ve stejných teplotních krocích klesalo zpět na hodnotu 0 °C . Délka jednoho teplotního schodu byla 30 minut. Délka jednoho teplotního schodového cyklu trvala 6 hodin. Tato sekvence se celkem opakovala 3x.

Druhá část profilu byla určena pro ustálení vzorků i vnitřního prostředí v komoře při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50% .

Následoval pokles teploty na hodnotu 0 °C a skokové zvyšování až po dosažení maxima (60 °C) i snižování teploty zpět na minimum (0 °C), relativní vlhkost v tomto případě byla na hodnotě 50% . Tato sekvence se celkem opakovala 3x (viz pro $RH\ 10\%$).

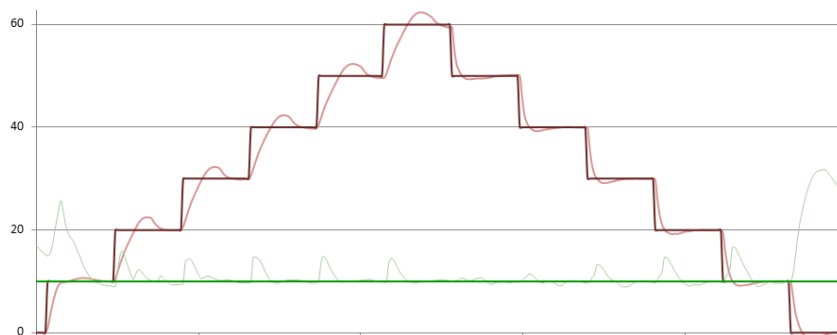
Poté byl přednastaven pokles relativní vlhkosti na 20% a schodové stoupání s krokem 10% relativní vlhkosti při teplotě 30 °C .

Na závěr proběhlo ustálení při referenční teplotě 25 °C a relativní vlhkosti 50% . Hodnoty z klimatické komory i z měřících přístrojů byly odečítány po 60-ti sekundových intervalech.



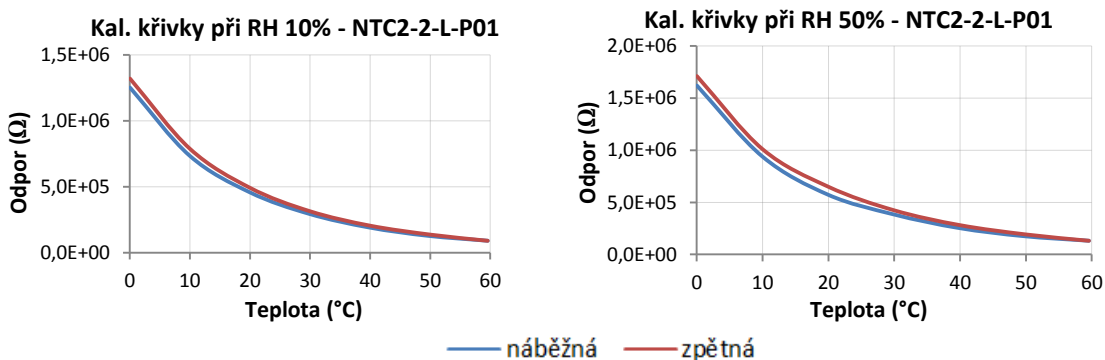
Graf 5.1 Profil teploty a vlhkosti při měření počáteční kalibrační křivky v klimatické komoře

Vzhledem k tomu, že docházelo ke značným výkyvům při změnách teploty (Obr.5.3), popřípadě vlhkosti, bylo nutné vyfiltrovat pouze posledních pět hodnot z každého měřícího úseku, jelikož byly nejpřesnější.



Obr. 5.3 Detail části klimatického profilu schodovitou změnou teploty při konstantní relativní vlhkosti.

Pro názornou ukázkou byla vybrána sada termistorů s laminovanou enkapsulací s formulací NTC2-2-L jmenovitě panel 1 (NTC2-2-L-P01). Výsledky a grafy byly zpracovány pomocí řešitele MS Excel, kde byl postup takový, že k vyselektovaným hodnotám z každého měřicího úseku (viz předchozí odstavec) byly dle shodných časových údajů přiřazeny hodnoty odporu pro jednotlivé termistory. Hodnoty odporu z každého měřicího úseku (5 hodnot) byly zpracovány pomocí statistické funkce medián. Poté byla tato funkce aplikována i pro každý panel. Tímto se získaly pro každou teplotu při určitém RH (10 % a 50 %) tři hodnoty pro každý panel, jelikož byly naprogramovány tři schodové cykly pro obě vlhkosti. Tyto hodnoty byly následně zprůměrovány, tudíž pro každou křivku byla získána jedna hodnota v daných podmínkách (pro růst i pokles teploty). Výsledky byly rozděleny pro hodnoty relativních vlhkostí 10 % a 50 % (graf 5.2a, graf 5.2b). Z grafů je patrné, že dochází k částečné hysterezi a jednotlivá prostředí s odlišnou relativní vlhkostí mají vliv na hodnotu odporu. Co se týče tvaru, křivky odpovídají teoretickým předpokladům.



Graf 5.2a Kalibrační křivka při RH 10 %
Graf 5.2b Kalibrační křivka při RH 50 %

5.3 Dlouhodobé stárnutí termistorů

Pro tento test byly stěžejní informace obsaženy v zadaných požadavcích, v normě pro testování konvenčních NTC termistorů ČSN EN 60539-1 (viz *kap. 3.3*) a v normách pro klimatické testování. Při tomto testu již bylo nutné pracovat s enviroboxy s různými hodnotami RH, uvedené v *kap. 4.3*, kde jsou detailněji popsány. Měření stability probíhalo ve dvou pecích Memmert UF55m (*Obr. 5.4*), kde první pec byla nastavena na 40 °C a druhá na 60 °C. Doba trvání testu byla vybrána podle normy, čili 500 hodin. Měření probíhalo dvoubodovou metodou a hodnoty byly opět odečítány dvěma měřicími přístroji Keithley a zaznamenávány pomocí softwaru Keithley Kickstart v1.98 tentokrát v půl hodinových intervalech. Obsazení termistorů v jednotlivých boxech je uvedeno v *tab. 5.1*.



Obr.5.4 Sestava pro měření dlouhodobé stability termistorů

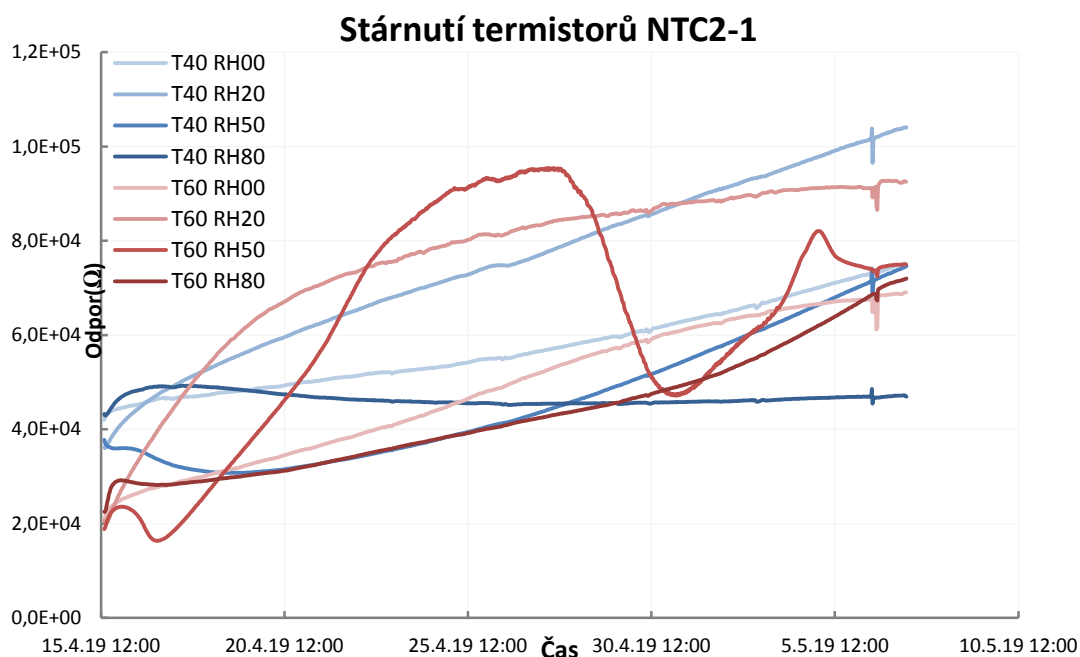
Tento test měl prokázat, zda-li hodnoty odporu jednotlivých termistorů jsou v daných podmínkách konstantní, což by mělo odpovídat ideálnímu chování termistoru, anebo zda-li dochází k driftu, čili výkyvům odporu v daném specifickém prostředí a časovém intervalu.

Při tvoření grafů byla v řešiteli MS Excel data zpracována tak, že byla vyhodnocována data jednotlivých panelů (tzn. 5 vzorků) a z těchto hodnot se udělal medián, tudíž došlo k eliminaci možného zkreslení výsledků vzorkem s odchýlenými hodnotami v daném panelu. Tento postup se udělal pro 1000 hodnot, jelikož měřicí přístroje zaznamenávaly hodnoty každých 30 minut. Grafy byly rozděleny podle jednotlivých formulací NTC termistorů.

Vzhledem k ověření hodnot relativní vlhkosti po dlouhodobém testování došlo k výrazné degradaci environmentálních podmínek v boxech, které byly umístěny v peci s teplotou 60 °C a relativní vlhkostí 20 % a 50 %. Po těchto zjištěných faktech bylo usouzeno, že výsledky v těchto boxech nemusí být směrodatné.

