

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Testování tištěných senzorů teploty pro aplikace
v precizním zemědělství**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin JANDA**
Osobní číslo: **E18N0005P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Testování tištěných senzorů teploty pro aplikace v precizním zemědělství**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování

1. Popište problematiku testování senzorů teploty pro použití ve venkovním prostředí včetně měření v zemině.
2. Navrhněte plán testování senzorů teploty pro aplikace v oblasti precizního zemědělství s využitím dostupné laboratorní infrastruktury.
3. Na vybraných vzorcích experimentálních senzorů teploty prakticky ověřte navržený testovací plán.
4. Analyzujte získané výsledky a zhodnoťte využitelnost testovaných teplotních senzorů.



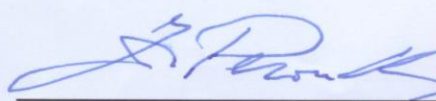
Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

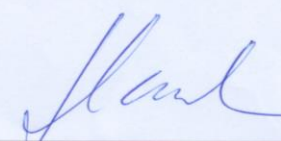
1. ČSN EN 60068 Zkoušení vlivů prostředí
2. J. G. Webster and H. Eren, Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement, 2nd ed. CRC Press, 2014.
3. J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, 5th ed. Cham: Springer International Publishing, 2016.
4. N. Pascoe, Reliability Technology: Principles and Practice of Failure Prevention in Electronic Systems. Wiley, 2011.

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

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




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

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na testování tištěných senzorů teploty pro použití v precizním zemědělství. Popisuje základní principy precizního zemědělství a souvislost se senzory teploty. Práce dále popisuje vlastnosti termistorů a možnosti testování enviromentálních vlivů. Představuje testovací plán pro zhodnocení vlastností různých tištěných termistorů. Dále se věnuje rozboru výstupů testovacího plánu. Nakonec zkoumá možnosti aplikace matematických modelů na dané senzory.

Klíčová slova

Termistor, Tištěná elektronika, Flexibilní elektronika, Senzor teploty, Klimatické testování, Precizní zemědělství.

Abstract

The master thesis is focused on testing of printed temperature sensors for usage in precision agriculture. Basic principles of precision agriculture and connections with temperature sensors are described. Thesis also describes main properties of thermistors and possibilities of environmental effects testing. A test plan for evaluation of properties of different printed thermistors is introduced. Then outputs of the test plan are discussed. Also possibilities of mathematical models applicability are examined.

Key words

Thermistor, Printed Electronics, Flexible Electronics, Temperature Sensor, Climate Testing, Precision Agriculture.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 17.6.2020

Martin Janda

Poděkování

Poděkování patří vedoucímu práce Ing. Silvanovi Pretlovi Ph.D., jehož profesionální přístup a systematické vedení práce spolu s množstvím rad bylo ceněnou pomocí. Dále bych rád věnoval poděkování doc. Ing. Tomášovi Syrovému, Ph.D. za realizaci testovaných termistorů.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TEPLOTA V PRECIZNÍM ZEMĚDĚLSTVÍ	11
1.1 SENZORY TEPLoty	12
1.2 PRECIZNÍ ZEMĚDĚLSTVÍ.....	13
2 TERMISTORY	15
2.1 PARAMETRY TERMISTORŮ.....	16
2.2 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ TERMISTORŮ	16
2.2.1 Jednoduchý model	17
2.2.2 Fradenův model.....	19
2.2.3 Steinhartův a Hartův model.....	20
2.3 TECHNOLOGIE VÝROBY TERMISTORŮ.....	21
3 VLIVY PROSTŘEDÍ A JEJICH TESTOVÁNÍ	23
3.1 TEPLOTA PŮDY	23
3.2 IN – SITU TESTOVÁNÍ	25
3.3 NORMALIZOVANÉ TESTOVÁNÍ.....	26
3.3.1 Soubor norem ČSN EN 60068	27
4 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ TIŠTĚNÝCH TERMISTORŮ	39
4.1 NÁVRH TERMISTORŮ	39
4.2 TESTOVACÍ PLÁN.....	43
4.2.1 Výchozí a závěrečná kalibrace	44
4.2.2 Dlouhodobé stárnutí.....	46
4.2.3 Optická inspekce a matematický model.....	46
4.3 PŘÍPRAVA PŘED MĚŘENÍM	47
4.3.1 Zapouzdření.....	47
4.3.2 Značení senzorů a zapojení měřících kanálů.....	47
4.3.3 Kabeláž a použité přístroje.....	50
5 REALIZACE A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	52
5.1 REALIZACE EXPERIMENTU.....	52
5.1.1 Měření výchozí a závěrečné kalibrace.....	52
5.1.2 Dlouhodobé stárnutí a zapouzdření.....	53
5.2 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT	54
5.2.1 Analýza dlouhodobého stárnutí	54
5.2.2 Analýza teplotní části kalibrace.....	62
5.2.3 Analýza vlhkostní části kalibrace	69
5.2.4 Optická inspekce.....	73
5.2.5 Matematický model.....	78
6 DISKUSE	89
6.1 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ TESTOVÁNÍ	89
6.2 ZHODNOCENÍ TESTOVACÍHO PLÁNU	92
6.3 VYUŽITELNOST TESTOVANÝCH SENZOROVÝCH ELEMENTŮ.....	93
ZÁVĚR	94
SEZNAM LITERATURY	96

SEZNAM PŘÍLOH	98
PŘÍLOHA A	99
PŘÍLOHA B.....	100
PŘÍLOHA C	103
PŘÍLOHA D	104
PŘÍLOHA E.....	109
PŘÍLOHA F.....	112
PŘÍLOHA G	116

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na testování experimentálních tištěných termistorů s účelem zhodnocení jejich využitelnosti v zemědělských aplikacích. Důvody využití tištěných termistorů jsou popsány v první kapitole věnující se obecnému popisu precizního zemědělství.

Druhá kapitola předložené práce je zaměřena na základní popis termistorů, dále jsou rozebrány možnosti charakterizace termistorů pomocí matematických modelů. Nakonec jsou stručně popsány technologie výroby termistorů.

V třetí kapitole je diskutována problematika testování vlivu enviromentálních podmínek včetně případného nasazení senzorů v půdě. Je zde rozebrán mechanismus ohřevu půdy a dále jsou představeny jednotlivé normalizované testy pro testování vlivů. Z údajů v této kapitole je pak vycházeno při návrhu testovacích procedur.

Čtvrtá kapitola rozebírá potřebné přípravy pro měření od návrhu a popisu výroby termistorů, přes popis testovacího plánu až po přípravu měřících pomůcek.

Pátá kapitola již popisuje realizaci měření. První část je věnována zapojení experimentů. Druhá část se pak zabývá detailním rozbořením naměřených dat a jejich analýzou. V poslední části kapitoly je zkoumána možnost aplikace matematických modelů.

V závěrečné kapitole jsou shrnuty výsledky z jednotlivých částí testování, dále je diskutována využitelnost testovaných senzorů a testovacího plánu. Součástí je návrh budoucích experimentů.

Seznam symbolů a zkratk

A	Konstanta materiálu a tvaru termistoru (-)
b	Koeficient Steinhartova-Hartova modelu (-)
B	Konstanta materiálu a tvaru termistoru (-)
d	Šířka elektrodové mezery (m)
l	Délka elektrodové mezery (m)
n	Počet elektrodových mezer (-)
R	Elektrický odpor (Ω)
$R_{0,ref}$	Referenční odpor (Ω)
R_{20down}	Odpor při teplotě 20 °C na sestupné křivce (Ω)
R_{20up}	Odpor při teplotě 20 °C na vzestupné křivce (Ω)
RH.....	Relativní vlhkost (%)
R_t	Odpor termistoru (Ω)
SQ.....	Počet čtverců (-)
t	Teplota (°C)
T	Termodynamická teplota (K)
T_0	Referenční termodynamická teplota (K)
α_r	Teplotní součinitel odporu (K^{-1})
β	Materiálová konstanta teploty (K)
γ	Sklon (K^{-1})
ČSN.....	Česká technická norma
CH.....	Kanál
ENIG.....	Electroless Nickel immersion Gold
NTC.....	Negativní teplotní koeficient
OLED.....	Organic Light Emitting Diode
PTC.....	Pozitivní teplotní koeficient
SI.....	Système international

1 Teplota v precizním zemědělství

Teplota patří mezi základní veličiny sloužící k popisu stavu hmoty pomocí termodynamických vlastností a je základní veličinou soustavy SI [1]. Vyjadřuje míru kinetické energie pohybujících se částic hmoty [1]. Základní stupnicí pro vyjádření teploty je termodynamická, či Kelvinova stupnice. Nulová teplota dle této stupnice se nazývá absolutní nulou, jedná se o teoretický stav, kdy ustává veškerý pohyb ve sledované hmotě a jde o číslo teoretické, kterého dle třetího termodynamického zákona nelze dosáhnout, avšak lze se mu přiblížit [1]. Další významný bod termodynamické stupnice je $T = 273,16$ K. Tato hodnota byla odvozena od trojného bodu vody a slouží pro definici Kelvinovy stupnice dle SI [1]. Teplotu lze určovat i jinými stupnicemi, pro použití v našich končinách je nejbližší stupnice Celsiova. Hodnota $T = 273,16$ K na termodynamické stupnici odpovídá teplotě $t = 0,01$ °C a změna o jeden Kelvin odpovídá změně o jeden stupeň Celsiovy stupnice [1]. Na základě těchto údajů lze stanovit převodní vztahy mezi termodynamickou a Celsiovou stupnicí následovně:

$$\Delta 1 K = \Delta 1 ^\circ C \quad (1.1)$$

$$T = t + T_0 = t + 273,15 \quad (1.2)$$

Kde T je termodynamická teplota v Kelvinech a t je teplota dle Celsiovy stupnice ve °C.

Teplotu lze měřit pouze nepřímou metodou [1, 2]. Historicky první a rozšířená metoda měření teploty je pomocí závislosti tepelné roztažnosti látek na teplotě [2]. Pro elektrická měření se používají senzory, které umožňují přeměnu údaje o teplotě na měřitelný elektrický signál [2]. Měřící element musí být vždy svázán s měřeným objektem [2]. Svázání si lze představit jako přenos malého množství tepla mezi objektem a senzorem tak, aby generovaný signál odpovídal teplotě měřeného objektu [2]. Mezi měřícím elementem a měřeným objektem tedy probíhá tepelná výměna a element se ohřívá, či ochlazuje na teplotu měřeného objektu [2].

Z toho plyne, že metoda vnáší do měření alespoň minimální chybu, protože ovlivňuje měřený objekt [2].

Teplota patří mezi jednu z nejsledovanějších veličin, spousta vlastností látek, či dějů je na teplotě svým chováním závislá [1]. Teplota hraje roli i při optimalizaci technologických procesů. Měření teploty se dnes objevuje ve všech možných oblastech lidské činnosti, včetně zemědělství.

1.1 Senzory teploty

Senzorem teploty se rozumí vstupní prvek měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím [1]. Dle fyzikálního principu měření lze rozdělit způsoby na odporové, termoelektrické, polovodičové, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické [1, 2]. Senzory teploty lze charakterizovat také způsobem styku s prostředím jako dotykové a bezdotykové [1, 2]. Další rozlišení je na senzory absolutní a relativní, absolutní senzor měří teplotu vztaženou k nějaké konstantě (typicky k absolutní nule), relativní senzor měří rozdíl teploty dvou objektů [1, 2]. Další rozdělení je podle transformace signálu na aktivní a pasivní [1]. Aktivní senzor se působením teploty chová jako zdroj elektrické energie, do této skupiny patří termoelektrické články [1, 2]. Pasivní senzor potřebuje napájení pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu [1]. Mezi běžné senzory teploty patří odporové, termoelektrické a polovodičové [1, 2]. Odporový snímač teploty pracuje na principu teplotní závislosti odporu materiálu [1–3]. Odporové snímače se vyrábí z kovů, například platiny, niklu, či mědi [1, 3]. Platinový senzor má závislost odporu na teplotě lineární, snímače z niklu vykazují nelinearitu [1]. Niklový snímač je oproti platinovému citlivější a má rychlejší odezvu [1]. Termoelektrický snímač využívá Seebeckova jevu pro převod tepelné energie na elektrickou [1, 2]. Termoelektrický snímač se nazývá termočlánek a skládá se ze dvou rozdílných vodičů, či polovodičů [1, 2]. Materiály termočláneku jsou na obou koncích spojeny a v takto uzavřeném obvodu protéká elektrický proud za předpokladu, že má každý z konců jinou teplotu, v případě rozpojení lze na rozpojených koncích odebírat napětí úměrné teplotě [1, 2]. Polovodičové senzory využívají závislost odporu materiálu na teplotě, podobně jako senzory odporové, tyto senzory se nazývají termistory [1, 2].

Protože v praktické části této práce budou měřeny výhradně termistory, bude se teoretická část dále zabírat pouze tímto druhem senzorů.

1.2 Precizní zemědělství

Současné zemědělství je na prahu revoluce v podobně takzvaného precizního zemědělství, či zemědělství 4.0. Spolu s růstem populace se zvyšují nároky na výrobu zemědělských produktů a zároveň vyvstávají požadavky na šetrné a udržitelné hospodaření. V současném zemědělství jsou tedy protichůdné tendence, na jednu stranu je snaha maximalizovat zisk a výnosnost, na druhou stranu je třeba minimalizovat vliv na životní prostředí [4]. Zároveň se zemědělství potýká a bude v budoucnu potýkat s nedostatkem půdy, s klimatickými změnami, nedostatkem vody, půdní erozí a dalšími negativními vlivy [4]. V zemědělském sektoru se začala postupně prosazovat digitalizace odvětví a nasazení moderních technologií, které vedou ke zvýšení efektivity [4–6]. V oblasti rostlinné výroby se používá trojice přístupů monitorování prostředí a sice satelitní snímkování, on-the-go senzory a in situ sensorika [4, 6, 7]. Satelitní snímkování umožňuje plošnou analýzu půdy a rostlin [6]. On-the-go senzory mohou být umístěny na pohyblivých zařízeních, jako jsou traktory, nebo drony [6].

In situ sensorika zahrnuje pokrytí oblasti senzory pro měření parametrů [6]. In situ měření umožňuje monitoring v reálném čase, aniž by musel být v lokalitě přítomný pracovník [4, 6, 7]. Senzory mohou monitorovat vlastnosti půdy jako je teplota, vlhkost, salinita, obsah látek, ale také vlastnosti rostlin [4, 6, 7]. Pro spolehlivé monitorování je třeba senzory rozmístit v husté síti jak po ploše, tak do hloubky, proto je třeba vývoj senzorů, které budou levné a zároveň budou umožňovat jednoduché použití a ekologickou likvidaci [5, 6]. Masivní sběr dat a následnou analýzu lze realizovat pomocí technologií internetu věcí. Pro sběr dat je použito bezdrátových sítí LPWAN, které umožňují provoz s velmi nízkou spotřebou a zařízení tak mohou být napájena bateriově i několik let [5, 7]. V současnosti jsou v České republice provozovány sítě LoRaWAN, Sigfox a NB-IoT, které dosahují celoplošného pokrytí [5].

Pro účely uvedené v předchozím textu je vhodné využití senzorů vyrobených pomocí technologií tisknutelné elektroniky. Tisknutelná elektronika umožňuje depozici senzorů i na přírodní materiály, jako například dřevo, případně použití alternativních substrátů, které jsou ekologické [5]. Zároveň je výroba tisknutelné elektroniky rychlá a levná [5].