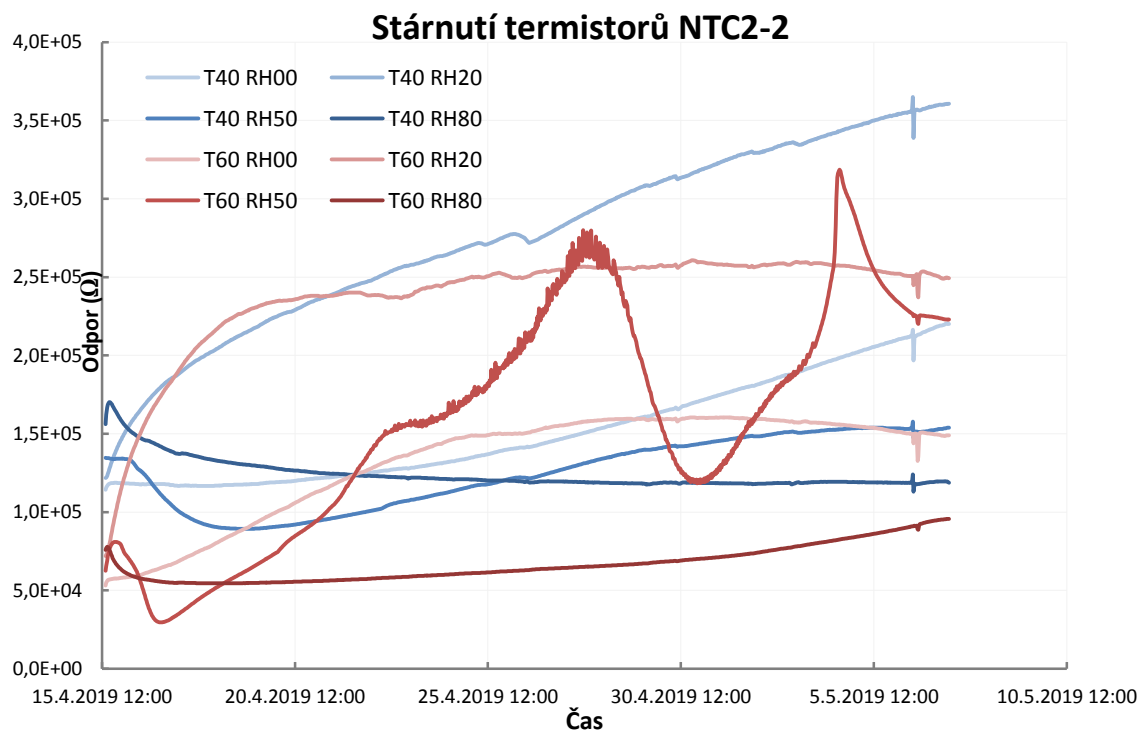
Výsledky průběhů stárnutí jsou znázorněny na *grafech 5.2 – 5.5*, kde je zjevné, že

všechny varianty termistorů vykazují ve všech prostředích určitý drift.



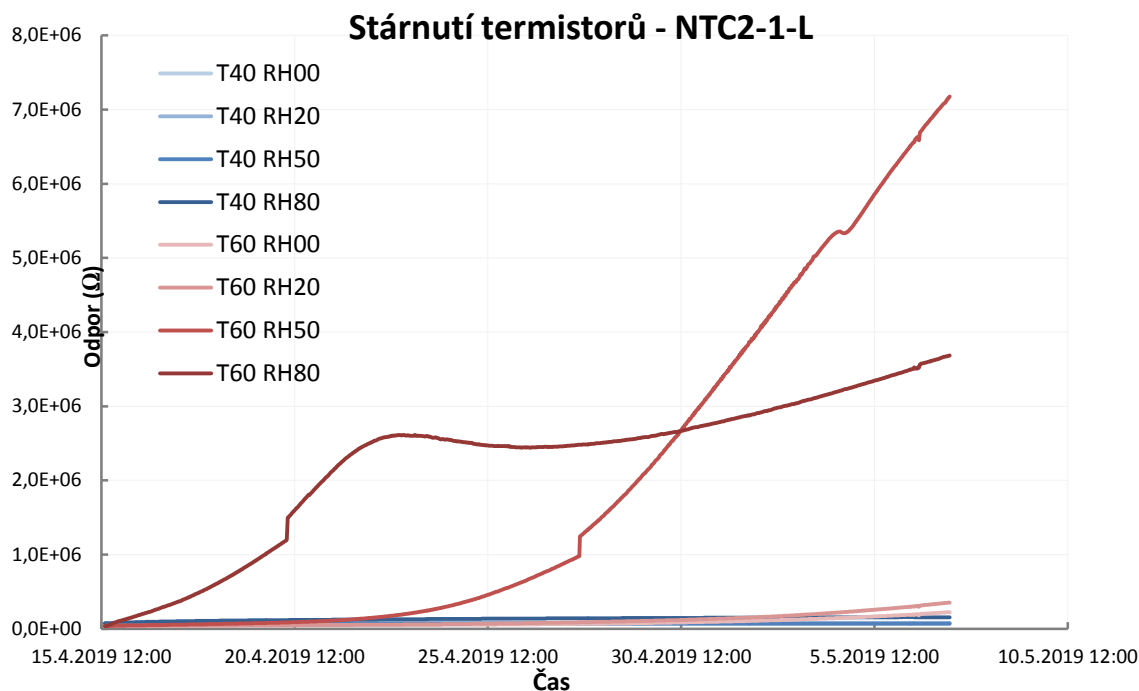
Graf 5.3 Stárnutí termistorů NTC2-1 ve všech prostředích

Z grafu 5.3 je patrné, že sada termistorů s formulací NTC2-1 vykazuje poměrně značný drift ve všech prostředích vyjma prostředí s teplotou 40 °C a relativní vlhkostí 80 %.



Graf 5.4 Stárnutí termistorů NTC2-2 ve všech prostředích

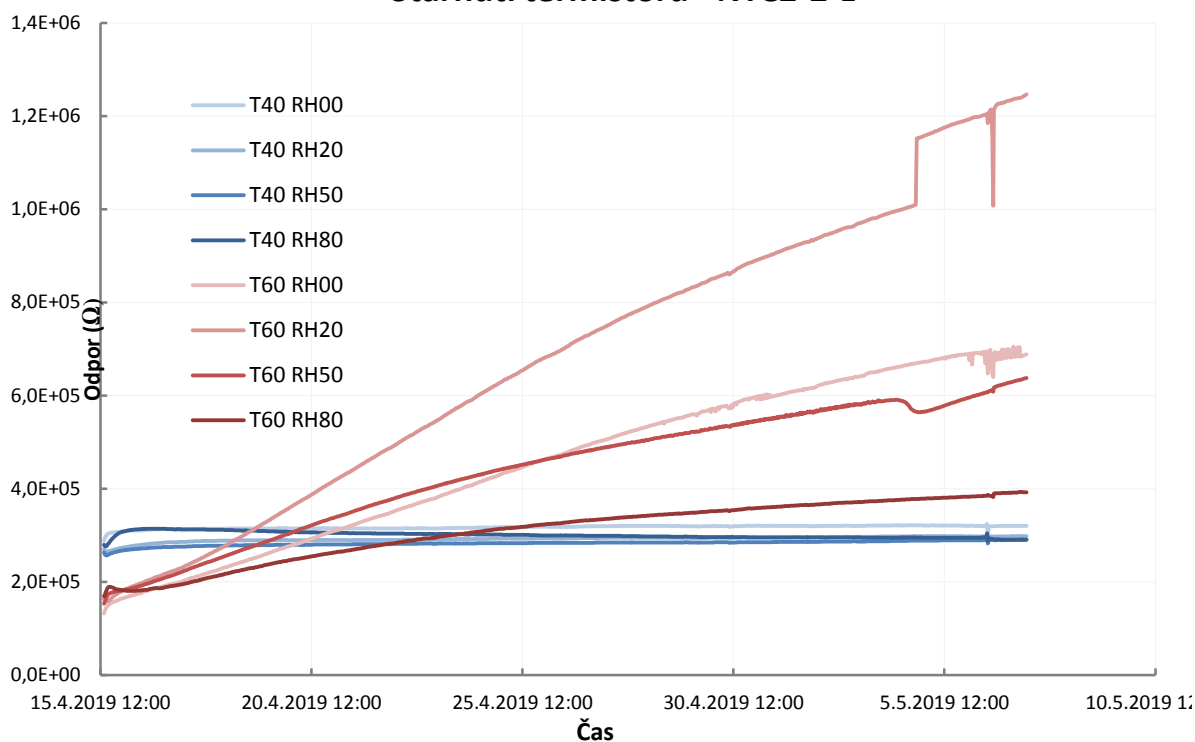
Z grafu 5.4 je patrné, že sada termistorů s formulací NTC2-2 vykazuje poměrně značný drift ve všech prostředích vyjma prostředí s teplotou 60 °C a relativní vlhkostí 80 %. U křivky pro hodnotu teploty 40 °C a relativní vlhkost 80 % dochází dokonce k zápornému driftu.



Graf 5.5 Stárnutí termistorů NTC2-1-L ve všech prostředích

U termistorů s formulací NTC2-1-L (graf 5.5) došlo ke značnému driftu u vzorků, které čelily teplotě 60 °C a relativní vlhkosti 50 % a 80%. Skoky u hodnot okolo 1 MΩ jsou přičteny změně rozsahu měřicího přístroje.

Stárnutí termistorů - NTC2-2-L

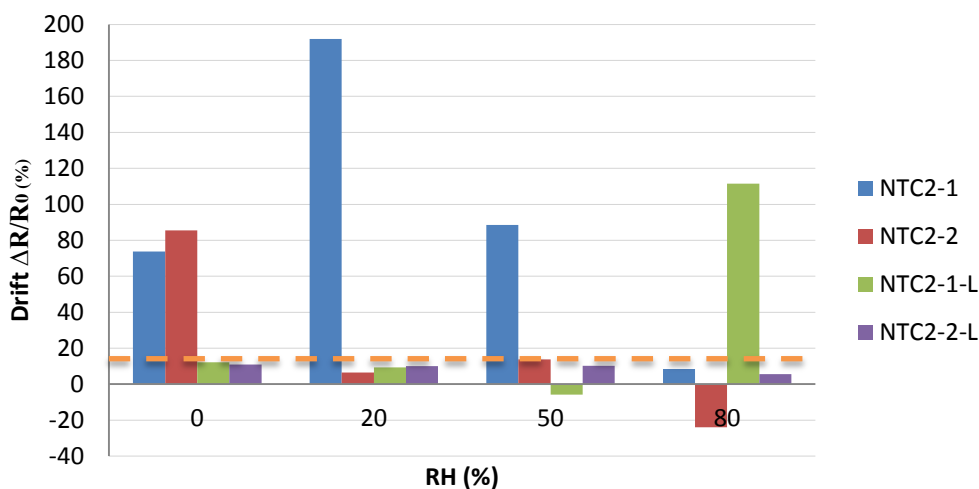


Graf 5.6 Stárnutí termistorů NTC2-2-L ve všech prostředích

Formulace NTC2-2-L (graf 5.6) se při teplotě 40 °C zdála být nejstabilnější ve všech hodnotách relativních vlhkostí. Drift při teplotě 60 °C byl o mnoho výraznější, to může být přičteno degradaci environmentálních podmínek v boxech.

Po zjištění faktu, že uvedené druhy termistorů vykazovaly drift, bylo nutné udělat vhodné zpracování výsledků. Toto zpracování bylo koncipováno tak, že došlo k odečtení výchozí hodnoty na začátku testu od koncové hodnoty po 500 hodinách. Tento výsledek byl vztažen vzhledem k počáteční hodnotě a následně vynásoben 100x pro získání hodnot v procentech. Z tohoto byla získána relativní procentuální změna odporu po 500 h testování v daných klimatických podmínkách. Zpracovaná data byla vyjádřena ve sloupcových grafech.

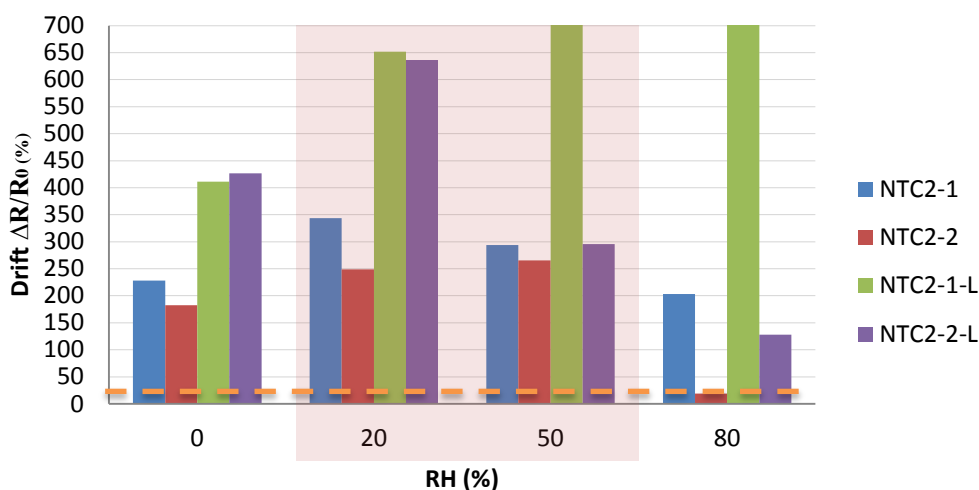
Drift pro prostředí T=40°C



Graf 5.7 Drift panelů v jednotlivých prostředích vyjádřený v procentech v prostředí T=40°C

Z grafu 5.7 lze vyčíst, že většina sad termistorů měla v některých prostředích značné výkyvy. Výjimkou je sada s formulací NTC2-2-L, která vykazuje drift v řádech jednotek procent. Tuto sadu je možné v rámci provedeného testování v prostředích s teplotou 40 °C označit za nejstabilnější. Jako kritérium pro uspokojivou stabilitu uvedených vzorků byla zvolena hodnota driftu 15 % (v grafu 5.7 znázorněno oranžovou čárkovanou čarou).

Drift pro prostředí T=60°C



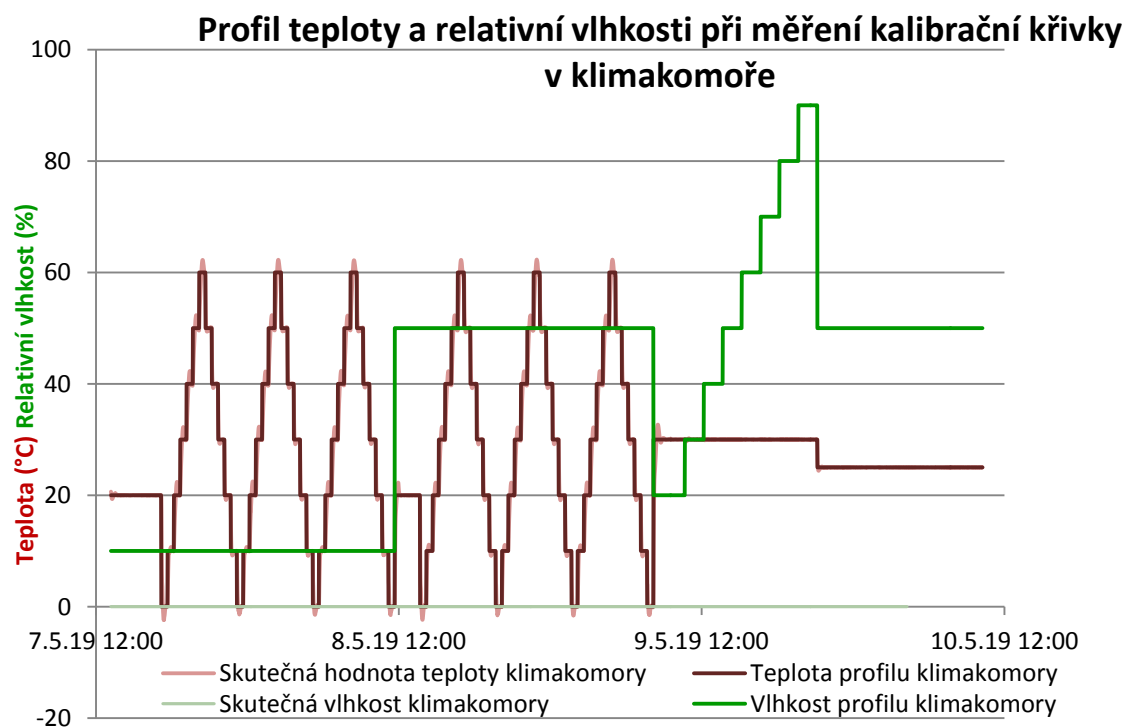
Graf 5.8 Drift panelů v jednotlivých prostředích vyjádřený v procentech v prostředí T=60°C

Graf 5.8 znázorňuje drift jednotlivých sad termistorů při různých hodnotách vlhkosti při teplotě 60 °C. V těchto kombinaci environmentálních podmínek je zjevné, že se žádná ze sad termistorů nedá určit jako dlouhodobě stabilní. Avšak je nutné brát v potaz

fakt, že u enviroboxů s relativní vlhkostí 20 % a 50 % došlo k degradaci prostředí, tudíž následující výsledky nejsou zcela relevantní, proto jsou tyto hodnoty v daném sloupcovém grafu podbarveny červeně. Detailnější popis degradace prostředí je popsán v kapitole 4.3 a hodnoty získané po testování prostředí po dlouhodobém stárnutí při teplotě 60 °C v grafu 4.4.

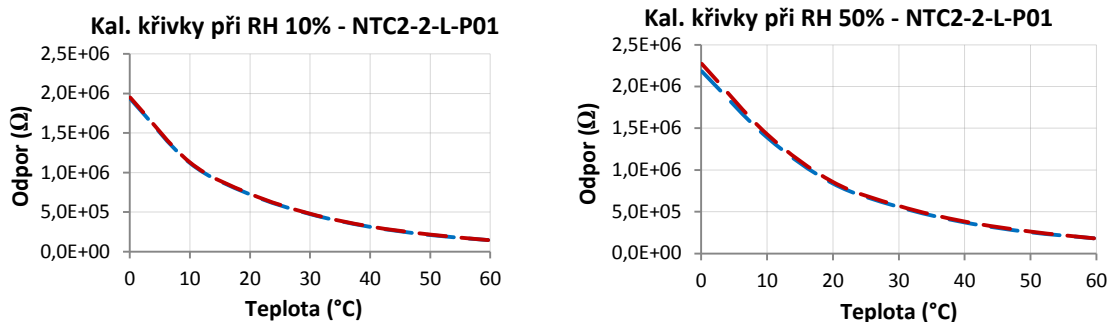
5.4 Konečné měření kalibračních křivek v klimatické komoře

V této podkapitole je popsáno měření, které následovalo po dlouhodobém stárnutí termistorů v enviroboxech. Tento test probíhal stejně jakou u měření kalibračních křivek před stárnutím. Pro dosažení průkazných výsledků potřebných ke srovnání kalibračních křivek před a po dlouhodobém testování stability bylo nutné dosažení stejných environmentálních podmínek. Tyto podmínky byly opět zajištěny předvoleným profilem v klimakomoře Vötsch (Graf 5.9).