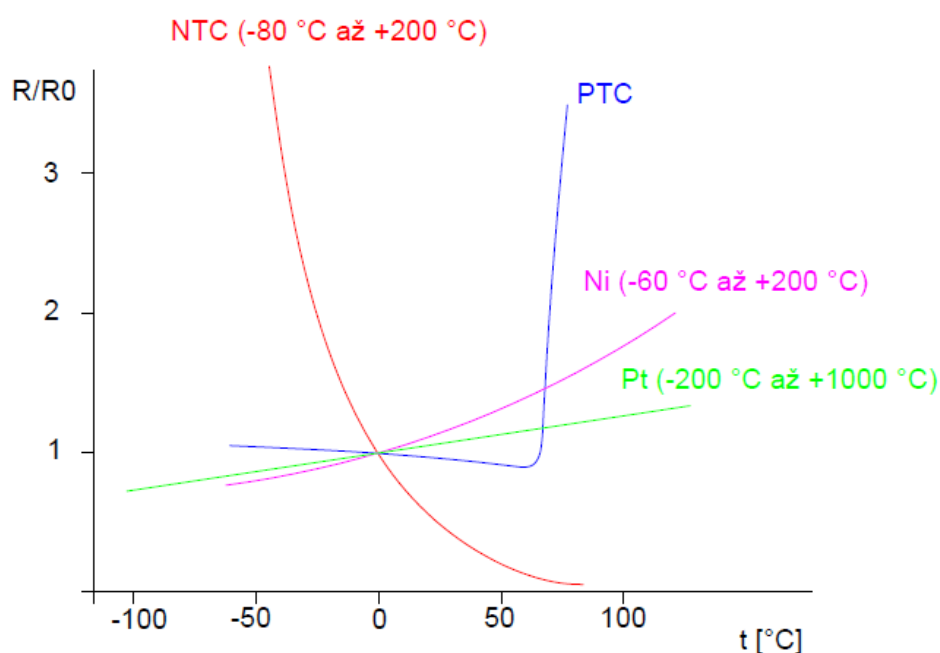
V souvislosti s rozvojem digitalizace odvětví se zvyšuje i míra automatizace a používají se progresivní metody pěstování rostlin v kontrolovatelném prostředí [7]. Historicky lze pěstování ve sklenících označit za určitou formu chytrého farmaření [7]. Dnes probíhá chytrá rostlinná výroba v obřích sklenících, ve kterých jsou kontrolovány parametry jako teplota, vlhkost, světlo a tlak a zároveň jsou tyto parametry alespoň částečně řízeny [7]. Zábor většího množství půdy je řešen vertikálním farmařením, které lze s úspěchem používat i v zástavbě [7]. Další vývoj směřuje k hydroponickému pěstování, tedy pěstování bez půdy, kdy jsou rostliny ve vodě s živinami, která je distribuována zavlažovacím systémem, což opět vede na velkou míru automatizace s využitím sensoriky [7]. Alternativou k hydroponii je aeroponické pěstování, při kterém rostliny přijímají živiny rozptýlené v atmosféře ve formě mlhy. Na *obrázku 1.1* níže je zobrazeno hydroponické vertikální pěstování salátu.



Obr. 1.1: Vertikální hydroponická farma. Převzato z: [8]

2 Termistory

Pojem termistor je vytvořen kombinací dvojice anglických slov Thermal a Resistor. Jedná se tedy o teplotně závislý odpor. Termistory se konvenčně vyrábějí z práškových oxidů kovů [1–3]. V poslední době se objevují nové druhy termistorů na bázi alternativních materiálů, vyrobené s využitím technologií tisknutelné elektroniky a s použitím organických materiálů, takové senzory lze označit jako experimentální. Termistory jsou absolutní senzory teploty [2]. Termistory lze rozdělit do dvou základních skupin a sice s kladným teplotním koeficientem, označováno zkratkou PTC, a s negativním teplotním koeficientem, označováno jako NTC [1–3, 9]. Odpor NTC termistoru klesá s rostoucí teplotou, u PTC je to naopak [1–3, 9]. Závislost je silně nelineární [1–3]. Tuto závislost lze matematicky modelovat, a tak odvodit vztah mezi teplotou a odporem. Na *obrázku 2.1* lze vidět porovnání charakteristiky termistorů s ostatními odporovými senzory teploty. Pro měření teploty jsou využívány převážně NTC termistory [1, 3], proto v navazujícím textu bude termistorem rozuměn NTC termistor.



Obr. 2.1: Porovnání charakteristiky termistorů s odporovými senzory teploty. Převzato a překresleno z: [1]

2.1 Parametry termistorů

Termistory lze charakterizovat jejich důležitými parametry, se kterými se následně lze setkat v průvodní dokumentaci. Mezi takové parametry patří jmenovitý odpor, maximální zatížitelnost, teplotní časová konstanta a maximální provozní teplota [9].

Jmenovitým odporem se rozumí odpor při teplotě $25\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$ za předpokladu zanedbatelného ovlivnění hodnoty odporu vlivem Joulových ztrát [9].

Maximální zatížitelnost je maximální příkon při definované teplotě prostředí 25 °C a při normálním atmosférickém tlaku vzduchu, hodnota je definována s ohledem na minimalizování ovlivnění měření vlivem Joulových ztrát [9].

Teplotní časová konstanta je čas změny teploty termistoru výměnou tepla s okolím o 63,2% za předpokladu skokové změny teploty [9].

Maximální provozní teplota je teplotou při které lze zaručit přijatelnou stabilitu parametrů [9].

2.2 Matematické modelování termistorů

Kvůli nelinearitě termistorů vyvstává problém s přesným určením teploty. Pro použití termistoru pro měření teploty je třeba znát jeho přenosovou funkci neboli vyjádření závislosti odporu na teplotě. I jednotlivé senzory stejného druhu mohou mít charakteristiku mezi sebou odlišnou. S variabilitou a nelinearitou senzorů se lze vypořádat matematickou analýzou. Existuje několik matematických modelů přenosové funkce termistorů. Při jejich používání je ale třeba pamatovat na to, že se stále jedná o aproximaci. Platí zde, že jednodušší model vede k nižší přesnosti [2]. Na druhou stranu použití složitějšího modelu s sebou nese složitější kalibraci, problematičtější použití senzoru v praxi a je výpočetně náročnější [2]. Představené modely vychází z experimentálně potvrzené skutečnosti, že logaritmus odporu termistoru R_t je vztažen k absolutní teplotě T podle následujícího výrazu [1, 2]:

$$\ln R_t = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3} \quad (2.1)$$

2.2.1 Jednoduchý model

Vyjdeme-li ze zmíněného výrazu (2.1) a uvažujeme-li pouze úzké pásmo teplot, můžeme za cenu určité ztráty přesnosti eliminovat poslední dva členy daného výrazu a přepsat jej tak do tvaru pro jednoduchý model termistoru [1, 2]:

$$\ln R_t \cong A + \frac{\beta}{T} \quad (2.2)$$

Kde A je bezrozměrnou konstantou, která je závislá na geometrickém tvaru a materiálu termistoru [1, 3]. Koeficient β se nazývá materiálová konstanta teploty a je určen v Kelvinech [1–3]. T je termodynamická teplota. Uvedený vztah (2.2) platí za předpokladu, že termistor není ohříván procházejícím proudem, nebo tento ohřev lze zanedbat [1, 3]. Pokud je znám odpor termistoru R_0 při kalibrační teplotě T_0 , lze definovat přenosovou funkci jako [1–3, 9]:

$$R_t = R_0 e^{\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2.3)$$

Vztah (2.3) je často používaným modelem termistoru v praxi [1–3]. Důvodem oblíbenosti je jednoduchá kalibrace, kterou stačí provést v jednom bodě (definován jako $[R_0, T_0]$) [2, 9]. Předpokladem pro použití daného modelu je známost materiálové konstanty teploty β [2]. Pokud materiálová konstanta teploty není známá, je třeba ji nejprve určit dle následujícího vztahem [1–3, 9]:

$$\beta = \frac{\ln \frac{R_1}{R_0}}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2.4)$$

Dvojice bodů $[T_0, R_0]$ a $[T_1, R_1]$ je použita pro výpočet materiálové konstanty teploty, tyto body leží na křivce definované vztahem (2.3) [2]. Materiálová konstanta teploty β je pro tento model uvažována jako teplotně nezávislá, i když dle vztahu (2.4) je na teplotě závislá [1–3].

Její hodnota se může pohybovat v rozsahu od 1500 K až do 7000 K [1, 3]. Dle doporučení DIN se měření pro její výpočet dle vztahu (2.4) provádí při teplotách $T_0 = 291,15$ K a $T_1 = 358,15$ K [1, 3]. Takto určená materiálová konstanta teploty β umožňuje měření teploty v rozmezí od 0 °C do 100 °C s chybou ± 1 K [1, 3]. Pokud je materiálová konstanta teploty β již určena, lze změřit odpor termistoru R_t a určit teplotu v Kelvinech výpočtem dle vztahu (2.4) upraveného do následujícího tvaru [1–3]:

$$T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln \frac{R_t}{R_0}}{\beta} \right)^{-1} \quad (2.5)$$

Chyba způsobená aproximací charakteristiky je malá v blízkém okolí kalibrační teploty T_0 , tato chyba narůstá se vzdáleností od kalibračního bodu [1, 2]. Materiálová konstanta teploty β sice vypovídá o zakřivení charakteristiky termistoru, ale není zde zahrnut teplotní součinitel odporu [1]. Vztah pro teplotní součinitel odporu je určen derivací vztahu (2.3), což lze po úpravě zapsat v následujícím tvaru [1–3]:

$$\alpha_r = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dT} = -\frac{\beta}{T^2} \quad (2.6)$$

Uvedený vztah (2.6) říká, že citlivost termistoru je závislá na materiálové konstantě teploty β i teplotním součiniteli odporu α_r . Termistor je více citlivý při měření nižších teplot, se zvyšující se teplotou citlivost klesá [1–3, 9]. Tento jev je graficky znázorněn na obrázku 2.1 na začátku kapitoly. Pro konvenční keramické termistory se hodnoty teplotního součinitele odporu pohybují v rozmezí od $-0,08$ °C⁻¹ až do $-0,02$ °C⁻¹ směrem od nižších teplot k vyšším [2]. Díky vysoké citlivosti termistoru lze získat velký rozdíl výstupní hodnoty signálu i při minimální změně teploty.

2.2.2 Fradenův model

Model navržený v roce 1998 Jacobem Fradenem, který dále rozvíjí předchozí jednoduchý model [2]. Fradenův model je založen na faktu, že materiálová konstanta teploty β není pro termistor konstantní, ale je teplotně závislá, jak bylo zmíněno u popisu rovnice (2.4) [2]. Charakter závislosti může být různý v závislosti na technologii výroby a druhu termistoru [2]. Za ideálních podmínek by materiálová konstanta teploty β neměla být na teplotě závislá a předchozí jednoduchý model je pak dostačující, ale toho nelze docílit, avšak lze ji považovat za konstantní v menším rozsahu teplot [2]. Fraden zavádí rovnici pro výpočet materiálové konstanty teploty β takto [2]:

$$\beta = A_1 + BT + \frac{A_2}{T} + \frac{A_3}{T^2} \quad (2.7)$$

Kde A a B jsou konstanty. Třetí a čtvrtý člen vztahu nabývá v porovnání s prvními dvěma malých hodnot, tyto členy lze zanedbat a přepsat tak vztah do tvaru [2]:

$$\beta = A_1 + BT \quad (2.8)$$

Materiálová konstanta teploty β je dle uvedeného vztahu (2.8) definována jako lineární funkce teploty. Tuto funkci lze aproximovat pomocí jednoho fixního bodu na definované teplotě T_b a sklonu γ , ze vztahu (2.8) pak lze přejít na tvar [2]:

$$\beta = \beta_b [1 + \gamma(T - T_b)] \quad (2.9)$$

Sklon γ lze určit dle následujícího vztahu [2]:

$$\gamma = \left(\frac{\beta_x}{\beta_y} - 1 \right) \frac{1}{T_c - T_a} \quad (2.10)$$

Kde β_x a β_y jsou dvě materiálové konstanty teploty při dvou teplotách T_a a T_c , které jsou stejně vzdálené od teploty T_b směrem nahoru a dolů [2]. Hodnota sklonu γ je závislá na materiálu termistoru a na výrobním procesu, proto

Ize předpokládat, že v rámci jedné výrobní šarže bude sklon γ velmi podobný [2]. Je tedy vhodné určit sklon γ pro více senzorů najednou, než u každého samostatně [2].

Po dosazení vztahu (2.9) do vztahu (2.2) lze přejít do tvaru:

$$\ln R_t \cong A + \frac{\beta_b [1 - \gamma(T_b - T)]}{T} \quad (2.11)$$

Řešením vztahu (2.11) pro odpor termistoru R_t lze dojít k přenosové funkci termistoru dle Fradenova modelu:

$$R_t = R_0 e^{\beta_b [1 + \gamma(T - T_0)] \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.12)$$

Uvedená rovnice (2.12) je podobná rovnici jednoduchého modelu (2.3), je zde navíc zavedena veličina sklon γ , která respektuje teplotní závislost materiálové konstanty teploty β . Tento model vyžaduje tři body charakteristiky pro určení sklonu γ , pro každý individuální senzor pak stačí dvoubodová kalibrace [2].

2.2.3 Steinhartův a Hartův model

Model byl představen v roce 1968 dvojicí vědců Johnem S. Steinhartem a Stanleyem R. Hartem. Model byl původně navržen pro oceánografický rozsah od -3 °C do 30 °C, ve skutečnosti ho lze efektivně použít v širším rozsahu [2, 10]. Model vychází z rovnice (2.1), podle které lze spočítat teplotu dle vztahu:

$$T = [A_0 + A_1 \ln R_t + A_2 (\ln R_t)^2 + A_3 (\ln R_t)^3]^{-1} \quad (2.13)$$

Dle Steinharta a Harta [10] lze bez výrazné ztráty přesnosti odstranit kvadratickou část vztahu (2.13) a přejít tak do výsledného tvaru tohoto modelu, který je definován rovnicí [2, 10–12]:

$$T = [b_0 + b_1 \ln R_t + b_3 (\ln R_t)^3]^{-1} \quad (2.14)$$

Při správném použití modelu lze dosáhnout přesnosti na tisíce celého čísla v rozsahu teplot od 0 °C do 70 °C. Koeficienty b v rovnici (2.14) lze nalézt řešením trojice rovnic při provedení kalibrace při třech různých teplotách [2, 11].

2.3 Technologie výroby termistorů

Následující podkapitola shrnuje technologii výroby termistorů. Termistory lze vyrábět práškovou metalurgií, tlustovrstvou technologií, či tenkovrstvými způsoby.

Konvenční, běžně dostupné a průmyslově vyráběné NTC termistory využívají technologie práškové metalurgie. Jsou vyrobeny z oxidů kovů, mezi často používané patří oxidy manganu, železa, niklu, kobaltu, barya, mědi, či titanu [1, 13, 14]. Pro výrobu je používáno dvou, či více druhů oxidů, přičemž změna vzájemných poměrů materiálů ovlivňuje vlastnosti budoucího senzoru, jako je teplotní rozsah, či citlivost [9]. Oxid kovu je rozemlet na jemný prášek, který je následně mísen s pojivem a případně dalšími přísadami [2, 9, 13, 14]. Výsledná směs je lisována do požadovaného tvaru a spékána dohromady za vysokých teplot přes 1000 °C [2, 9, 13, 14]. Takto vyráběné termistory jsou dostupné v různých tvarech a provedeních, například perličkové, terčíkové, diskové, či tyčkové, ilustrativní *obrázek 2.2* je pod textem.



Obr. 2.2: Různé tvarové provedení termistorů. Převzato z: [15]

Alternativní metodou přípravy termistorů je nanosení materiálové vrstvy s požadovanými vlastnostmi (materiál, který vykazuje nelineární závislost na teplotě, jako NTC termistor) na substrát. Pro výrobu lze použít tlustovrstvé technologie za pomoci sítotisku [2, 13, 14]. Pro přípravu pasty pro sítotisk se používá stejných oxidů kovů jako pro konvenční práškovou metalurgii [2, 8]. Kromě jemně rozemletého termistorového prášku pasty obsahují pojivo, rozpouštědla a další látky pro lepší adhezi na substrát [2, 8]. Po nanesení pasty na substrát je materiál třeba vypálit při vysokých teplotách, proto lze takové termistory nanášet na teplotně odolné substráty, jako jsou například substráty keramické [2, 8]. Tenkovrstvě lze termistor vyrobit napařováním křemíkových sloučenin, ku příkladu SiC [13, 14, 16, 17]. Experimentálně se pak objevuje používání past (či inkoustů pro technologie inkoustového tisku) na bázi oxidů jiných a s příměsí polymerních materiálů na bázi uhlíku, u kterých lze dosáhnout výroby termistoru i při nízkých teplotách [13, 14, 16]. S nízkou teplotou lze používat i nízkonákladové flexibilní substráty, čímž výroba termistorů proniká do oblasti tisknutelné a flexibilní elektroniky.

Příkladem je experimentální termistor dle zdroje [16], kdy autoři na elektrodovou strukturu na flexibilním substrátu sítotiskem nanесли pastu s požadovanými vlastnostmi [16]. Pasta je založena na oxidu antimonu a cínu Sb_2SnO_5 [16]. Po nanesení je provedeno tzv. zapečení při vysoké teplotě pro vytvrzení struktury a pro odpaření rozpouštědel použitých při výrobě, v tomto případě se jedná o teplotu 130 °C, tedy o dost nižší, než jsou teploty použité pro spékání termistorů na bázi běžných oxidů kovů, což umožňuje depozici i na teplotně méně odolné substráty [16].