Graf 5.9 Profil podmínek v klimakomoře pro získání kalibračních křivek po dlouhodobém testování

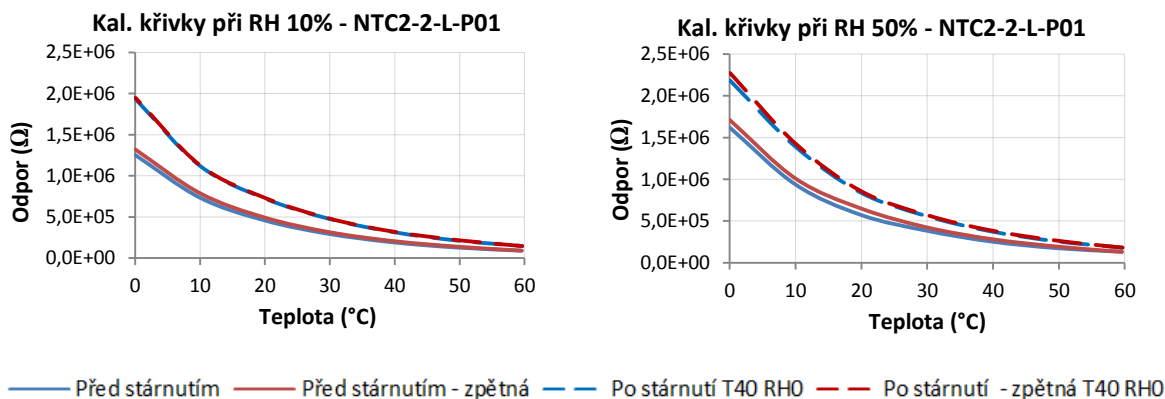
Pro názornou ukázkou byla vybrána sada termistorů s laminovanou enkapsulací s formulací NTC2-2-L jmenovitě panel 1 (NTC2-2-L-P01). Výsledky a grafy byly opět zpracovány pomocí řešitele MS Excel, kde byl postup stejný jako v kap. 5.1. Výsledky byly rozděleny pro hodnoty relativních vlhkostí 10 % a 50 % (graf 5.10a, graf 5.10b). I po dlouhodobém testování bylo zjištěno, že experimentální vzorky opět vykazují určitou hysterézi.



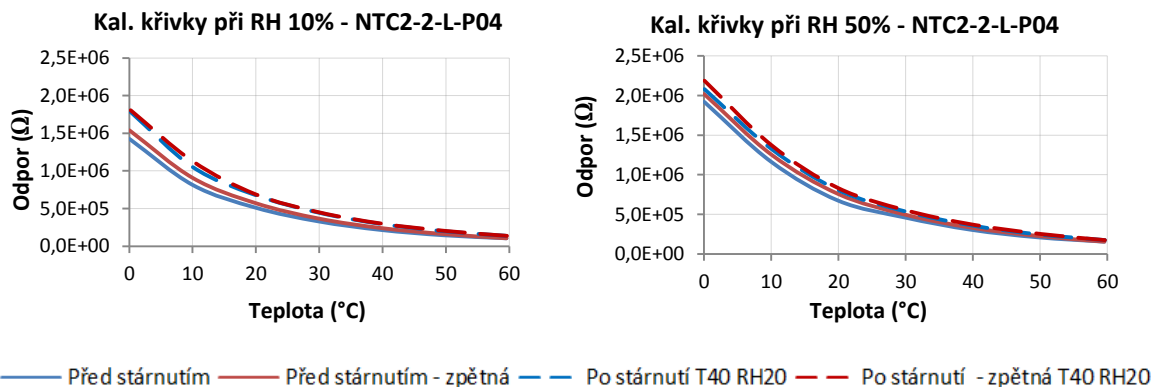
Graf 5.10a Kalibrační křivka při RH 10 %
Graf 5.10b Kalibrační křivka při RH 50 %

5.5 Porovnání kalibračních křivek

V následující podkapitole je uvedeno porovnání jednotlivých kalibračních křivek, aby bylo možné zjistit, k jakým změnám chování NTC termistorů došlo po dlouhodobém stárnutí v enviroboxech. Vzhledem k získaným výsledkům v kapitole 5.2 byla pro názornost chování vybrána sada termistorů s formulací NTC2-2-L a vzorky testované při teplotě 40 °C ve všech relativních vlhkostech, jelikož jako jediné ze všech testovaných variant termistorů vykazovaly míru driftu pod hranici 15%. Porovnání kalibračních křivek všech ostatních je uvedeno v příloze B.

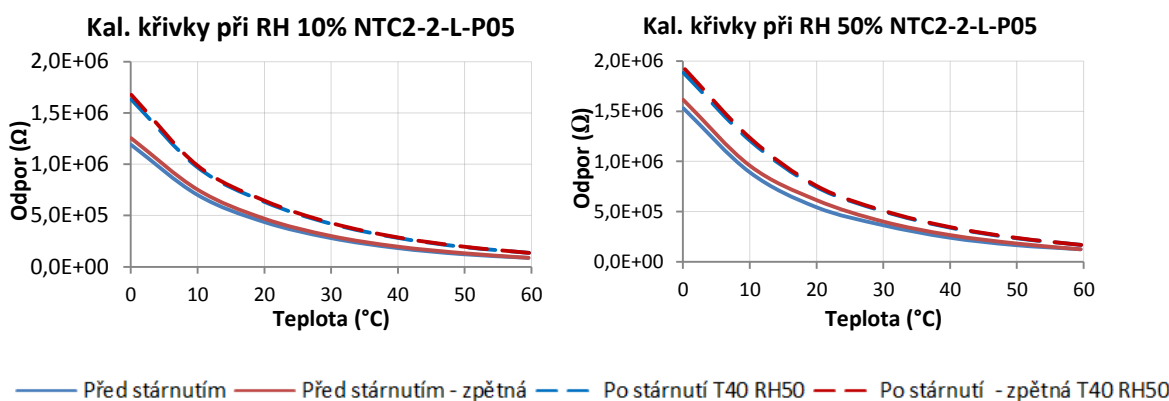


Graf 5.11a Porovnání kalibračních křivek při RH 10%
Graf 5.11b Porovnání kalibračních křivek při RH 50%



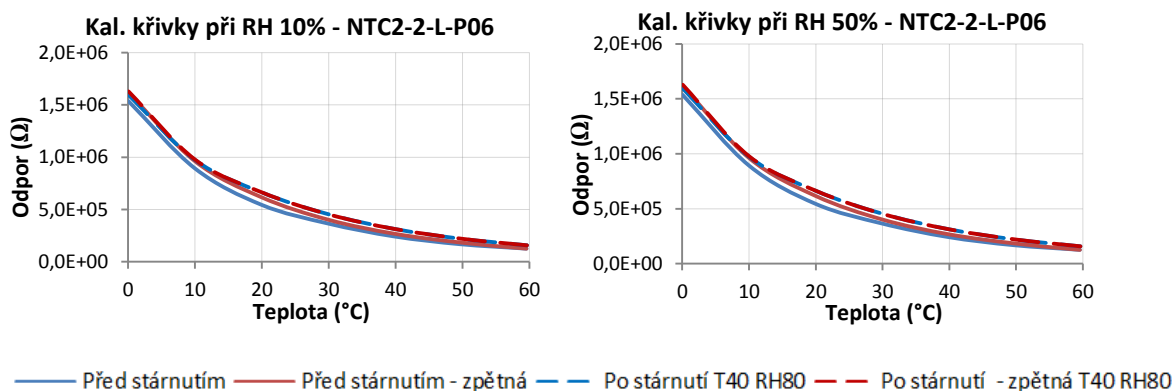
Graf 5.12a Porovnání kalibračních křivek při RH 10%

Graf 5.12b Porovnání kalibračních křivek při RH 50%



Graf 5.13a Porovnání kalibračních křivek při RH 10%

Graf 5.13b Porovnání kalibračních křivek při RH 50%

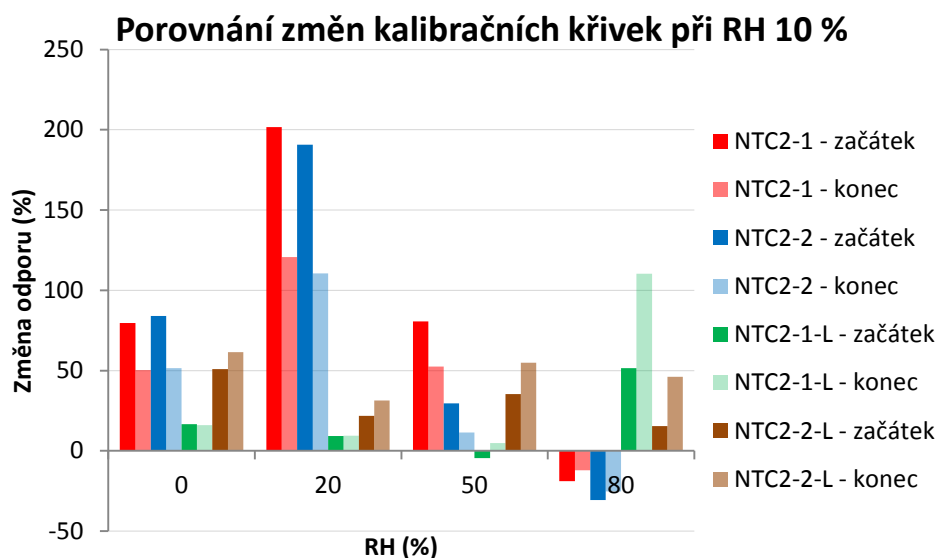


Graf 5.14a Porovnání kalibračních křivek při RH 10%

Graf 5.14b Porovnání kalibračních křivek při RH 50%

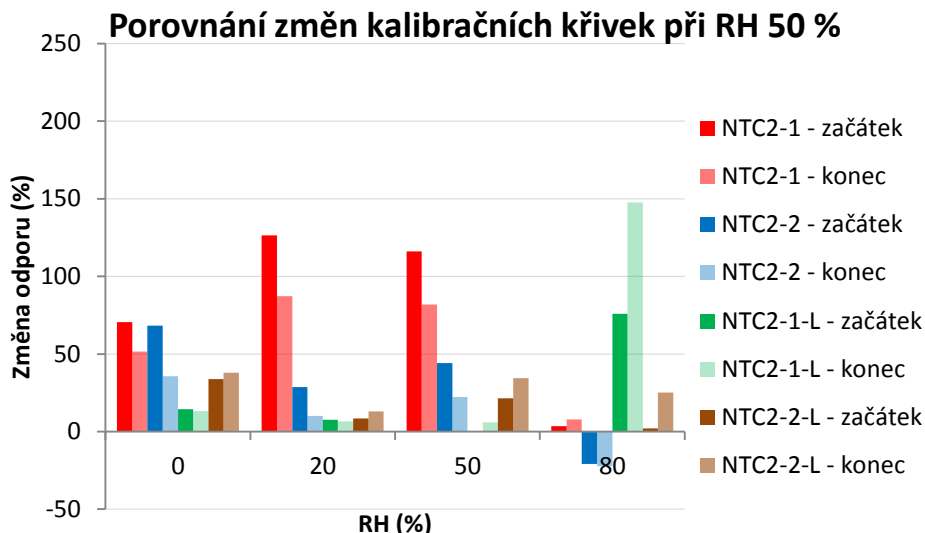
Na předchozích grafech (graf 5.11 – 5.14) je znázorněno porovnání kalibračních křivek před a po dlouhodobém stárnutí s ohledem na environmentální podmínky během dlouhodobého testu. Z grafů je možné vyzorovat, že obecně došlo vlivem stárnutí k posunu kalibračních křivek, co se odporu týče. Avšak přibližné průběhy kalibračních křivek byly zachovány.

Pro kvantifikaci posunu kalibračních křivek byly dále vyjádřeny relativní změny odporu jejich počátečního bodu ($T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) a koncového bodu ($T = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Postup vyhodnocení těchto hodnot probíhal tak, že došlo k odečtení hodnoty odporu na počátku kalibrační křivky před stárnutím od hodnoty na počátku kalibrační křivky po stárnutí. Výsledná hodnota byla vztažena k hodnotě odporu na počátku kalibrační křivky před stárnutím, ta ještě byla přenásobena 100x pro získání změny odporu v procentech. Tento samý postup byl zvolen i při hodnotách na konci kalibrační křivky.



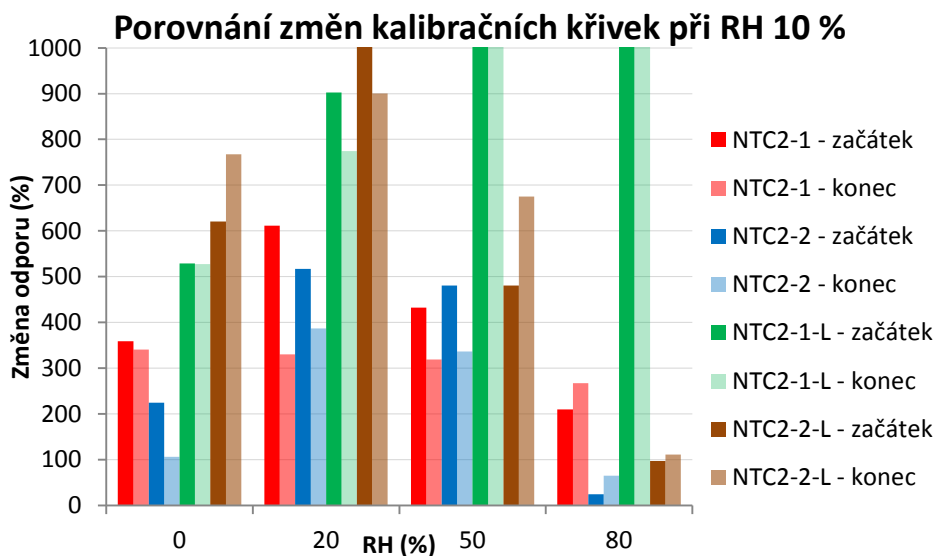
Graf 5.15 Změny odporu kal. křivek změřených při RH 10 % po dlouhodobém stárnutí při teplotě $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Z grafu 5.15 je patrné, že formulace NTC2-2-L vykazuje nejvyšší stabilitu všech testovaných variant termistorů. Ovšem i tato sada vykazovala poměrně značné rozdíly počátečních a koncových hodnot kalibračních křivek. Z tohoto porovnání lze konstatovat, že vzorky, které byly potaženy laminací, jsou stabilnější než vzorky nechráněnou termosenzitivní vrstvou.

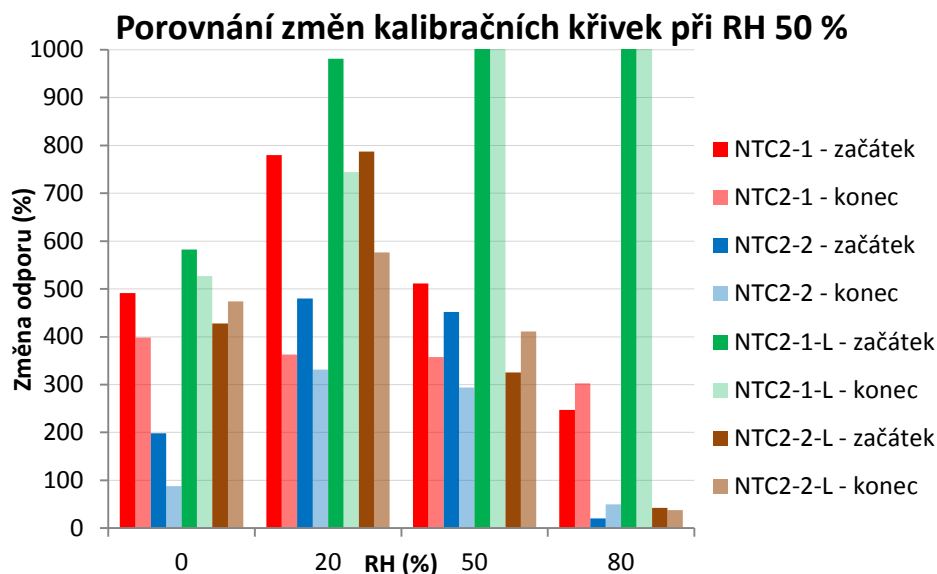


Graf 5.16 Změny odporu kal. křivek změřených při RH 50 % po dlouhodobém stárnutí při teplotě 40 °C

Graf 5.16 popisuje vzájemné změny odporu kalibračních křivek při relativní vlhkosti 50 %. Při vizuálním porovnání s předchozím grafem 5.15 lze konstatovat, že změny odporu při porovnání jsou lepší pro změny při RH 50%, vyjma formulace NTC2-1-L. Opět jako nejstabilnější vychází řada NTC2-2-L.



Graf 5.17 Změny odporu kal. křivek změřených při RH 10 % po dlouhodobém stárnutí při teplotě 60 °C



Graf 5.18 Změny odporu kal. křivek změřených při RH 50 % po dlouhodobém stárnutí při teplotě 60 °C

Grafy 5.17 a 5.18 jsou znázorněním toho, že testované vzorky nezvládly stárnutí při teplotě 60 °C, jelikož kvantifikované míry relativního posunu kalibračních křivek po stárnutí v prostředích s teplotou 60 °C vykazují násobně vyšší hodnoty než v případě stárnutí v prostředích s teplotou 40 °C. Opticky se jeví, že při stárnutí v RH 20 % a RH 50 % došlo k vyššímu posunu kalibračních křivek, než při stárnutí v RH 0 % a RH 80 %, ačkoliv dle kontroly vnitřních podmínek z vnitřního prostoru boxů s RH 20 % a RH 50 % vlhkost během stárnutí unikla. Žádný jasný trend tedy z grafů patrný není.

6 Zhodnocení testovacího a pracovního postupu

Následující kapitola zhodnocuje testovací postup z hlediska průkaznosti provedeného dlouhodobého testování stability flexibilních termistorů s odkazem na normy a testovací postupy, kterými renomovaní výrobci prokazují dlouhodobou stabilitu těchto součástí.

Dále je věnována zhodnocení pracovního postupu při sestavování testovacího aparátu a upravování enviroboxů. Dále navržení možné optimalizace pracovního postupu.

6.1 Zhodnocení z hlediska testovacího postupu

Zjevně nedostatečné je použití enviroboxů pro získání jednotlivých hodnot relativní vlhkosti, jelikož se ukázalo, že získání hermeticky uzavřeného prostoru, tudíž konstantních environmentálních podmínek (v tomto případě RH) se zcela nepovedlo. Použití těchto boxů je i v nesouladu s normami, je pro toto testování určena kalibrovaná klimatická komora.

Dále je nutné brát v potaz, že jednotlivé saturované roztoky solí mohou mít negativní účinky na termosenzitivní vrstvu (zejména u vzorků bez laminace) a může tedy dojít ke značnému zkreslení driftu během testu a kalibračních křivek po dlouhodobém stárnutí.