Technologie tisknutelné elektroniky umožňují výrobu při zachování nízkých nákladů. Vedle výše uvedeného sítotisku lze pro tištěnou elektroniku použít technologie jako inkoustový tisk, ofsetový tisk, tampónový tisk, rotační nanášení a další depoziční techniky. Tisknutelná elektronika spolu s flexibilní elektronikou jsou perspektivní oblastí, ve které probíhá masivní výzkum a vývoj. Jako tisknutelnou elektroniku lze realizovat pasivní i aktivní součástky, běžně jsou již takto vyráběny například tranzistory, či OLED displeje.

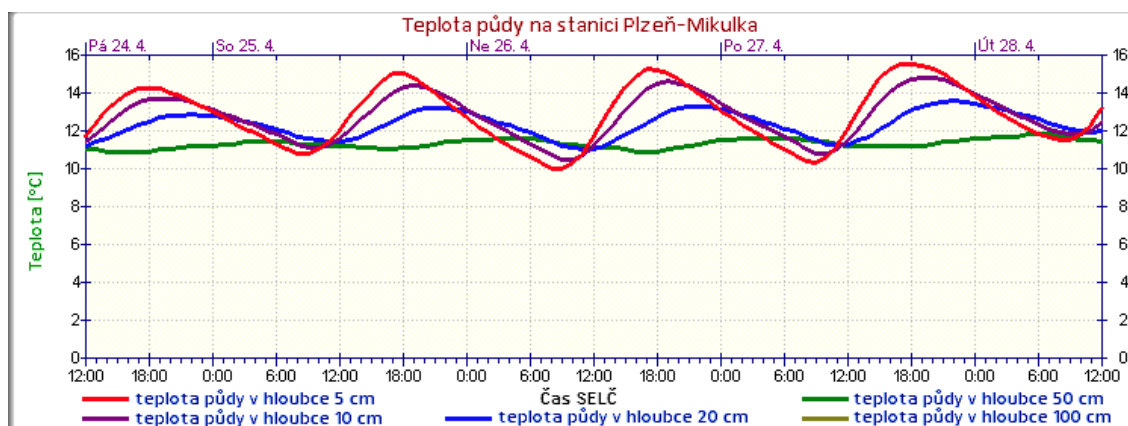
3 Vlivy prostředí a jejich testování

První část kapitoly je věnována problematice teploty půdy, popisuje mechanismus ohřevu a způsob distribuce tepla v zemině. Druhá část se zabývá testováním senzorů. Testování je rozděleno na In Situ aplikace a normalizované testování. Normalizované testy lze použít pro vzorky termistorů jak ve vzduchu, tak lze připravit kompletní experiment s umístěním senzorů do půdy.

3.1 Teplota půdy

Teplota společně s vlhkostí patří mezi důležité parametry půdy a jejich sledování je kritické pro zemědělské aplikace, jejich působení ovlivňuje vývoj rostlin a nepřímo má vliv na úrodnost půdy [18, 19]. Ke změnám teploty půdy dochází od povrchu, přes den je povrch ohříván slunečními paprsky a teplo pak postupuje do hlubších částí půdy, zatímco v noci je povrch ochlazován a teplo z hlubších částí postupuje k povrchu [18]. Ohřívání je ovlivněno povětrnostními vlivy, jako je vítr, vlhkost atmosféry, teplota atmosféry, intenzita slunečního záření [18, 20, 21]. Samotný povrch půdy může být izolován například hustým porostem vegetace, či sněhovou pokrývkou, dále také záleží na orientaci povrchu vůči slunci [18, 20, 21]. Dalším významným vlivem je tepelná kapacita samotné půdy, s vyšší tepelnou kapacitou půdy dochází k pomalejšímu ohřevu [18, 20, 21]. Tepelná kapacita půdy je úměrná obsahu vody v půdě, vlhká půda dosahuje vyšší tepelné kapacity, než půda suchá, suchá půda se tedy zahřívá rychleji [18, 21]. S vyšší tepelnou vodivostí půdy je teplo snadněji odváděno do hlubších vrstev, tepelná vodivost je závislá na pórovitosti a vlhkosti půdy [18, 21]. Příkladem je kyprá suchá půda, kde jsou póry zaplněny vzduchem, která má kvůli vzduchu špatnou tepelnou vodivost, v okamžiku zaplnění pórů vodou tepelná vodivost stoupá [18]. Teplota povrchu je ve fázi s teplotou okolního vzduchu, ve větších hloubkách pak dochází k časovému posunu maxim a minim oproti teplotě povrchu [18, 21].

Tento jev ilustruje následující graf 3.1 z portálu Českého hydrometeorologického úřadu ze stanice Mikulka Plzeň.



Graf 3.1: Teplota půdy v různých hloubkách. (Převzato z [22])

Z grafu 3.1 je jasné, že s rostoucí hloubkou klesá amplituda změny teploty a zároveň dochází k časovému posunu výskytu maxim a minim. Závěrem je, že čím vyšší hloubka, tím menší změny teploty. Na základě těchto poznatků lze rozdělit půdu na několik oblastí. První oblastí je teplota na povrchu, která je ve fázi s teplotou okolí. Dále mělká půda do cca 1 m, kdy je teplota závislá na cyklech počasí a aktuální teplotě povrchu [20, 21]. Poté mělké půdy od 1 m do 8 m hloubky, kde dochází ke změnám vlivem ročních fází [20, 21]. A nakonec hluboké půdy, kde je teplota prakticky nezávislá na povrchu a s rostoucí hloubkou se mění v závislosti na geotermální aktivitě [20].

Z hlediska zemědělských aplikací pro pěstování plodin je kritické sledování teplot v mělkých půdách do jednoho metru. V této úrovni půdy lze počítat s rozsahem teplot podobným, jako jsou maximální a minimální teploty vzduchu v dané oblasti, senzory by tedy měly spolehlivě pracovat při těchto teplotách. Testování senzorů by mělo být zaměřeno na přesnost měření v požadovaných rozsazích teplot a na vliv změn vlhkosti půdy. Důležitým faktorem umístění senzorů do půdy je dlouhodobější vystavení vysokým vlhkostem, vliv vysoké vlhkosti by tedy měl být při výběru senzoru brán v potaz. Dalšími důležitými požadavky je vysoká mechanická odolnost a odolnost vůči chemickým vlivům.

3.2 In – situ testování

Pojem in-situ pochází z latiny a lze jej přeložit jako „na místě“. In-Situ testování tedy probíhá v lokalitě, pro kterou jsou senzory určeny. Jedná se o testování senzorů při nasazení v reálných podmínkách, pro zemědělské aplikace například na poli, či ve skleníku. Senzory se setkávají s tvrdými environmentálními podmínkami, mohou být například vystaveny přímému působení vody [23, 24]. Při testování v reálném prostředí je třeba před vlivy chránit nejen senzory, ale i celou elektroniku potřebnou ke sběru a odesílání dat. Testování v reálném prostředí je vhodné pro senzory a zařízení, které již prošly laboratorní fází a je u nich předpoklad, že mohou v daném prostředí spolehlivě fungovat. Nasazení v reálném prostředí může být spojeno s laboratorním měřením. Například lze použít měřicí sekvenci kalibrace v laboratoři, dlouhodobé nasazení v reálných podmínkách a opět kalibrace v laboratoři pro ověření chování a vlivu prostředí na senzor [24].

3.3 Normalizované testování

Normalizované testy lze použít pro realizaci experimentů v laboratoři. Testování probíhá v kontrolovaném prostředí laboratorních zařízení, jako například klimatické komory, které umožňují simulaci povětrnostních podmínek. Termistory mohou být v rámci laboratorní infrastruktury testovány samostatně, ale lze i postavit celý experiment s umístěním senzorů do zeminy.

V souvislosti s termistory a jejich testováním pro použití ve venkovních podmínkách lze zmínit některé významné normy, které jsou vypsány v tabulce 3.1 níže.

Tab. 3.1 Normy související s testováním termistorů ve venkovních podmínkách

Soubor norem ČSN EN 60068: Zkoušení vlivů prostředí
ČSN EN 60539-1 ed.3: Přímě ohřívání termistory se záporným teplotním součinitelem - Část 1: Kmenová specifikace
ČSN EN 60539-1: Přímě ohřívání termistory se záporným teplotním součinitelem - Část 2: dílčí specifikace - Termistory pro povrchovou montáž se záporným teplotním součinitelem

Soubor norem ČSN EN 60068 se zabývá testováním vlivů prostředí, struktura souboru včetně vybraných jednotlivých zkoušek, které lze využít pro testování termistorů bude dále popsána. Normy ČSN EN 60539 blíže specifikují požadavky na testování termistorů a odkazují na testy dle souboru ČSN EN 60068. V rámci praktického návrhu testování bude vycházeno z obou norem tak, aby zvolené meze přesnosti odpovídaly stanoveným hodnotám.

3.3.1 Soubor norem ČSN EN 60068

Tento soubor norem se zabývá testováním vlivů prostředí. Normy jsou určeny pro testování elektrických, elektromechanických a elektronických zařízení, jejich základních složek a součástí, lze je ale použít i pro jiné průmyslové výrobky. Vlivy prostředí pro účely tohoto souboru norem znamenají přírodní i umělé podmínky, kterým může být testovaný objekt vystaven v praxi.

Soubor norem ČSN EN 60068 je složen ze tří částí:

- ČSN EN 60068-1 Obecně a návod: tato část definuje obecné záležitosti, termíny a definice.
- ČSN EN 60068-2 Zkoušky: V této části, sestávající z více norem, jsou popisovány jednotlivé zkoušky.
- ČSN EN 60068-3 Doprovodná dokumentace a návod: zde jsou popsány podkladové informace pro skupiny zkoušek.

Jednotlivé zkoušky ve druhé části jsou označeny velkými písmeny dle následující tabulky [25]:

Tab. 3.2: Označení zkoušek v souboru norem ČSN EN 60068

Písmenné označení	Název
A	Chlad
B	Suché teplo
C	Vlhké teplo konstantní
D	Vlhké teplo cyklické
E	Nárazy (rázy a hrubé zacházení)
F	Vibrace
G	Stálé zrychlení
H	Vyčleněno pro doplňky (původně skladování)
J	Plísň
K	Korozní prostředí
L	Prach a písek
M	Tlak vzduchu
N	Změna teploty
P	Vyčleněno pro doplňky (původně hořlavost)
Q	Hermetičnost
R	Voda
S	Záření (nezahrnuje elektromagnetické)
T	Pájitelnost a tepelná odolnost při pájení
U	Pevnost vývodů u součástí
V, W, Y	Vyčleněno pro doplňky

Označení zkoušek písmenem X je použito v kombinaci s malým písmenem pro rozšíření skupin zkoušek. Příkladem je zkouška Xa: Ponoření do čistících rozpouštědel.

Kategorie zkoušek s velkým písmenem Z je použita pro označení kombinovaných zkoušek. Písmeno je za lomítkem doplněno o malá písmena, která určují, jaké vlivy jsou při zkoušce testovány. Například zkouška Z/am: kombinovaná zkouška chladem a nízkým tlakem vzduchu.

Jednotlivé kategorie zkoušek lze dále dělit přidáním malého písmene za velké písmeno dle uvedené tabulky 3.2.

Z hlediska testování elektroniky pro použití ve venkovních podmínkách je vhodné zmínit konkrétní základní testy, které shrnuje následující tabulka.

Tab. 3.3 Výběr zkoušek pro testování venkovních vlivů

Označení normy	Název testu
ČSN EN 60068-2-1	Zkouška A: Chlad
ČSN EN 60068-2-2	Zkouška B: Suché teplo
ČSN EN 60068-2-78	Zkouška Cab: Vlhké teplo konstantní
ČSN EN 60068-2-30	Zkouška Db: Vlhké teplo cyklické (cyklus 12 h + 12 h)
ČSN EN 60068-2-14	Zkouška N: Změna teploty
ČSN EN 60068-2-38	Zkouška Z/AD: Složená cyklická zkouška teplotou a vlhkostí

Normy dle výše uvedené tabulky budou dále popsány a bude z nich vycházeno při návrhu testovací sekvence.

3.3.1.1 ČSN EN 60068-1 ed. 2

Norma s názvem Zkoušení vlivů prostředí – Část 1: Obecně a návod je výchozí normou pro soubor ČSN EN 60068, její označení je ČSN EN 60068-1 ed. 2 [25]. Norma definuje základní termíny, normální klimatické podmínky, klimatické řady a řady zkoušek, vlivy jednotlivých druhů prostředí a základní postupy. V následujících řádcích je citován postup měření a vlivy druhů prostředí dle této normy.

Obecný postup měření podle normy je následující:

1. **Aklimatizace před zkouškou**

V této části je třeba odstranit, nebo alespoň minimalizovat vlivy prostředí, kterým byl zkušební vzorek vystaven v minulosti.

2. **Počáteční vyšetření a měření**

Zjištění výchozího stavu vzorku, jeho vlastností a parametrů.

3. **Expozice**

Expozice vzorku zkoumaným vlivům prostředí s úmyslem stanovit jejich vliv na vzorek.

4. **Aklimatizace po zkoušce**

Stabilizace vzorku po expozici, příprava na měření parametrů.

5. **Konečné vyšetření a konečná měření**

Měření parametrů vzorku po uskutečněné expozici vybraným vlivům, zjištění efektu těchto vlivů.

V příloze B k diskutované normě lze najít obecný návod, ve kterém jsou mimo jiné i uvedeny jednotlivé vlivy prostředí, se kterými se lze setkat a popis jejich účinků. Tento seznam je vypsan v následující tabulce.

Tab. 3.4 Vlivy druhů prostředí dle ČSN EN 60068-1 ed. 2

Působící parametr prostředí	Popis účinků
Vysoká teplota	Způsobuje tepelné stárnutí, oxidaci materiálu, praskání a chemické reakce, měknutí, odpařování, rozpínání materiálu.
Nízká teplota	Křehnutí, tvoření námrazy, změna viskozity a tuhnutí, ztráta mechanické pevnosti, smršťování materiálu
Vysoká relativní vlhkost	Absorpce vlhkosti materiálem, ztráta mechanické pevnosti, chemické reakce, koroze, zvýšení vodivosti izolace
Nízká relativní vlhkost	Vysychání, zkřehnutí, ovlivnění mechanické pevnosti, smršťování materiálu
Vysoký tlak	Stlačení a následné deformace
Nízký tlak	Rozpínání, zhoršení chlazení, zhoršení elektrické pevnosti vzduchu
Sluneční záření	Chemické, fyzikální a fotochemické reakce, znehodnocení povrchu křehnutím a blednutím barev, zahřívání a mechanické namáhání selektivním ohřevem
Prach a písek	Otěr a eroze, zatření a ucpání, snížení tepelné vodivosti, elektrostatické účinky
Korozní prostředí	Chemické reakce, koroze a elektrolyza, poškození povrchu zvýšením odporu kontaktů
Vítr	Silové působení, přenos a usazování materiálu, eroze, vyvolané vibrace
Děšť	Absorpce vody, teplotní ráz, eroze a koroze
Kroupy	Eroze, teplotní ráz, mechanické deformace
Sníh a led	Mechanické zatížení, teplotní ráz, absorpce vody
Rychlá změna teploty	Teplotní ráz, selektivní ohřev a mechanické vlivy tím vyvolané
Ozón	Rychlá oxidace, křehnutí, snížení elektrické pevnosti vzduchu
Stálé zrychlení, vibrace, ráz	Mechanické namáhání, únava, rezonance

3.3.1.2 Zkouška A: Chlad

Zkouška chladem dle normy ČSN EN 60068-2-1 Ed.2 [26]. Zkouška je určena pro testování vlivu chladu pro vzorky, které uvolňují teplo, i které ho neuvolňují. Cílem zkoušky je určit chování prvku při nízké teplotě během skladování, přepravy, či během činnosti. Norma dále určuje dělení zkoušek podle toho, zda vzorek uvolňuje, nebo neuvolňuje teplo, dělení je následující:

- **Zkouška chladem pro vzorek neuvolňující teplo**

- Zkouška Ab s pozvolnou změnou teploty

- **Zkouška chladem pro vzorek uvolňující teplo**

- Zkouška Ad s pozvolnou změnou teploty

- Zkouška Ae s pozvolnou změnou teploty a s napájením po celou dobu zkoušky

Zkouška Ab je prováděna za proudění vzduchu vysokou rychlostí. Vzorek je umístěn do komory, ve které je pokojová teplota. Poté se teplota postupně snižuje až na požadovanou úroveň, od okamžiku dosažení potřebné teploty se počítá čas expozice. Vzorky při této zkoušce jsou obvykle v neprovozním stavu.