Doba 500 h pro dlouhodobé testování stability je poměrně krátká, pokud se tato doba porovná například s termistory od firmy QTI (sada konvenčních THT NTC termistorů T150), která ve svém white paperu uvádí, že testování provádí ve 4 různých teplotách po dobu až 12 000 h a vykazují drift v jednotkách desetin procent. Avšak neuvádí, dle jakých norem postupují. [14]

Oproti tomu firma Vishay prokazuje, že jejich konvenční SMD NTC termistory (typ 0402, 0603 a 0805) vykazují drift v řádech desetin procent po dobu testování 10 000 h. Pro toto testování vycházejí z norem EN 60068-2-2 a ČSN EN 60068-2-14. [15]

6.2 Návrh na optimalizaci testovacího postupu

Uvedené normy zabývající se klimatickými testy uvádí, že testování pomocí environmentálních vlivů prostředí je nutné provádět v kalibrované klimatické komoře. Z tohoto hlediska je provedené laboratorní testování v nesouladu s normami. K testování v enviroboxech se muselo přistoupit z důvodu nedostatku klimatických komor. V tomto ohledu navrhuji k postupnému testování pouze v dostupných klimatických komorách vzhledem k větší časové náročnosti. Jelikož reprezentace hodnot environmentálních veličin je průkazná a zamezí se tak možnosti ovlivnění termosenzitivní vrstvy saturovanými

solnými roztoky.

Pro prokázání stability, která by byla srovnatelná s konvenčními termistory, je doba testování nepřijatelná. Tudíž při testování stability pro další, již více odladěné generace bych doporučil větší časový interval dlouhodobého testování.

Ale vzhledem k faktu, že předložené experimentální vzorky termistorů nejsou zcela optimalizovány z pohledu dlouhodobé stability, je možné na ně v první (odladovací) fázi aplikovat výrazně nižší kritéria při srovnání s masově vyráběnými (odladěnými) termistory. To ostatně potvrzují i dosažené výsledky, které i v omezeném časovém rozsahu poukazují na zcela nevyhovující stabilitu většiny vzorků.

6.3 Zhodnocení z hlediska pracovního postupu

Pájení THT součástek proběhlo bez větších problémů, dostupné pájecí stanice měly dostatečně úzké hroty pro zajištění kontaktu mezi konektory a deskou. Taktéž dopadlo i pájení SMD konektorů, kdy pomocí šablony došlo k přesnému nanesení pájecí pasty na vodivé plošky, tudíž nedocházelo ke zkratům mezi piny. Pouze nanášení pasty bylo poněkud složitější, jelikož namísto těrky byl k dispozici pouze nůž. Největším problémem bylo osazování pogopinů, které vyžadovalo značnou manuální zručnost a bylo časově poměrně značně náročné. Docházelo například k zatékání pasty do pogopinů při přetavování v peci, což mělo za příčinu úplné zničení této kontaktní součástky, bylo nutné na dispensoru nastavit správné dávkování pasty pro eliminaci této chyby. Dále docházelo k vychylování pogopinu, kdy nebyl přikontaktován na DPS kolmo, tudíž při pokusu o měření s touto deformací docházelo k tomu, že pogopin sjížděl po flexibilní fólii a nebylo možné udržet kontakt s kontaktní ploškou termistoru. Také docházelo k degradaci pomocných centrovacích desek z materiálu FR4. To způsobovalo nepřesné napájení pogopinu na desku, tudíž se po optické inspekci musely přepájet ručně.

Co se týče přítlačných přípravků pro kontaktování termistorů, došlo k několika obměnám. První verze těchto přípravků nevykazovaly dostatečný přítlak na pogopiny, tudíž docházelo k přerušení kontaktu. K tomuto zjištění se došlo při měření testovacích fólií osazených SMD odpory. Poté došlo ke zmenšení vzájemných úchytných zářezek, což mělo za příčinu zvýšení přítlačné síly. Dále docházelo k vychýlení kontaktních plošek panelu termistorů od pogopinů. Největším problémem těchto přípravků byla ovšem elasticita a křehkost materiálu ABS. Při vzájemném zacvakávání přípravků docházelo k praskání zářezek a tudíž k znehodnocení funkčních vlastností. Posledním problémem u těchto prvků byl nepřesný výtisk 3D tiskárny, který byl způsoben průvanem v laboratoři.

Při zhotovování enviroboxů docházelo k prohýbání vík při frézování otvorů na CNC fréze, to mělo za důsledek, že otvory byly často nepřesné a o to těžší bylo zasílikonování těchto nepřesností, což se také projevilo.

6.4 Návrh na optimalizaci pracovního postupu

Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.3, v pracovním postupu jsou určité mezery. V této části práce jsou návrhy na optimalizaci, které by bylo možné provést.

Pro zkvalitnění a urychlení výroby desek s pogopiny by bylo stěžejní navrhnouti nového centrovacího přípravku, pokud možno s jiným druhem materiálu, který je schopen vydržet dané teploty v několika po sobě jdoucích cyklech.

U přípravků z 3D tiskárny by bylo dobré vytvoření lemu na vnitřní straně přípravků ve formátu jednotlivých panelů termistorů pro lepší uchycení. Dále výběr jiného materiálu s lepšími vlastnostmi, aby bylo možné jednotlivé přípravky používat v horizontu několika desítek až stovek měření a nedocházelo by k možnému praskání při zacvakávání. V neposlední řadě by bylo užitečné zhotovit nějaký kryt přes 3D tiskárnu, což by eliminovalo možné nepřesnosti tisku.

U zhotovování enviroboxů by bylo možné zkusit vyhledat, zda-li není možné získat boxy, které mají rovná víka. Tímto by se podchytily nepřesnosti spojené s následným frézováním otvorů. Dalším návrhem je postupné testování v klimakomoře (viz kap. 6.2).

Z hlediska funkčnosti se podařilo sestrojít testovací sestavu, která prokázala, že s její pomocí je možné testovat vzorky flexibilních termistorů.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámení se s problematikou flexibilních NTC termistorů. Dále výběr a nastudování norem týkajících se testováním termistorů a testováním pod environmentálními vlivy prostředí. K tomu byly použity povětšinou normy ČSN 60068 a její podnormy, které definují postupy a kritéria při testování klimatickými zkouškami. Pomocí těchto norem byl nastolen plán testování. Následně byl tento plán upraven vzhledem k dostupné technice.

Pro měření bylo nutné sestavit testovací aparát, který je schopen automatizovaně odečítat hodnoty při měření. Tato sestava byla poměrně náročná na sestavení, tudíž bylo nutné prokázat manuální zručnost. Po sestavení aparátu došlo k jeho otestování pomocí SMD rezistorů nakontaktovaných na flexibilních fóliích. Po zjištění, že daný aparát funguje, bylo přistoupeno k osazování kontaktovacích desek poskytnutými flexibilními NTC termistory z Univerzity Pardubice. Během těchto úkonů se podařilo opatřit recepty pro namíchání roztoků, které měly simulovat určité stupně vlhkosti. Následně byly tyto roztoky namíchány v enviroboxech. Počáteční měření proběhlo s výbornými výsledky, kdy se s přesností v jednotkách procent podařilo nasimulovat daná prostředí. Avšak po dlouhodobém testování bylo zjištěno, že v peci s teplotou 60 °C a enviroboxech s relativní vlhkostí 20% a 50% došlo k rapidnímu poklesu vlhkosti, tudíž získaná data z měření stárnutí v těchto podmínkách nebyla validní.

Prvním testem bylo měření v klimatické komoře pro získání kalibračních křivek před dlouhodobým stárnutím. Vzorokly vykazovaly mírnou, avšak ne zanedbatelnou hysterézi.

Dále bylo přistoupeno k dlouhodobému stárnutí ve dvou pecích Memmert UF55m při teplotách 40 °C a 60 °C a relativních vlhkostech 0 %, 20 %, 50 %, 80% po dobu 500 hodin.

Po dokončení testu stárnutí došlo k opětovnému testování v klimatické komoře pro získání kalibračních křivek po dlouhodobém testování. Tento test byl proveden přesně jako měření v klimatické komoře před stárnutím. Na přesnost obou testů se kladla důslednost kvůli porovnání kalibračních křivek při stejných podmínkách.

Nejdůležitější úlohou praktické části této diplomové práce pro získání relevantních hodnot bylo zpracování a vhodné vyhodnocení velkého množství naměřených dat. U této části bylo nutné dobře pracovat se statistickými funkcemi pro dosažení co nejpřesnějších a nejprůkaznějších výsledků. Data byla následně zpracována do grafů pro zajištění větší

přehlednosti. Pro názornost byly většinou vybrány bodové XY grafy a grafy sloupcové.

Co se samotných výsledků týče, jako nejlepší volbou vyšly flexibilní NTC termistory s formulací NTC2-2-L, čili s laminovanou vrstvou (enkapsulací) termosenzitivní vrstvy. Vzhledem k tomu, že prostředí v enviroboxech pro teplotu 60 °C nebylo stabilní a vzorky celkově v této teplotě neobstály, pracovalo se spíše s výsledky pro teploty 40 °C a hodnot relativních vlhkostí 0 %, 20 %, 50 % a 80%. Průběhy těchto termistorů při dlouhodobém stárnutí vykazovaly nejmenší drift v hodnotách jednotek procent. Avšak při závěrečném měření kalibračních křivek bylo zjištěno odlišné chování, než bylo změřeno před stárnutím. I přesto tento druh termistorů jasně předčil ostatní formulace.