Zkouška Ad probíhá podobně, jako předchozí. Provádí se při proudění vzduchu s nízkou rychlostí. Po dosažení požadované teploty se vzorek zapne, po jeho zapnutí je třeba vytvořit teplotní rovnováhu. Po dosažení rovnováhy započne počítání času expozice.

Zkouška Ae má stejné podmínky jako zkouška Ad, ale vzorek je zapnut ještě před započtím ochlazování.

Stupně přísnosti dle diskutované normy jsou následující:

Tab. 3.5 Stupně přísnosti pro zkoušku A.

Teplota [°C]
-65
-55
-50
-40
-33
-25
-20
-10
-5
+5

Doba expozice při daných podmínkách je vybírána z hodnot: 2, 16, 72, 96 hodin.

Hodnoty lze také odvodit ze znalosti prostředí, pro které je vzorek určen, pokud jsou tyto podmínky významně odlišné od definovaných stupňů přísnosti.

3.3.1.3 Zkouška B: Suché teplo

Postup této zkoušky je popsán normou ČSN EN 60068-2-2 [27]. Zkouška je určena pro ověření schopnosti zkoumaného vzorku být provozován, přepravován a skladován při vysoké teplotě. Podobně, jako u zkoušky chladem, je zde nutné rozdělení pro vzorky uvolňující a neuvolňující teplo.

- **Zkouška suchým teplem pro vzorek neuvolňující teplo**
 - Zkouška Bb s pozvolnou změnou teploty

- **Zkouška suchým teplem pro vzorek uvolňující teplo**
 - Zkouška Bd s pozvolnou změnou teploty
 - Zkouška Be s pozvolnou změnou teploty a s napájením po celou dobu zkoušky

Průběhy jednotlivých zkoušek jsou analogické ke zkoušce chladem. Zkouška Bd probíhá při proudění vzduchu vysokou rychlostí, vzorky jsou při ní obvykle v neprovozním stavu. Zkouška začíná na teplotě místnosti. Po umístění

vzorku do komory je teplota postupně zvyšována. Čas expozice se měří od dosažení definované teploty. Zkouška Bd pro vzorky uvolňující teplo probíhá při proudění vzduchu nízkou rychlostí. Po dosažení definované teploty začíná měření času expozice a vzorek je zapnut. Zkouška Be probíhá stejně, vzorek je ale zapnut celou dobu, tedy hned po vložení do komory při pokojové teplotě.

Proudění vzduchu nízkou rychlostí je normou definováno jako proud vzduchu potřebný k udržení definovaných podmínek při expozici, aniž by byla snížena teplota vzorku v jakémkoliv bodě o více než 5 K.

Norma definuje následující stupně přísnosti:

Teplota: 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 85, 100, 125, 155, 175, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000 °C

Doba expozice: 2, 16, 72, 96, 168, 240, 336, 1000 h

Hodnoty lze také odvodit ze znalosti prostředí, pro které je vzorek určen, pokud jsou tyto podmínky významně odlišné od definovaných stupňů přísnosti.

3.3.1.4 Zkouška Cab: Vlhké teplo konstantní

Zkouška Cab je popsána normou ČSN EN 60068-2-78 ed. 2 [28]. Touto zkouškou se testuje schopnost vzorku odolávat vysoké vlhkosti při konstantní teplotě bez kondenzace při přepravě, skladování i používání. Zkouška je určena pro vzorky, jejichž parametry jsou ovlivňovány absorpcí a difuzí vlhkosti a vodní páry. Použití zkoušky je identické pro vzorky uvolňující i neuvolňující teplo.

Při zkoušce Cab se testovaný vzorek vloží do komory. Poté se v testovací komoře nastaví požadované parametry stanovené stupni přísnosti. Je třeba zabránit kondenzaci na vzorku. Toho lze dosáhnout úpravou teploty vzorku, nebo počkáním, až se ohřeje na teplotu danou stupněm přísnosti a až poté nastavit vlhkost. Vzorek lze do komory umístit také až po dosažení stanovených hodnot, takový vzorek je před vložением třeba předeřhát. Vlhkost je třeba nastavit během doby do dvou hodin. V okamžiku, kdy nastanou definované podmínky, začíná měření doby expozice.

Stupně přísnosti dané normou jsou následující:

Tab. 3.6 Stupně přísnosti pro zkoušku Cab

Teplota [°C]	Relativní vlhkost [% RH]
30 ± 2	93 ± 3
30 ± 2	85 ± 3
40 ± 2	93 ± 3
40 ± 2	85 ± 3

Doba expozice při daných podmínkách je vybírána z hodnot:

Tab. 3.7 Doba expozice pro zkoušku Cab

Doba expozice
12 h
16 h
24 h
2 d
4 d
10 d
21 d
56 d

Opět je možné volit jiné hodnoty dle individuálních požadavků.

3.3.1.5 Zkouška Db: Vlhké teplo cyklické (cyklus 12 h + 12 h)

Cyklická zkouška vlhkým teplem je předmětem normy ČSN EN 60068-2-30 [29]. Zkouška testuje schopnost výrobku snášet podmínky vysoké vlhkosti kombinované s cyklickými změnami teploty, při kterých dochází ke kondenzaci na povrchu vzorku.

Zkouška je složena z jednoho, či více cyklů změny teploty, během celého procesu je relativní vlhkost udržována na vysoké úrovni. Teplota se v průběhu testu mění mezi dolní hodnotou 25 °C ± 3 K a horní teplotou, která je stanovena stupněm přísnosti. Definované stupně přísnosti jsou tyto:

Tab. 3.8 Stupně přísnosti pro zkoušku Db

Stupeň přísnosti 1		Stupeň přísnosti 2	
Horní teplota [°C]	Počet cyklů	Horní teplota [°C]	Počet cyklů
40	2, 6, 12, 21, 56	55	1, 2, 6

Následující řádky popisují jeden 24hodinový cyklus zkoušky. Test začíná na dolní teplotě a během 3 h ± 30 min je třeba dosáhnout horní teploty. Během přechodu teploty je třeba udržovat relativní vlhkost nad 95 %, během posledních 15 minut vyšší než 90 %. Při zvyšování teploty v komoře může na vzorku probíhat kondenzace. Po dosažení horní teploty je třeba stav udržovat po dobu 12 h ± 30 min od začátku

cyklu. V tomto období je třeba udržovat relativní vlhkost na hodnotě $93 \% \pm 3 \%$. Po uplynutí daného času následuje snižování teploty, které lze realizovat dvěma způsoby. První způsob je snížit teplotu zpět na $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ K}$ během 3 h až 6 h. U prvního způsobu je normou definována rychlost klesání teploty během první jedné a půl hodiny. Tato rychlost by měla být taková, že hodnoty $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ K}$ by bylo dosaženo za $3\text{ h} \pm 15\text{ min}$. Relativní vlhkost musí být vyšší než 95 %, během prvních 15 minut musí být vyšší než 90 %. Druhý způsob také počítá s dosažením dolní hodnoty teploty v rozsahu 3 až 6 hodin, ale je vypuštěn požadavek na rychlost klesání v první části. Během klesání podle druhého způsobu stačí udržovat relativní vlhkost nad 80 %. Zbylou část cyklu se udržuje teplota $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ K}$ při relativní vlhkosti 95 % a vyšší až do skončení 24hodinového cyklu. První varianta klesání je vhodná pro vzorky, kde lze počítat s průnikem vlhkosti dýchacím jevem, typicky vzorky s dutým prostorem, kdy na vnitřních stěnách může vzniknout kondenzace. Druhá varianta vyhovuje ostatním vzorkům.

3.3.1.6 Zkouška N: Změna teploty

Testy změnou teploty jsou předmětem normy ČSN EN 60068-2-14 [30]. Zkouška slouží ke stanovení vlivu změn teploty na zkoumaný vzorek. Zkouška samotná je složena ze střídání dob při vysoké a nízké teplotě. Zkouška je dále definována dobou expozice při jedné teplotě a dobou přechodu mezi hladinami teploty. V rámci normy je specifikováno několik druhů zkoušky teploty.

- **Na: Rychlá změna teploty s předepsanou dobou přemístění**
 - Pro testování elektrických vlastností při určeném počtu rychlých změn teploty a pro testování mechanických vlastností odolávat rychlým změnám teploty.
- **Nb: Změna teploty se stanovenou rychlostí změny**
 - Testování elektrických a mechanických vlastností během změny teploty.
- **Nc: Rychlá změna teploty, metoda se dvěma kapalinovými lázněmi**
 - Stejně určení, jako zkouška Na

Zkouška Na počítá s testováním ve dvou komorách, kdy jedna komora zajišťuje podmínky pro vysokou hladinu teploty a druhá pro nízkou hladinu. Doba přemístění je doba, za kterou je třeba vzorek přemístit z jedné komory do druhé. Testování má schodový profil s krátkou dobou při pokojové teplotě, během které se vzorek přemísťuje. Zkouška Nc je předchozí popisované proceduře podobná, jen místo dvou komor se využívá dvojice lázní, jedna pro dolní hranici teploty a druhá pro horní. Opět je definována doba potřebná pro přemístění vzorku.

Oproti ostatním je zkouška Nb prováděna pouze v jednom zařízení, přechody mezi jednotlivými hladinami teplot jsou tedy pozvolné, nikoliv skokové.

Stupně přísnosti v rámci této zkoušky jsou definovány následovně:

Tab. 3.9 Stupně přísnosti pro zkoušku Na

Zkouška Na			
Dolní teplota	Horní teplota	Čas expozice	Počet cyklů
Dle IEC 60068-2-1/2	Dle IEC 60068-2-1/2	3 h, 2 h, 1 h, 30 min, 10 min	5

Tab. 3.10 Stupně přísnosti pro zkoušku Nb

Zkouška Nb				
Dolní teplota	Horní teplota	Čas expozice	Počet cyklů	Rychlost změny teploty
Dle IEC 60068-2-1/2	Dle IEC 60068-2-1/2	3 h, 2 h, 1 h, 30 min, 10 min	2	1, 3, 5, 10, 15 K/min

Tab. 3.11 Stupně přísnosti pro zkoušku Nc

Zkouška Nc			
Dolní teplota	Horní teplota	Čas expozice	Počet cyklů
Dle požadavků	Dle požadavků	Není specifikováno	10

3.3.1.7 Zkouška Z/AD: Složená cyklická zkouška teplotou a vlhkostí

Je kombinovanou zkouškou popsanou v normě ČSN EN 60068-2-38 [31]. Zkouška najde uplatnění při testování odolností vzorků vůči změnám teploty a vlhkosti. Díky své povaze je určena především pro testování odolnosti vůči efektu dýchání. Oproti zkoušce vlhkým teplem cyklickým jsou zde definovány větší rozsahy teplot, více cyklů a poklesy pod teplotu 0 °C. Zkouška je určena primárně pro součástky. Cyklování dle této zkoušky probíhá mezi teplotami 25 °C ± 2 K a 65 °C ± 2 K. Norma dále specifikuje dobu setrvání na teplotní hladině, rychlost přechodu z jedné hladiny teploty na druhou a hodnoty relativních vlhkostí během celé doby. Jedním cyklem se dle normy rozumí 24 hodin. Cyklus lze rozdělit na teplotně vlhkostní část a chladnou část. Chladná část musí být provedena v libovolných pěti cyklech z prvních devíti. Během chladné části se nereguluje vlhkost, hranice teploty v této části je -10 °C. Stupně přísnosti jsou definovány počtem cyklů, konkrétně 10 cyklů, z nichž každý trvá 24 hodin.

4 Příprava měření tištěných termistorů

Hlavním cílem praktické části této práce je navrhnout testovací plán tištěných senzorů teploty pro budoucí aplikace v oblasti precizního zemědělství s využitím dostupné laboratorní infrastruktury a na vybraných vzorcích experimentálních senzorů teploty tento plán prakticky ověřit.

V této kapitole je popsán návrh geometrie experimentálních termistorů a následně jejich výroba. Dále je představen návrh a popis testovacího plánu. Posléze kapitola přibližuje realizované přípravy před měřením, jako je příprava pomůcek, infrastruktury a kabeláže.

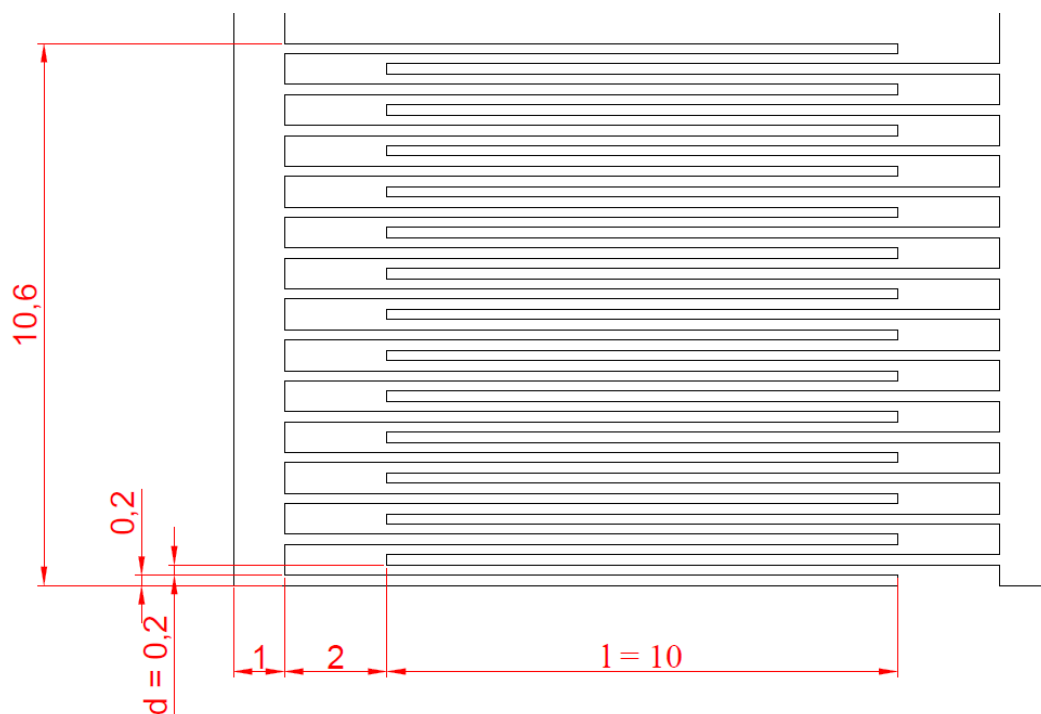
Praktická realizace měřícího plánu včetně analýzy a vyhodnocení dosažených výsledků je pak popsána v kapitole 5. Diskuse výsledků je předmětem kapitoly 6.

4.1 Návrh termistorů

Základem navrženého termistoru je interdigitální elektrodová struktura. Díky interdigitální struktuře lze dosáhnout velké aktivní plochy při zachování malých rozměrů senzoru. Přes elektrodovou strukturu bude nanášena senzitivní vrstva, která mění svůj odpor v závislosti na teplotě. Elektrodovou strukturu lze charakterizovat geometrickým parametrem SQ (tzv. počet čtverců), který lze určit dle následujícího vztahu (4.1):

$$SQ = \frac{l}{d}n \quad (4.1)$$

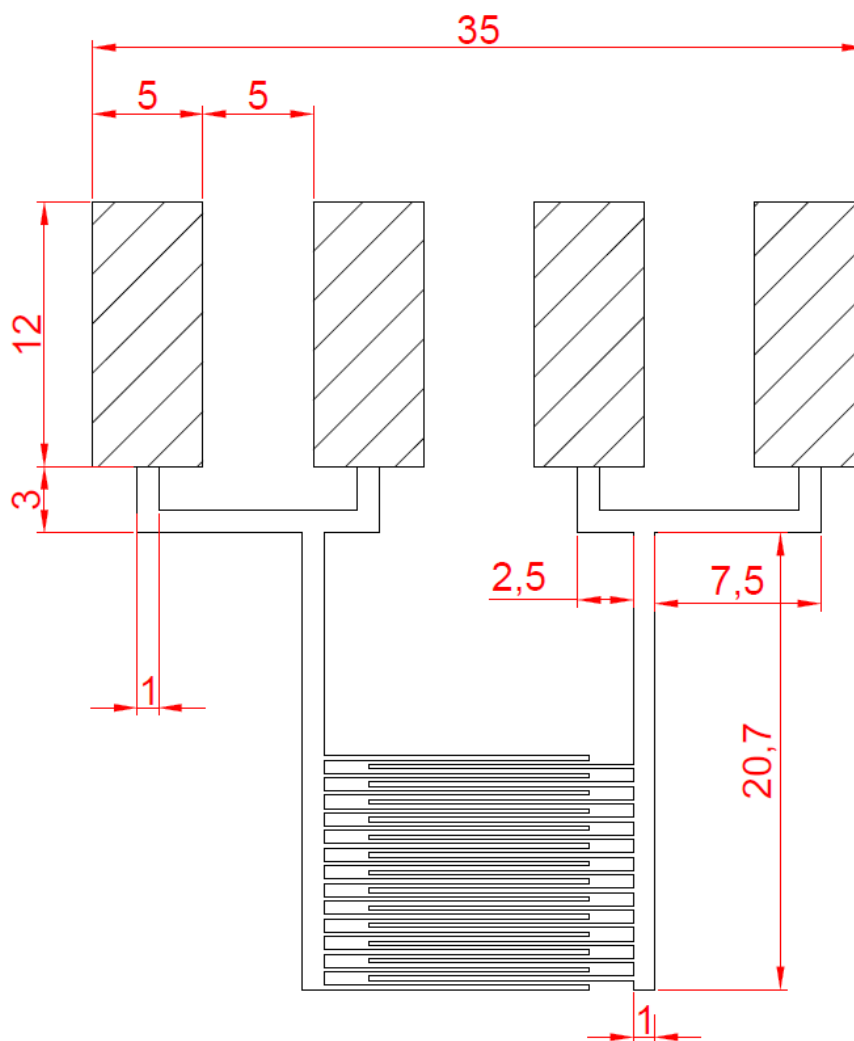
Kde l je délka mezery mezi prsty elektrody, d je šířka mezery mezi elektrodami a n je počet mezer mezi elektrodami. Na *obrázku 4.1* lze vidět detail navržené elektrodové struktury.



Obr. 4.1: Detail elektrodové struktury

Délka elektrodové mezery $l = 10$ mm, šířka $d = 0,2$ mm, počet elektrodových mezer $n = 25$. Po dosazení těchto parametrů do rovnice (4.1) vyjde počet čtverců $SQ = 1250$.

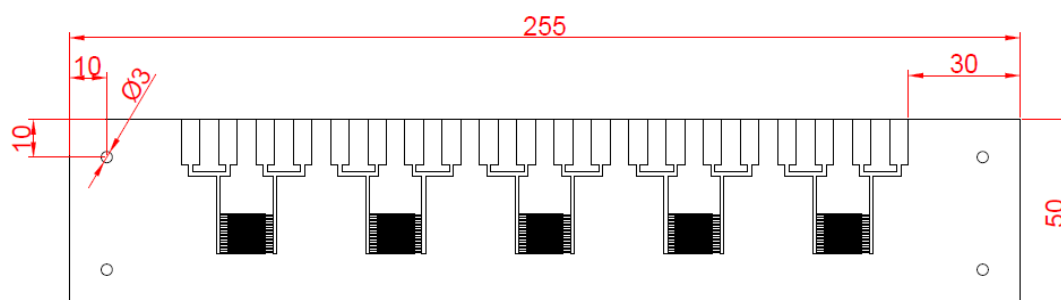
Tloušťka elektrodových mezer i elektrodových prstů je 0,2 mm. Geometrie celého sensorového elementu je zobrazena na následujícím obrázku 4.2.



Obr.4.2: Geometrie sensorového elementu s kontaktními ploškami

Senzorový element je navržen pro čtyřbodové měření odporu. Kontaktní plošky (vyšrafováno) byly navrženy s ohledem na možnost rychlého připojení pomocí micro krokosvorek. Elektrodová struktura byla vyrobena fotolitograficky na základním sklolaminátovém substrátu plátovaném elektrovednou mědí s tloušťkou 17,5 μm . Povrch vyleptaného měděného motivu byl následně ošetřen bezproudým pokovením niklem a zlatem (ENIG) pro zajištění kvalitního a stabilního elektrického kontaktu s následně deponovanou vrstvou termosenzitivní formulace.

Geometrii navržené desky plošných spojů s jednotlivými elektrodovémi strukturami lze vidět na *obrázku 4.3* níže.



Obr. 4.3: Schéma desky plošných spojů

Na jedné desce plošných spojů je umístěna pětice elektrodových struktur. Deska je vyrobena s otvory pro sešroubování stejných sensorových formulací pomocí distančních sloupků. Na vyrobené desky byly na pracovišti FCHT UPCE v Pardubicích nanášeny senzitivní struktury. Celkem byly zvoleny tři různé formulace. Každá formulace byla nanášena na 20 elektrodových struktur. Celkem tedy bylo vyrobeno 60 vzorků experimentálních termistorů na dvanácti deskách plošných spojů. Nanášení termosenzitivních vrstev bylo provedeno mikrodispensingem na experimentálním mikrodispenseru. Termosenzitivní vrstva byla na elektrodovou strukturu nanášena s přesahem 1,5 mm na každou stranu. Tisk probíhal rychlostí posuvu trysky $600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ při tlaku 200 kPa. Formulace se mezi sebou liší mechanickými vlastnostmi polymerního pojiva. První formulace má nejtvrďší pojivo, druhá flexibilní a třetí elastomerní. Po nanášení vrstev bylo provedeno sušení při teplotě $120 \text{ }^\circ\text{C}$.

V následujícím textu bude na jednotlivé formulace odkazováno zkratkovým označením dle uvedené tabulky.

Tab. 4.1: Kódová označení formulací

Kódové označení	Pojivo	Zkratkové označení
2019_04_04_1	Tvrdé	F1
2019_04_08_1	Flexibilní	F2
2020_02_10_1	Elastomerní	F3

4.2 Testovací plán

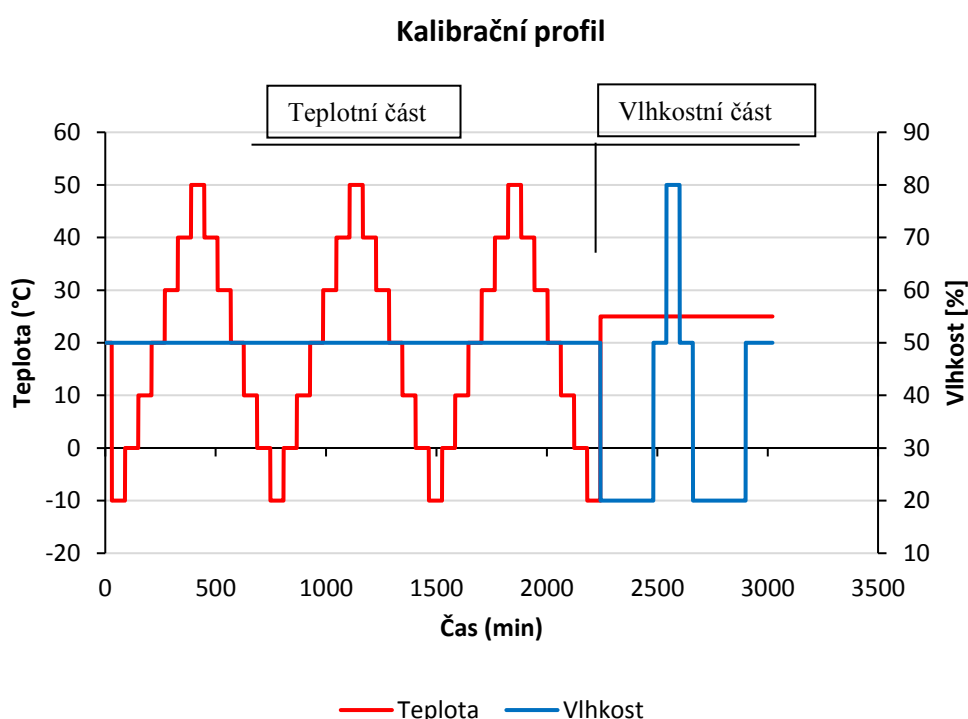
Předmětem testování jsou experimentální tištěné senzory. Hlavním cílem testování je ověřit a zhodnotit využitelnost testovaných tiskových formulací pro použití při měření teploty ve venkovních podmínkách. Pro ověření vlastností formulací budou použity testy teplotní a vlhkostní. Pro testování byla navržena následující sekvence.

1. Výchozí kalibrační měření s testem vlivu vlhkosti
2. Dlouhodobé stárnutí a zapouzdření
3. Následné kalibrační měření spolu s testem vlivu vlhkosti
4. Optická inspekce
5. Výpočet matematického modelu

Testovací plán bude proveden v laboratorních podmínkách v kontrolovaném prostředí. Použité testy jsou kombinací testů vycházejících z norem a testů postavených na základě požadavků na testované sensorové elementy.

4.2.1 Výchozí a závěrečná kalibrace

Kalibrace bude provedena celkem dvakrát, před a po dlouhodobém stárnutí. Kalibrační profil je rozdělen na dvě části. V první části proběhne cyklování teploty při konstantní vlhkosti pro určení kalibračních křivek. V druhé části je zařazeno cyklování vlhkosti při konstantní teplotě pro ověření vlivu vlhkosti na chování termosenzitivní formulace. Detailní náhled kalibračního profilu lze vidět na *grafu 4.1* níže. Výchozí kalibrace odpovídá výchozímu stavu a její výstup bude brán jako referenční pro kalibraci následnou, která odpovídá stavu formulací po stárnutí.



Graf 4.1: Kalibrační profil, levá část je teplotní, pravá část vlhkostní

Před samotným testem je krátký časový úsek aklimatizace před zkouškou, kdy je nastavena teplota na 20 °C a relativní vlhkost na 50 %. Po aklimatizaci je spuštěno cyklování teploty v rozmezí od -10 °C do 50 °C a zpět s krokem 10 °C. Na každém teplotním stupni se setrvá hodinu pro ustálení hodnot v testovací komoře. Po celou dobu je nastavena relativní vlhkost na konstantních 50 %. Celkem jsou provedeny tři teplotní cykly. Po dokončení teplotního cyklu je teplota nastavena na konstantních 25 °C a je provedeno cyklování relativní vlhkosti v hodnotách od 20 % do 80 % a zpět s krokem 30 %. Na hodnotě 20 % je doba trvání

ponechána 4 hodiny, pro ostatní hodnoty je doba trvání hodina. Po uplynutí vlhkostní části je relativní vlhkost nastavena na 50 % a probíhá aklimatizace po testu. Celková doba testu je 50,5 hodiny. Časový rozvrh kalibračního profilu s podmínkami shrnuje tabulka 4.2.

Tab. 4.2: Časový rozvrh kalibračního profilu

Název procedury	Doba trvání	Nastavené parametry
Aklimatizace před zkouškou	0,5 h	20 °C, 50 % RH
Teplotní cyklus	37 h	-10 až 50 °C, 50 % RH
Vlhkostní cyklus	11 h	25 °C, 20 až 80 % RH
Aklimatizace po zkoušce	2 h	25 °C, 50 % RH

Teplotní část kalibračního profilu je navržena s ohledem na předpokládaný rozsah teplot při použití senzoru v reálném prostředí (0 °C až 30 °C), přičemž interval testovaných teplot je rozšířen na <-10; 50> °C. Základem teplotní části je test dle normy ČSN EN 60068-2-14: Zkouška N: Změna teploty. Oproti normě je však použito více teplotních schodů (norma definuje změnu pouze mezi dvojicí teplot). Setrvání na teplotním schodu po jednu hodinu vychází z normy, stejně tak, jako horní a dolní teplotní mez. Díky více teplotním schodům je možné z průběhů určit kalibrační křivky.

Vlhkostní část profilu slouží jako simulace vystavení termistoru změně vlhkosti. Podnětem pro realizaci této testovací sekvence je poznatek z in-situ testování a z podmínek v půdě, kdy v reálném nasazení hrozí senzorům vystavení vysokým vlhkostem a změnám vlhkosti v širokém rozsahu, někdy i přímému působení vody. Hodnoty jsou koncipovány tak, aby šlo porovnat situaci za suchého tepla (20 % RH) a za vlhkého tepla (80 % RH). Test je postaven na zkoušce ČSN EN 60068-2-78 Zkouška Cab: vlhké teplo konstantní a zkoumá vliv vysoké vlhkosti bez kondenzace. Horní hranice RH 80 % je oproti normě nižší, stejně tak je vybrána kratší doba pro setrvání na vysoké vlhkosti.

4.2.2 Dlouhodobé stárnutí

Dlouhodobé stárnutí slouží pro ověření stability vzorků při dlouhodobém vystavení extrémním podmínkám. Test určí, zda při konstantní teplotě vzorky vykazují stále stejný odpor, či zda se projeví nějaké změny a pokud ano, zda dojde k ustálení. Teplota testování byla zvolena 100 °C. Test bude probíhat po dobu 1 000 hodin. Test vychází z normy ČSN EN 60068-2-2 *Zkouška B: Suché teplo*. Doba expozice a testovací teplota jsou zvoleny ze zmíněné normy a odpovídají upřesňující normě pro testování termistorů ČSN EN 60539-3 *ed.3*. Dále na základě poznatků o nasazení in-situ a znalosti podmínek v půdě bude před stárnutím přistoupeno k experimentálnímu zapouzdření sensorových elementů a bude zároveň testován vliv tohoto zapouzdření.

4.2.3 Optická inspekce a matematický model

Po realizaci testovacích procedur bude provedena optická inspekce sensorových elementů. Inspekce má za úkol odhalit případné viditelné mechanické poškození vlivem testování. Mikroskopicky budou zkoumány všechny měřené vzorky a v případě nálezu budou dále zkoumány detaily a rozsah poškození.

Na základě naměřených dat a výsledků ze zpracování bude zkoumáno použití matematického modelu pro vybranou senzitivní formulaci, která se bude zdát jako nejperspektivnější. Na zvolenou termosenzitivní formulaci bude aplikován model vytvořený aproximací vypočtené kalibrační křivky dle kalibračních měření. Dále bude aplikována dvojice matematických modelů z druhé kapitoly této práce, konkrétně model jednoduchý a model Steinhartův-Hartův. Představené modely budou porovnány a bude zhodnocena možnost jejich využití pro charakterizaci vybrané termosenzitivní formulace.

4.3 Příprava před měřením

Následující kapitola popisuje nutné přípravy před samotným měřením. Příprava zahrnuje problematiku zapouzdření, rozřazení vzorků do skupin, dále přípravu kabeláže a přípravu měřících zařízení.

4.3.1 Zapouzdření

Na základě poznatků uvedených v kapitole 3.1 a kapitole 3.2 bude provedeno zapouzdření termosenzitivních vrstev. Zapouzdření slouží jako mechanická ochrana a zároveň chrání před působením enviromentálních vlivů, jako například voda. Termosenzitivní vrstvy budou experimentálně zakryty adhesivní páskou a následně bude celá deska opatřena krycí povrchovou vrstvou polyuretanu pomocí mokrého laminování. Zapouzdření bude provedeno před dlouhodobým stárnutím a bude zapouzdřena polovina vzorků z každé formulace. Rozdělení senzorových elementů se zapouzdřením a bez povrchové ochrany je uvedeno v následující podkapitole.

4.3.2 Značení senzorů a zapojení měřících kanálů

Záznam dat bude proveden digitálním multimetrem DMM Keithley 2701/E, který lze osadit dvojicí multiplexních měřících karet. Jedna karta umožňuje připojit 40 kanálů. Pro měření bude použito dvoubodové zapojení měření odporu a pro pokrytí všech experimentálních vzorků termistorů bude využito 60 kanálů. Je tedy třeba použít dvojici multiplexních karet, přičemž druhá z nich bude využita jen z poloviny. Multimetr bude přes ethernetové rozhraní připojen k notebooku s obslužným softwarem pro konfigurace měření a ukládání dat.

Jednotlivé termistory na deskách jsou očíslovány dle pořadí (1 až 5) a jednotlivé desky v rámci stejné tiskové formulace jsou označeny písmeny A až D. Měřicí kanály budou zapojeny dle níže uvedené tabulky 4.3. Tabulka dále shrnuje, na kterých vzorcích bude provedeno zapouzdření.