Co se týče míry driftu v jednotlivých prostředích tak zmíněná formulace termistorů NTC2-2-L vykazuje nejnižší hodnotu míry driftu při teplotě 40 °C a RH 80 %, kde je tato hodnota přibližně 5,5 %. V ostatních relativních vlhkostech při teplotě 40 °C dosahuje míry driftu přibližně 10 %.

Druhá nejlepší formulace, co se míry driftu týče, byla formulace NTC2-1-L. Tento druh termistorů vykazuje nejnižší hodnoty driftu při teplotě 40 °C a RH 50 %, kde došlo k zápornému driftu přibližně -5 %. Při teplotě 40 °C a RH 0 % a 20 % byla hodnota driftu přibližně 10 %. Tudíž NTC2-1-L neobstál pouze při teplotě 40 °C a RH 80 %, kde došlo ke značnému driftu 111%.

Termistory s formulací NTC2-1 obstály v prostředí při teplotě 40 °C a RH 80 %, kde došlo k uspokojivé míře driftu 8%. Ostatní hodnoty byly vysoko nad stanovenou přijatelnosti hodnotu (15 %).

Termistory s formulací NTC2-2 při teplotě 40 °C obstály při RH 20 % a 50 %, kde byla hodnota míry driftu pod stanovených 15 %. V ostatních podmínkách neobstály.

Termistory testované v teplotě 60 °C a RH 0 %, 20 %, 50 % a 80 % vykazovaly míru driftu v řádech stovek procent, což je vysoce nepříjemné. Výjimkou byla formulace NTC2-2, která v prostředí RH 80 % vykazovala míru driftu 19 %. Avšak i to je nad uvedenou hodnotu přijatelnosti.

Kalibrační křivky po stárnutí měly vzhledem ke kalibračním křivkám z testu před stárnutím stejný tvar, avšak ve většině případů došlo ke značnému zvýšení odporu. Nejnižší zvýšení odporu došlo u sady NTC2-2-L, která prokázala svoji stabilitu.

Z výše uvedených odstavců lze tedy určit, za jakých podmínek lze termistory provozovat a s jakou očekávatelnou mírou jejich driftu. Rozhodně je třeba konstatovat, že zjištěné vlastnosti experimentálních vzorků termistorů nesnesou přímé srovnání s vysoce

odladěnými konvenčními termistory (míra driftu v řádech desetin %) a jedná se jen o dílčí vývojový stupeň. Hlavním důvodem jejich potenciálního použití oproti konvenčním variantám jsou zejména charakteristiky vázané k jejich specifickému fyzickému formátu, tzn. nízká tloušťka, flexibilita, a větší měřicí plocha.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] ŠPRINGL, Vít. Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty. *Vyvoj.hw.cz: profesionální elektronika* [online]. 2004 [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [2] *Termistor* [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: http://www.et-pocitacovesystemy.wz.cz/elektronicke_soucastky/termistor.html
- [3] Termistory. *ELUC* [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/615>
- [4] FRADEN, Jacob. Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications [online]. 2016. ISBN 9783319193038. Získáno z: doi:10.1007/978-3-319-19303-8
- [5] NTC Thermistors Steinhart and Hart Equation. *Circuit protection thermistors* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.ametherm.com/thermistor/ntc-thermistors-steinhart-and-hart-equation>
- [6] *Thermistor Basics: What is a thermistor?* [online]. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.teamwavelength.com/thermistor-basics>
- [7] PETR, Kačírek. Materiály pro rezistory integrované ve flexibilních propojovacích strukturách. B.m., 2015. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] Pech, Tadeáš. *Metody charakterizace organických tranzistorů*. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. FEL ZČU Plzeň. Vedoucí práce Ing. Lukáš Mraček.
- [9] ŠULC, Michal. *Charakterizace tištěných flexibilních termistorů*. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. FEL ZČU Plzeň. Vedoucí práce Ing. Silvan Pretl Ph.D.
- [10] KOTORA, Jan. *Testování stability NTC termistorů*. Plzeň, 2018. Diplomová práce.

FEL ZČU Plzeň. Vedoucí práce Ing. Silvan Pretl Ph.D.

[11] NOVOTNÝ, Radovan. Analýzy vad při zabezpečování spolehlivosti elektronických součástek. *Elektrorevue* [online]. Brno, 2001, 2001/28 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01028/index.html>

[12] Vanová křivka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vanov%C3%A1_k%C5%99ivka

[13] 023-259631.pdf. In: *Mouser* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/273/023-259631.pdf>

[14] *T150 Series Stability* [online]. In: . s. 3 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.thermistor.com/wp-content/uploads/2018/12/t150-series-stability.pdf>

[15] *Ntcs-e3-smt_vmn-pt0283.pdf* [online]. In: . s. 2 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: https://www.vishay.com/docs/49498/ntcs-e3-smt_vmn-pt0283.pdf

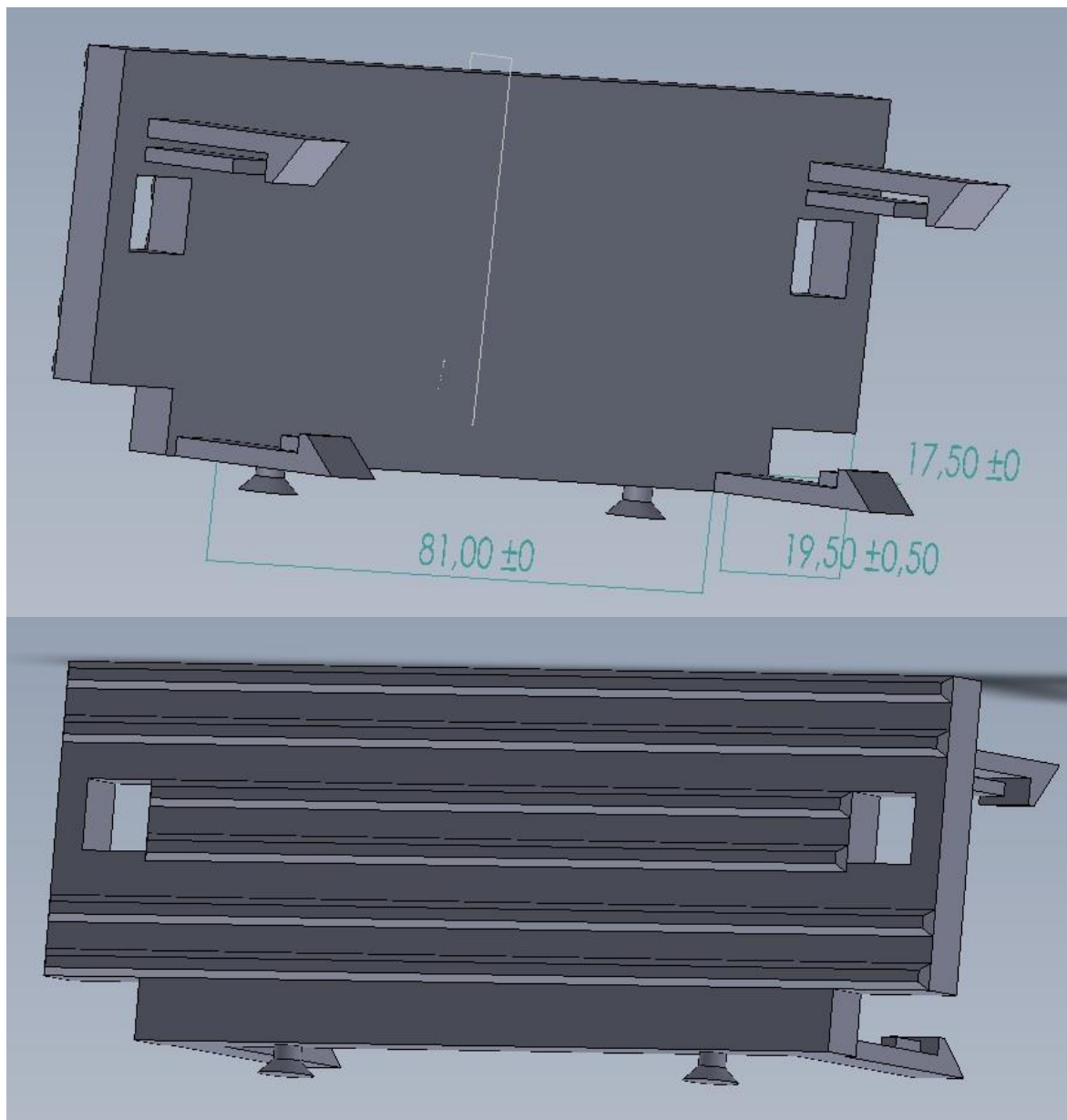
Seznam příloh

A: Výkresy a 3D modely přítlačných přípravků vytištěných na 3D tiskárně.