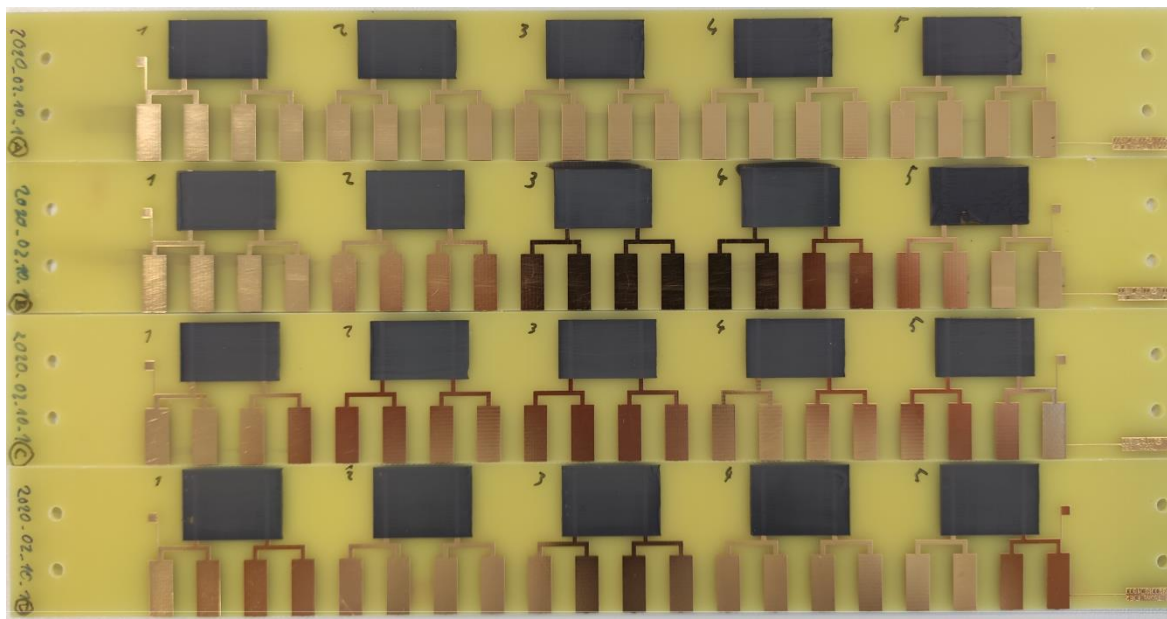
Tab. 4.3: Označení vzorků termistorů a rozdělení zapouzdření

Formulace (zkratka)	Označení desky	Měřicí kanál	Zapouzdření
2019_04_04_1 (F1)	A	CH 101-105	NE
	B	CH 106-110	NE
	C	CH 111-115	ANO
	D	CH 116-120	ANO
2019_04_08_1 (F2)	A	CH 121-125	NE
	B	CH 126-130	NE
	C	CH 131-135	ANO
	D	CH 136-140	ANO
2020_02_10_1 (F3)	A	CH 201-205	NE
	B	CH 206-210	NE
	C	CH 211-215	ANO
	D	CH 216-220	ANO

Kanály začínající číslem 1 označují první multiplexní kartu a kanály začínající číslem 2 druhou multiplexní kartu. V rámci jedné desky budou vzorky zapojeny ve vzestupném pořadí.

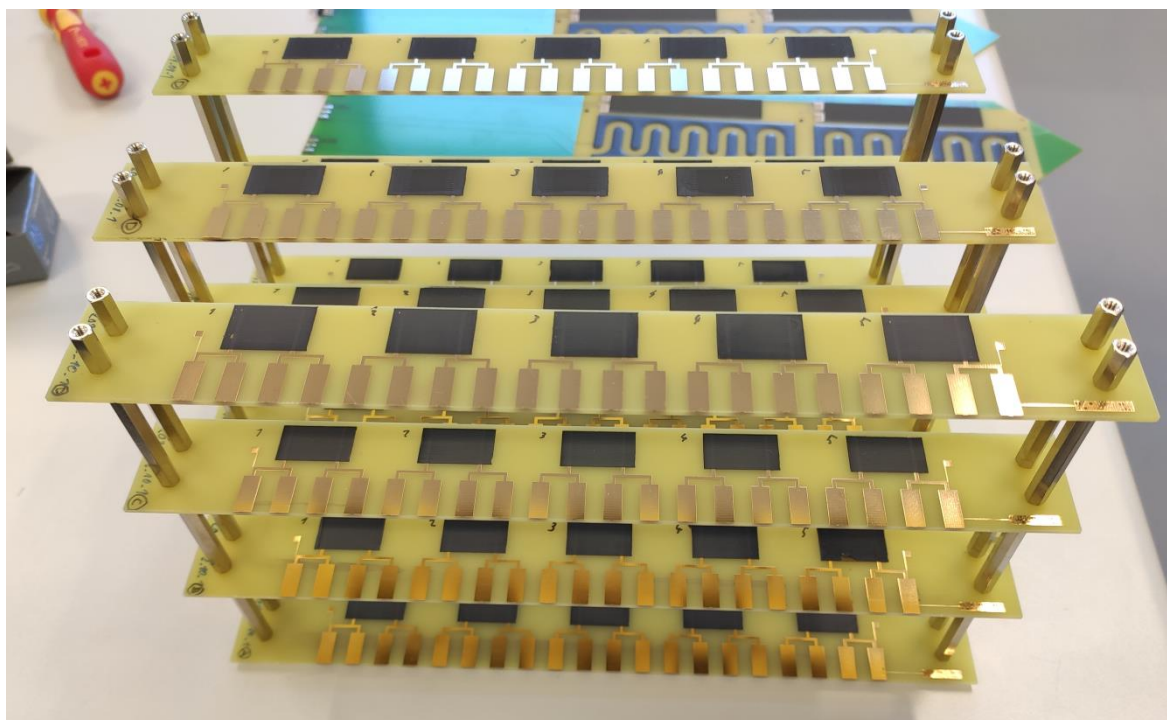
Barevné značení ve výše uvedené tabulce bude dodržováno v grafech v následující kapitole zabývající se vyhodnocením. V případě, že bude v grafu vícekrát stejná formulace, budou použity odstíny daných barev. Na jednotlivé vzorky bude odkazováno zkratkou formulace, označením desky a případně číslem měřicího kanálu. Například na vzorek z první formulace na první desce bude odkázáno následovně: F1-A (CH101).

Podle uvedeného značení byly popsány jednotlivé desky se senzorovými formulacemi. Na obrázku 4.4 je detail jedné skupiny se značením.



Obr. 4.4: Detail skupiny termistorů se značením

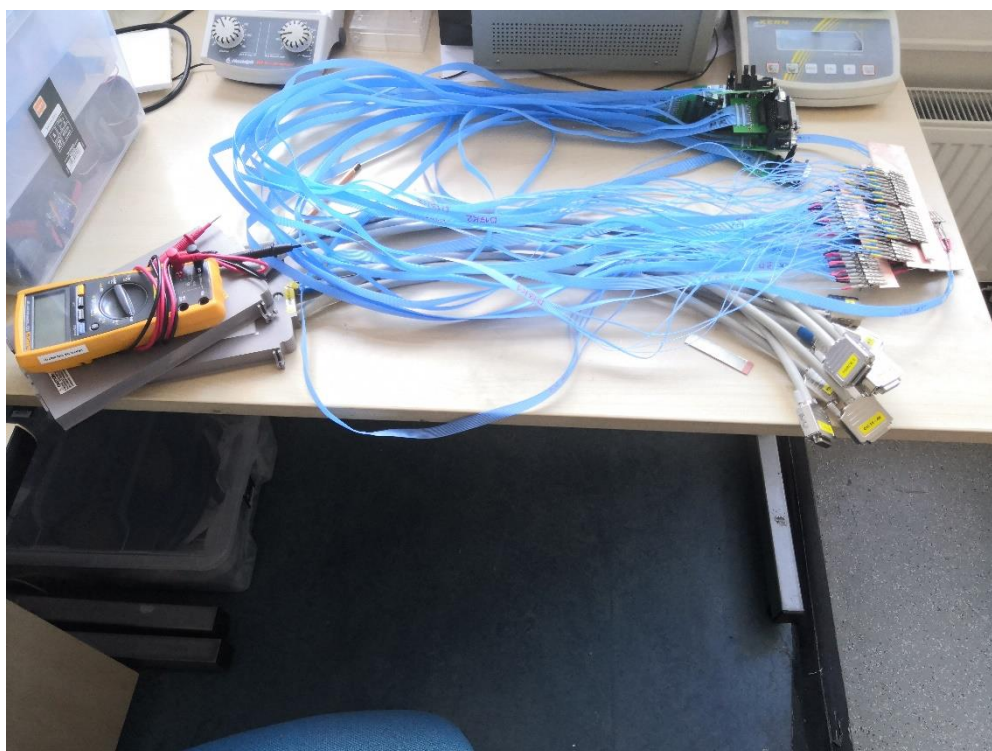
Pro snadnější umístění do testovacích zařízení byly jednotlivé desky v rámci jedné formulace spojeny do skupin pomocí distančních sloupků. Provedení je vyobrazeno na obrázku 4.5.



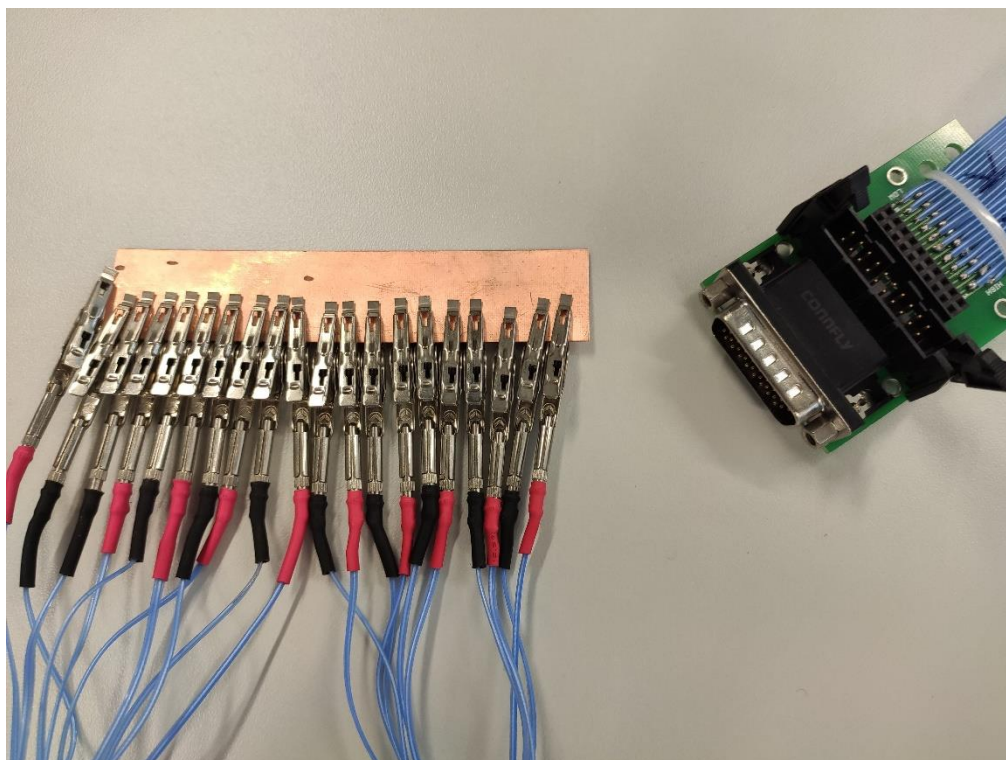
Obr. 4.5: Desky spojené do skupin dle tiskové formulace

4.3.3 Kabeláž a použité přístroje

Připojení vzorků bude realizováno jako rozebíratelné pro snadnou manipulaci. Vzorky budou s měřicím zařízením propojeny pomocí plochých kabelů s teplotní odolností izolace do 200 °C, které jsou na straně vzorku zakončeny mikro krokosvorkami Hirschmann. Ty byly zbaveny izolace, protože by nemusela vydržet teploty při dlouhodobém stárnutí. Druhý konec plochých kabelů je zakončen D-sub konektorem pro připojení k měřicí kartě multimetru. Jeden kabel disponuje deseti měřicími kanály. Kabeláž je stávající, před měřením byla ověřena její funkčnost měřením odporu jednotlivých kanálů mezi krokosvorkou a přípojovacím konektorem. Nalezené defekty byly opraveny. Před připojením na vzorky termistorů byly svorky fixovány na pomocnou desku pro snadnější dodržení souslednosti kanálů a jako prevence zapletení a případného poškození. Na *obrázku 4.6* níže je vyobrazena připravená kabeláž, *obrázek 4.7* na další stránce pak ilustruje detail zakončení kabeláže.



Obr. 4.6: Připravená měřicí kabeláž



Obr. 4.7: Detail kabeláže s mikro krokosvorkami a D-sub konektorem

Následující tabulka 4.4 shrnuje přístroje potřebné pro realizaci měřicího plánu dle kapitoly 4.2 Testovací plán.

Tab. 4.4: Přístroje pro měření

Název přístroje	Označení, typ výrobce	Účel použití
Klimatická komora	Vötsch VCV ³ 7060-5-S	Kalibrační měření, vliv vlhkosti
Laboratorní horkovzdušná pec	Memmert UF55m	Stárnutí
Digitální multimetr	DMM Keithley 2701/E	Měření odporu termistorů
Multiplexní karta	Keithley 7708	Pro zapojení více kanálů
Notebook se softwarem Keithley Kickstart		Konfigurace měření, záznam dat z multimetru
PC se softwarem Vötsch		Nastavení a záznam dat z klimakomory
Mikroskop	OLYMPUS SZX10	Mikroskopická inspekce

5 Realizace a vyhodnocení měření

V první části této kapitoly je popsán způsob realizace jednotlivých měřících experimentů. Další část kapitoly se věnuje vyhodnocení dílčích částí testovacího plánu, diskuse výsledků je pak předmětem kapitoly 6.

5.1 Realizace experimentu

V této podkapitole je blíže popsáno zapojení měřících experimentů, konkrétně umístění a zapojení vzorků pro měření kalibrací a dále zapouzdření před dlouhodobým stárnutím a umístění vzorků do testovací pece.

5.1.1 Měření výchozí a závěrečné kalibrace

Kalibrační měření bylo provedeno dle navrženého testovacího profilu z kapitoly 4.2.1. Výchozí a závěrečná kalibrace. Vzorky byly umístěny do klimatické komory Vötsch VCV³ 7060-5-S (viz *obrázek 5.1*). Kabeláž byla ke vzorkům přivedena přes průchodku ve stěně komory, multimetr pro měření odporu vzorků byl umístěn na stolku vedle komory společně s notebookem pro záznam dat. Data ze vzorků byla měřena jednou za minutu. Kromě dat ze vzorků byla zaznamenána také data z klimatické komory (teplota, relativní vlhkost). Data byla měřena opět jednou za minutu. Výstupem měření je dvojice souborů formátu .csv s naměřenými daty. Data z měření vzorků obsahují pro každý kanál dva sloupce, časový údaj a naměřený odpor. Data z klimatické komory obsahují časový údaj, nastavenou a reálnou teplotu komory, nastavenou a reálnou relativní vlhkost v komoře.

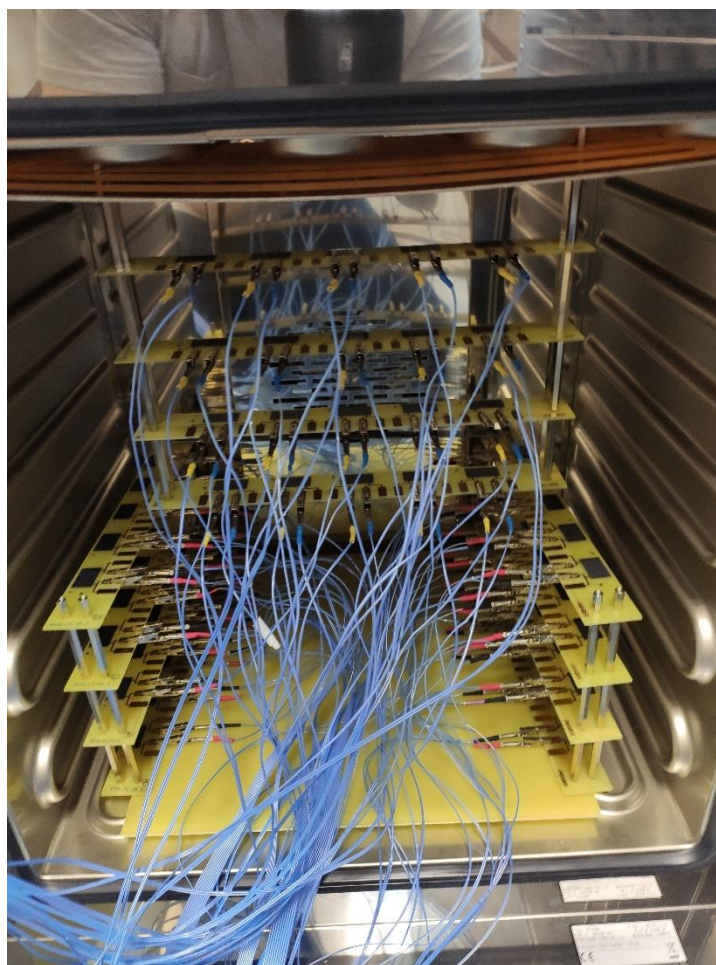


Obr. 5.1: Umístění vzorků do klimatické komory pro kalibrační měření. Vlevo detail vnitřního rozmístění v komoře, vpravo pohled na komoru a vyvedenou kabeláž

5.1.2 Dlouhodobé stárnutí a zapouzdření

Před začátkem stárnutí bylo provedeno zapouzdření části vzorků. Zapouzdření bylo provedeno překrytím jednotlivých sensorových elementů adhezivní páskou a následně mokřým přelakováním celé desky polyuretanem. Před lakováním byly kontaktní plošky zakryty páskou, která byla po lakování odstraněna.

Po dvou dnech od lakování (čas na zaschnutí polyuretanu) byly vzorky připravené na stárnutí. Dlouhodobé stárnutí při teplotě 100 °C o délce 1000 h bylo provedeno v laboratorní horkovzdušné peci Memmert UF55m. Záznam elektrického odporu vzorků probíhal každých 10 minut. Dvojice testovacích panelů byla položena na dno pece, třetí skupina byla zavěšena ke stropu pece přišroubováním k pomocné desce, instalované v pozici pro polici. Umístění vzorků v testovací peci je na *obrázku 5.2*.



Obr. 5.2: Umístění vzorků do pece pro dlouhodobé stárnutí

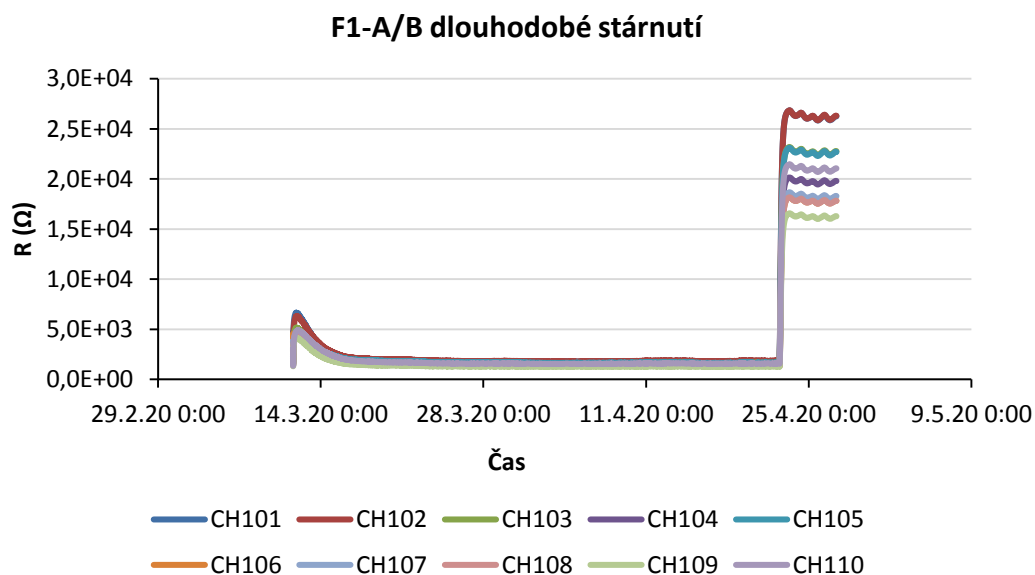
Multimetr pro záznam dat byl umístěn na stolku poblíž pece. Kabeláž byla vytažena přes pružné těsnění dveří pece, kde byla uchycena lepicí páskou ke stěně. Po skončení testu byly vzorky ponechány ve vypnuté peci pro postupnou aklimatizaci. Výstupem je .csv soubor s časy měření a odpory sensorových elementů. Dále byl z pece získán logovací soubor s měřením teploty z referenčního čidla pece.

5.2 Analýza naměřených dat

Tato podkapitola popisuje postup získání výsledků měření, jejich postupnou analýzu a vyplávající závěry. Ačkoliv byla testovací sekvence provedena v chronologickém pořadí výchozí kalibrace, stárnutí, závěrečná kalibrace, bude stárnutí, jakožto stěžejní část testování popsána v následujícím textu jako první. Důvodem je, že vyhodnocení výchozí i závěrečné kalibrace je podobné a výsledky jsou interpretovány jako porovnání stavu před a po stárnutí, kdy výchozí kalibrace slouží jako reference. Před vyhodnocením stárnutí je třeba konstatovat, že z výchozí kalibrace plyne, že všechny experimentální termistory se chovají dle očekávání, tedy vykazují exponenciální charakter závislosti odporu na teplotě. Zpracování dat bylo provedeno v programu Microsoft Excel.

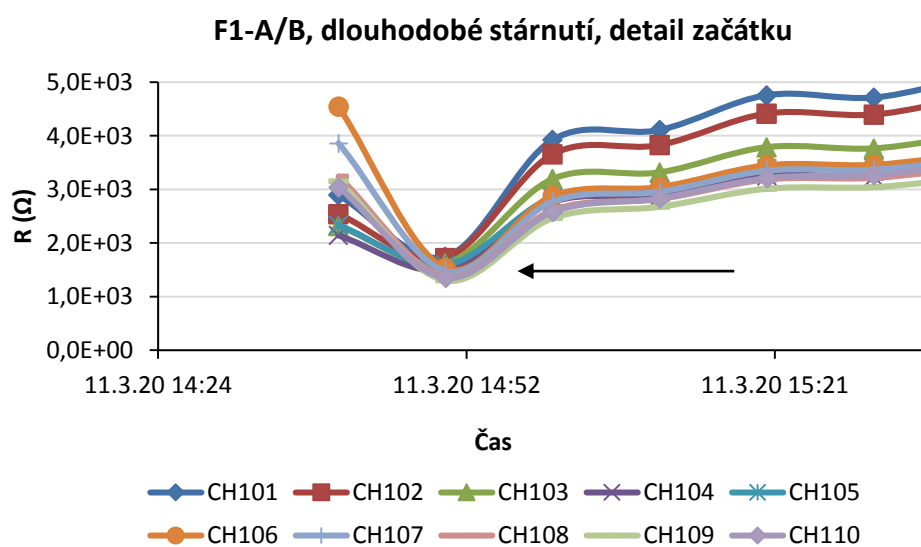
5.2.1 Analýza dlouhodobého stárnutí

V prvním kroku byly vykresleny grafy změny odporu v čase z jednotlivých sensorových elementů. Vzorky byly sdruženy do skupin podle typu formulace a podle toho, zda byly zapouzdřeny, či ne. Například pro formulaci F1 byly tedy vytvořeny dva grafy, první z nich obsahuje kanály 101 až 110 (nezapouzdřené) a druhý z nich obsahuje kanály 111 až 120 (zapouzdřené), dle logiky z tabulky 4.3. Je třeba poznamenat, že u dvojice kanálů došlo k výpadku, konkrétně CH111 a 116.



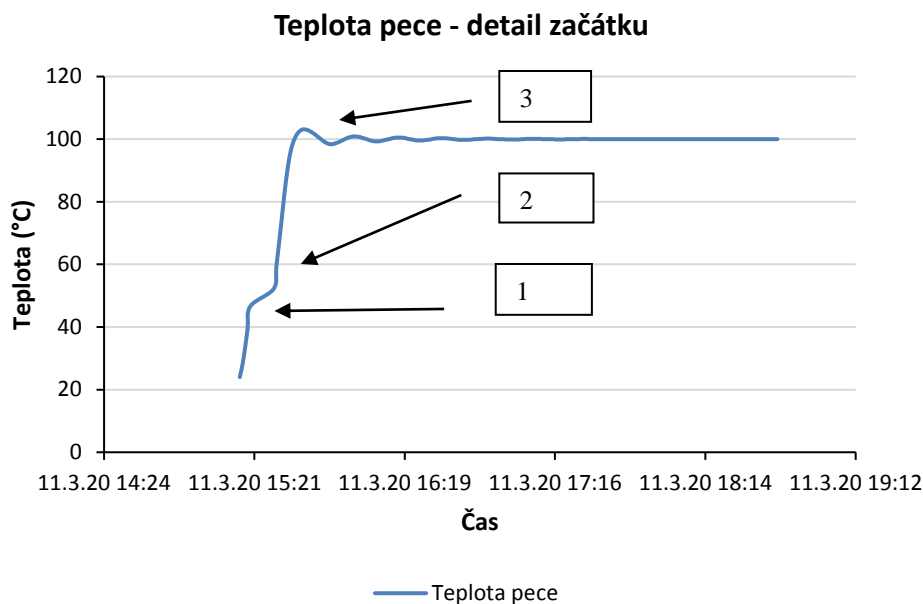
Graf 5.1: Dlouhodobé stárnutí, celý průběh pro formulaci F1 v nezapouzdřené variantě

V grafu 5.1 jsou zobrazeny křivky stárnutí pro F1-A/B (CH101-110). Na grafu lze pozorovat některé významné části. V počátku stárnutí lze pozorovat strmý nárůst a pak pozvolné klesání odporu. Po ukončení stárnutí nárůst odporu, což odpovídá návratu teploty ze 100 °C na pokojovou hodnotu a po ustálení zvlnění charakteristik, které znamená střídání dne a noci a s tím kolísající změny teploty. Pro analýzu začátku stárnutí je třeba se podívat na detail v počátku křivek, který je zobrazen na grafu 5.2 níže.



Graf 5.2: Detail počátku stárnutí pro formulaci F1 v nezapouzdřené variantě, šipka znázorňuje počáteční bod stárnutí pro další vyhodnocení

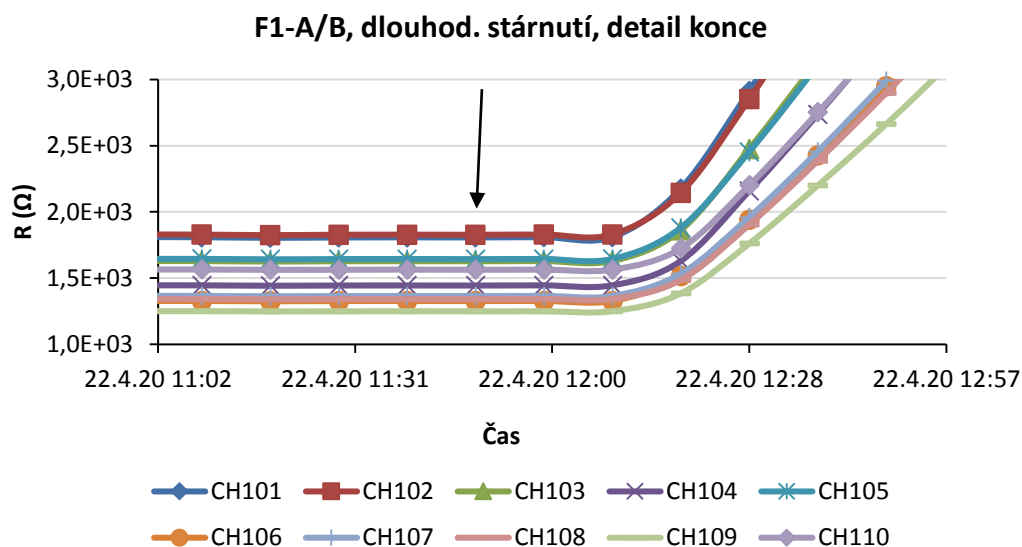
Z grafu 5.2 je patrný pokles odporu v počátku stárnutí, což odpovídá nárůstu teploty. Odpor klesá až do zvýrazněného bodu, ze kterého odpor dále roste. Co se v tento okamžik děje pomůže odhalit průběh teploty v testovací peci.



Graf 5.3: Detail průběhu teploty v peci v počátku měření

Výše uvedený graf 5.3 obsahuje trojici zvýrazněných bodů. V bodě 1 došlo k otevření pece, protože jeden kanál indikoval rozpojené měřící svorky. V bodě dva byla pec zavřena a bylo spuštěno měření odporu vzorků. Bod 2 tedy odpovídá začátkům naměřených křivek stárnutí, viz graf 5.2. Bod 3 na grafu 5.3 pak odpovídá dosažení teploty 100 °C a časově odpovídá zvýrazněnému minimu na křivkách v grafu 5.2. Zvýrazněné minimum z grafu 5.2 tedy lze považovat za počátek stárnutí, jedná se o první naměřenou hodnotu při dosažení 100 °C. Stejný jev s výskytem minima lze pozorovat na průbězích všech vzorků.

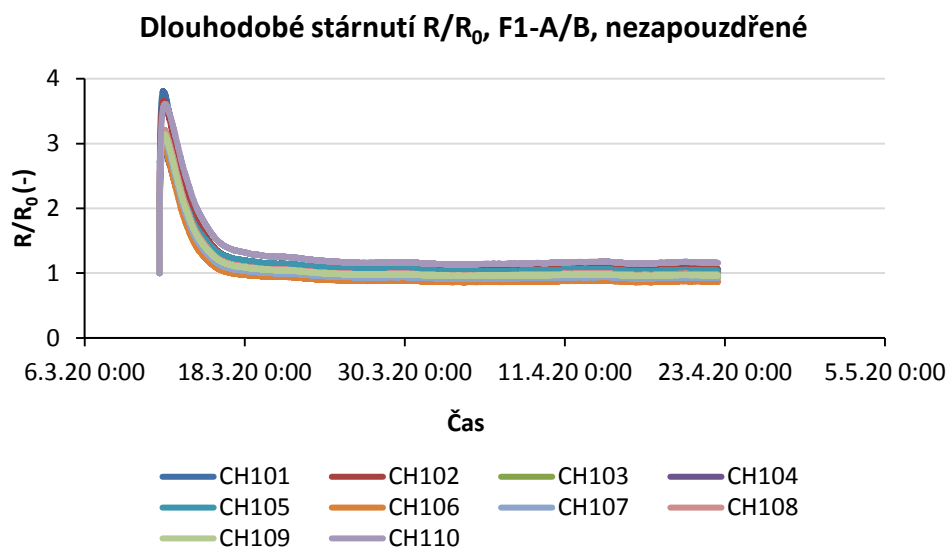
Po určení bodu začátku stárnutí byl určen přesný bod konce stárnutí.



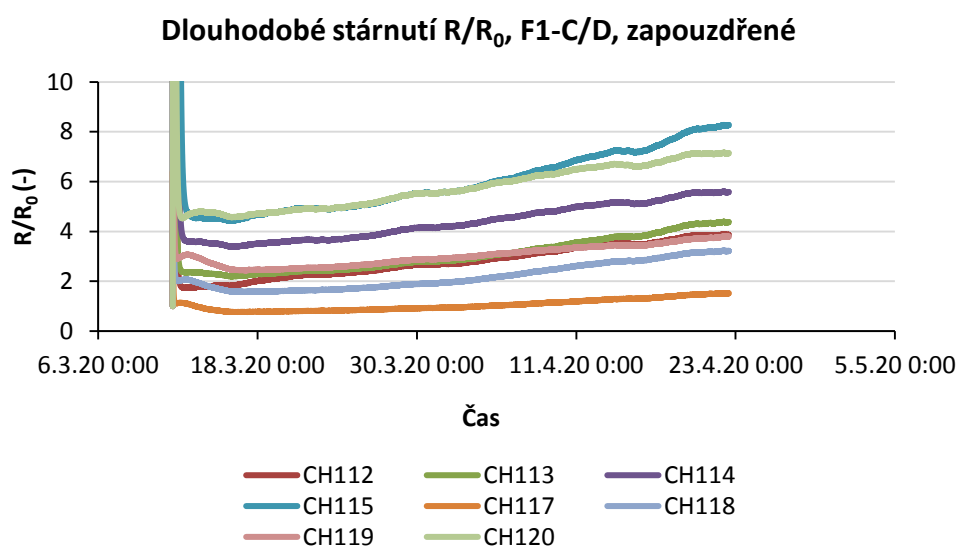
Graf 5.4: Detail konce stárnutí pro formulaci F1 v nezapouzdřené variantě, šipka znázorňuje koncový bod stárnutí pro další vyhodnocení

Na grafu 5.4 je zobrazen detail konce stárnutí FI-A/B (CH101-110). Jako koncový bod stárnutí byl zvolen zvýrazněný bod, jehož časová značka je 22.4.2020 11:48. Jako koncové body průběhů všech vzorků byly vybrány body se stejnou časovou značkou.