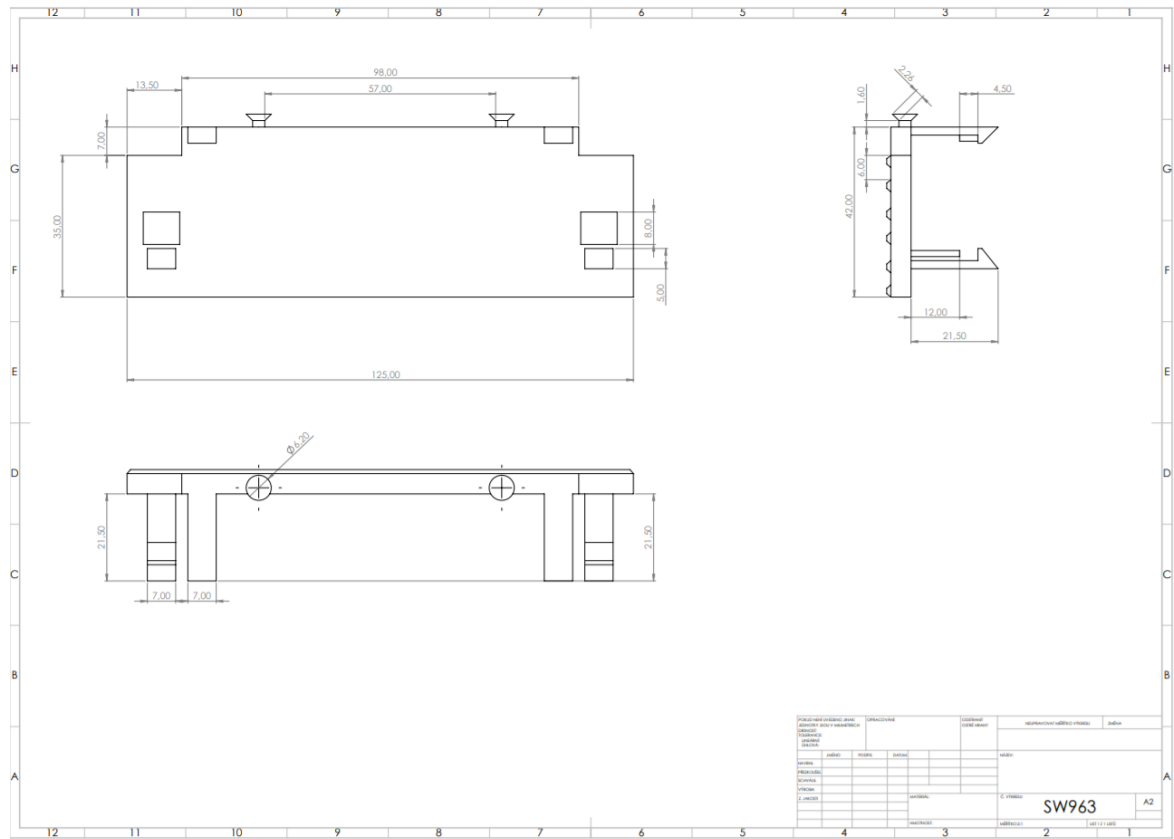
B: Porovnání kalibračních křivek pro RH 10 % a RH 50 % pro flexibilní NTC termistory ve formulacích NTC2-1, NTC2-2, NTC2-1-L a NTC2-2-L.

Příloha A

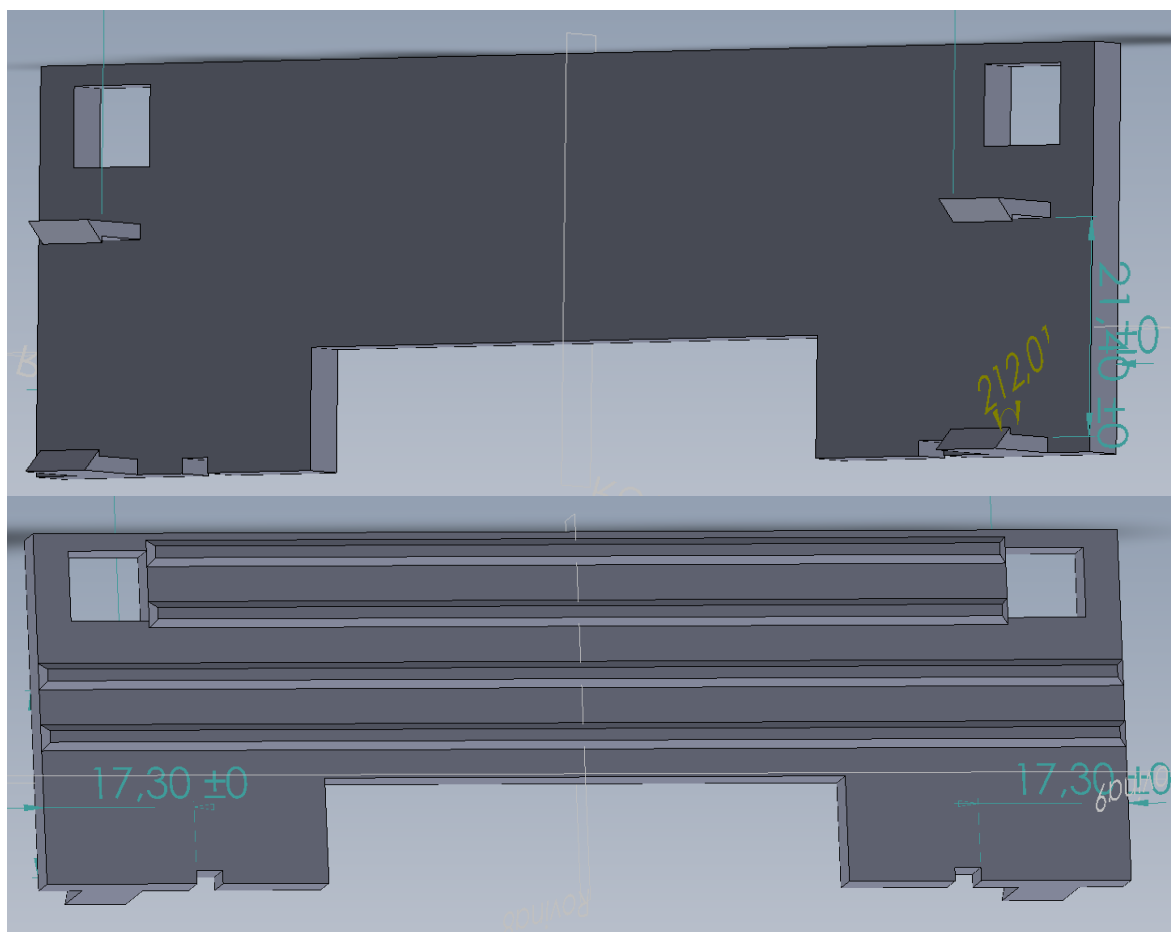
Výkresy a 3D modely přítlačných přípravků vytištěných na 3D tiskárně.



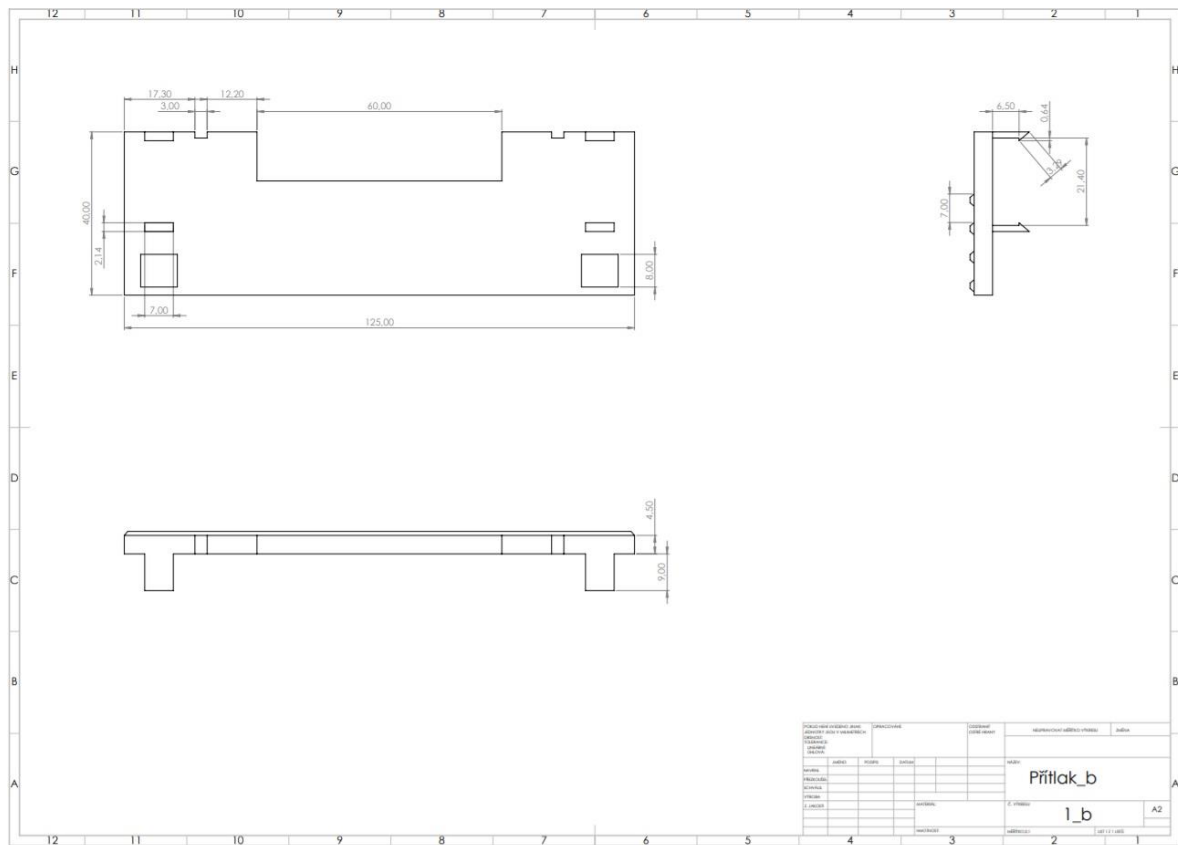
Přední a zadní pohled první části 3D modelu přítlačných desek



Výkres první části 3D modelu přítlačných desek



Přední a zadní pohled druhé části 3D modelu přitlačných desek



Výkres druhé části 3D modelu přítlačných desek

Příloha B

Porovnání kalibračních křivek pro RH 10 % a RH 50 % pro flexibilní NTC termistory ve formulacích NTC2-1, NTC2-2, NTC2-1-L a NTC2-2-L.