Výše uvedený postup popisoval způsob určení začátečních a koncových bodů stárnutí. Na základě těchto bodů byl proveden výběr dat, která odpovídají pouze stárnutí. Výchozí bod stárnutí (v detailu na grafu 5.2) byl zvolen jako referenční odpor R_0 a všechny následující hodnoty průběhu jsou k tomuto odporu vztaženy. Tím byly získány grafy průběhu pouze pro stárnutí a v poměru k výchozímu odporu stárnutí, čímž lze mezi sebou jednotlivé skupiny názorně porovnat. Na následující stránce je zobrazena dvojice grafů. Oba ukazují chování formulace F1, jeden graf je se zapouzdřením, druhý bez zapouzdření. Grafy pro formulace F2 a F3 jsou pak uvedeny v příloze B.



Graf 5.5: Graf relativního stárnutí pro formulaci F1, nezapouzdřená varianta



Graf 5.6: Graf relativního stárnutí pro formulaci F1, zapouzdřená varianta

Při pohledu na graf 5.5 je jasně vidět výrazné maximum průběhu hned po začátku stárnutí. Stejný jev lze pozorovat u formulace F2 i F3 u nezapouzdřených variant, viz příloha B. Tento jev lze přisoudit probíhajícímu vysychání struktury a odpařování pomocných látek pro výrobu termosenzitivní vrstvy. Podobné maximum hned po začátku stárnutí nastalo i u všech zapouzdřených variant. Odeznění maxima bylo pro zapouzdřené varianty rychlejší, ale došlo k násobně vyššímu nárůstu odporu oproti variantě nezapouzdřené. Například zatímco u formulace F1 dosahuje změna odporu při počáteční špičce maximálně 3,7násobku R_0 , ve variantě zapouzdřené se nárůst pohybuje v tisícinásobcích.

Formulace F1 v nezapouzdřené variantě vykazuje rychlé ustálení zpět na hodnoty blízké výchozímu odporu a poté se chová již stabilně. U formulace F2 lze pozorovat pozvolně klesající trend změny odporu po celou dobu stárnutí. Formulace F3 má proměnný trend růstu, který je v konečných hodnotách vzdálen od původního odporu několikanásobně.

Zapouzdřené varianty všech tří formulací vykazují růstový charakter po celou dobu stárnutí. Jejich výsledné odpory končí na mnohanásobcích původního odporu s velkou variabilitou a průběhy nelze považovat za stabilizované.

Pro porovnání celkové změny odporu během stárnutí byl spočítán drift jako:

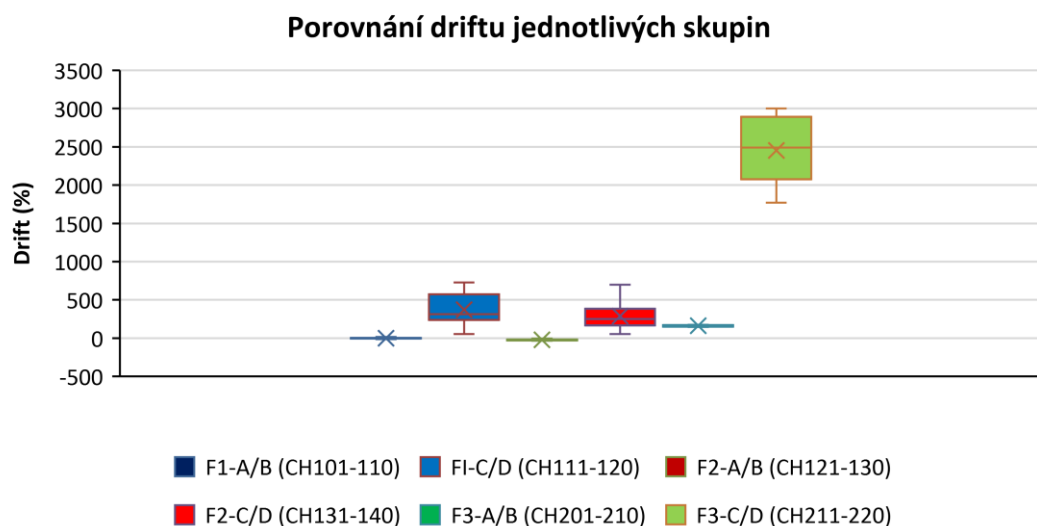
$$\delta R = \frac{R - R_0}{R_0} 100 \quad (\%) \quad (5.1)$$

Kde R je odpor v posledním bodě stárnutí, R_0 je odpor v počátečním bodě stárnutí a výsledek je v procentech. Drift byl spočítán pro každý vzorek a následně byl pro každou skupinu (typ formulace a zapouzdření) určen průměrný drift, mediánový drift, maximální a minimální hodnota, variační rozpětí a směrodatná odchylka. Vypočtené hodnoty shrnuje následující tabulka 5.1.

Tab. 5.1: Analýza procentuálního driftu při dlouhodobém stárnutí, barevné značení odpovídá grafům

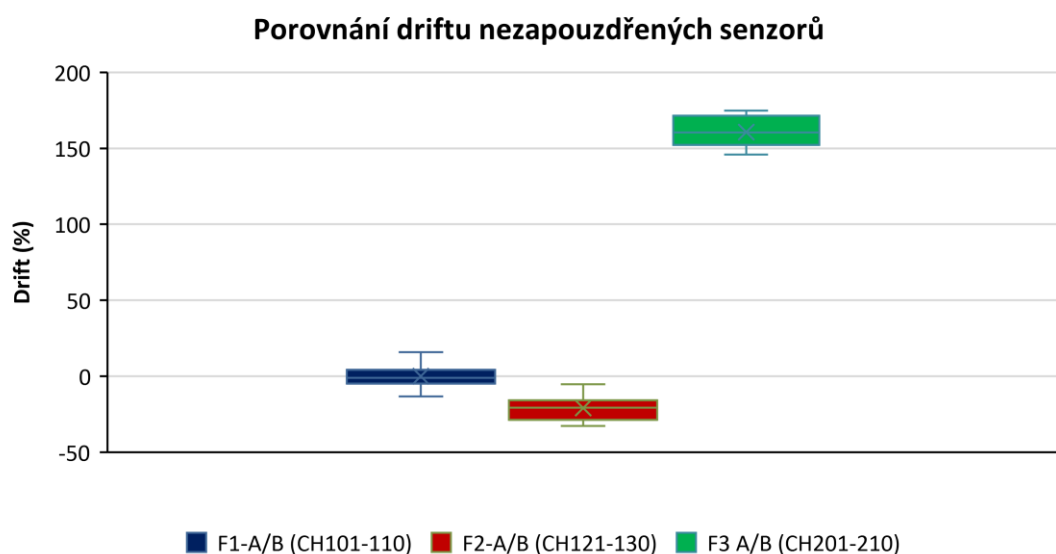
Analýza driftu δR v procentech						
Stat. Veličina	CH101-110	CH111-120	CH121-130	CH131-140	CH201-210	CH211-220
MAX	15,85	726,89	-5,21	700,53	174,92	3002,94
MIN	-13,33	51,96	-32,76	54,40	145,95	1771,72
Rozpětí	29,18	674,94	27,55	646,13	28,97	1231,21
Průměr	-0,11	371,95	-20,95	286,96	160,80	2454,16
Sm. odchylka	7,62	204,82	7,94	175,16	10,25	404,83
Medián	-0,98	311,86	-20,65	252,32	160,48	2492,33

Na základě tabulky 5.1 byl vykreslen statistický graf 5.7 typu Boxplot (krabicový graf) pro porovnání hodnot driftu a jejich variability. Hraniční body jsou maxima a minima, hranice obdélníku jsou 1. a 3. kvartil, dělicí čára obdélníku je medián a křížek označuje průměr.



Graf 5.7: Graf pro porovnání driftu jednotlivých variant

Z tabulky 5.1 a grafu 5.7 jasně plyne, že zapouzdřené varianty formulací vykazují velký drift s velkou variabilitou. Nejvíce se tak projevuje formulace F3. Pro srovnání pouze zapouzdřených skupin s nižší variabilitou byl vykreslen graf 5.8.



Graf 5.8: Graf pro porovnání driftu nezapouzdřených variant

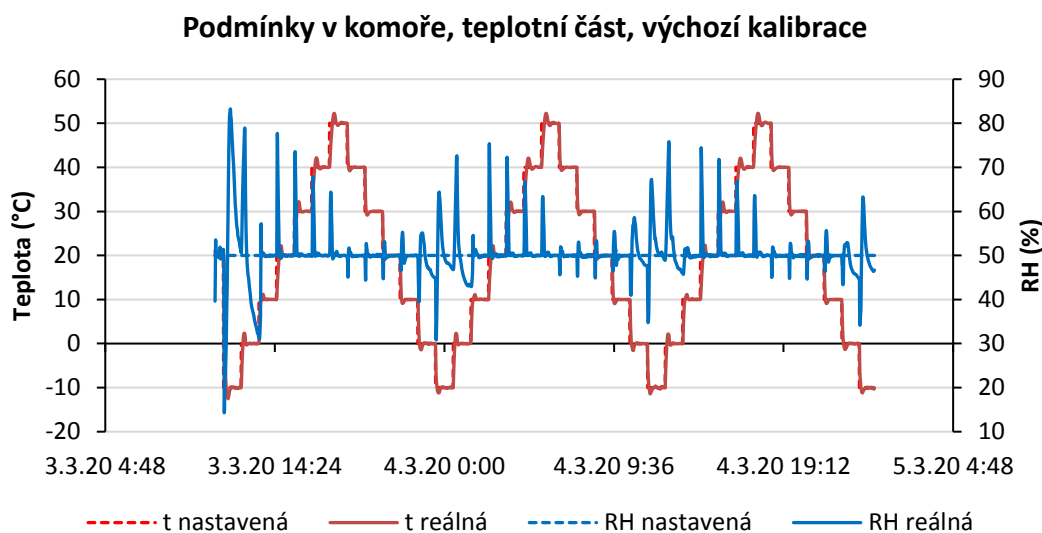
U nezapouzdřených variant dosahuje dobrých výsledků formulace F1. Výsledné hodnoty driftu se pohybují v rozpětí 29,18 % s mediánem -0,98 %. tedy v okolí výchozího odporu stárnutí. Formulace F1 má také nejmenší variabilitu driftu se směrodatnou odchylkou 7,65 %. U některých vzorků došlo ke kladnému driftu, u některých k zápornému.

Formulace F2, nezapouzdřená varianta, je z hlediska variability driftu na tom podobně, jako formulace F1, ale její drift se pohybuje v záporných hodnotách od -5,21 % do -32,76 % s tím, že po celou dobu stárnutí má mírně klesající tendenci a nelze prohlásit, že by formulace byla stabilizovaná. Směrodatná odchylka je pro formulaci F2 mírně vyšší a sice 7,94 %. Formulace F3 v nezapouzdřené variantě dosahuje vysokého driftu a z průběhu stárnutí nelze prohlásit, že se chová stabilně. Z nezapouzdřených variant má také největší variabilitu driftu se směrodatnou odchylkou 10,25 %.

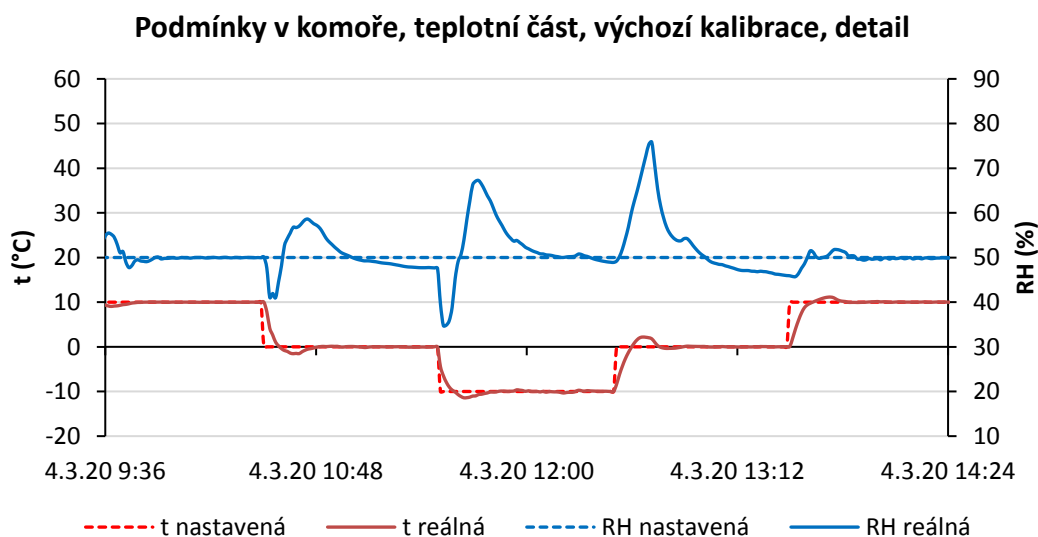
Důležité je porovnání vzorků s provedeným zapouzdřením a bez zapouzdření. Vzorky s provedeným zapouzdřením vykazují dlouhodobý nestabilizovaný nárůst odporu a velmi vysokou variabilitu odporu v koncovém bodě stárnutí. Lze předpokládat, že zmíněný nárůst odporu je způsoben vlivem zapouzdření. Zapouzdření bylo provedeno překrytím termosenzitivních vrstev adhezivní páskou. Lepidlo z adhezivní pásky pravděpodobně reaguje s materiálem termosenzitivních formulací a způsobuje snížení vodivosti postupným narušováním, jak proniká hlouběji do struktury. Na základě této skutečnosti jsou zapouzdřené varianty považovány za nevyhovující a v rámci dalšího vyhodnocení již nebudou uvažovány, pouze v kapitole věnující se vyhodnocení kalibračních křivek bude pro ilustraci následků zapouzdření znázorněna změna kalibrační křivky vlivem zapouzdření.

5.2.2 Analýza teplotní části kalibrace

Zdrojovými daty pro kalibraci byl výstup hodnot prostředí v klimatické komoře a odpory vzorků naměřené multimetrem. Nejdříve byla provedena analýza průběhu podmínek v klimatické komoře, poté byly vykresleny kalibrační křivky jednotlivých vzorků a následně byly tyto kalibrační křivky porovnány.



Graf 5.9: Podmínky v klimatické komoře během vlhkostní části při výchozí kalibraci



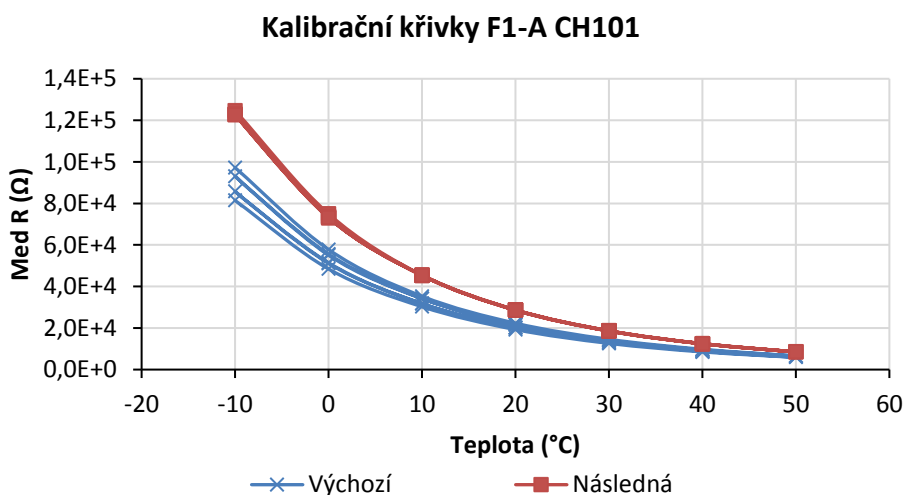
Graf 5.10: Podmínky v klimatické komoře během vlhkostní části při výchozí kalibraci, detail

Na *grafu 5.9* na předchozí stránce je zobrazen průběh parametrů v klimatické komoře během teplotní části výchozí kalibrace. Celkové průběhy z komory z výchozí i závěrečné části jsou uvedeny v příloze C. *Graf 5.10* pak poskytuje detailní náhled na *graf 5.9*. Pro připomenutí, teplota se pohybuje od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ při konstantním RH 50 %. Z uvedených grafů je patrné, že regulace vlhkosti je problematická, zejména pak pro nižší teploty, kdy její hodnotu bohužel nelze považovat za ustálenou. Teplota se pro jednotlivé schody ustálí v první třetině času.

Data z klimatické komory a data odporu vzorků jsou opatřeny časovými značkami, na základě těchto časových značek byly k sobě data přiřazeny.

5.2.2.1 Vykreslení kalibračních křivek

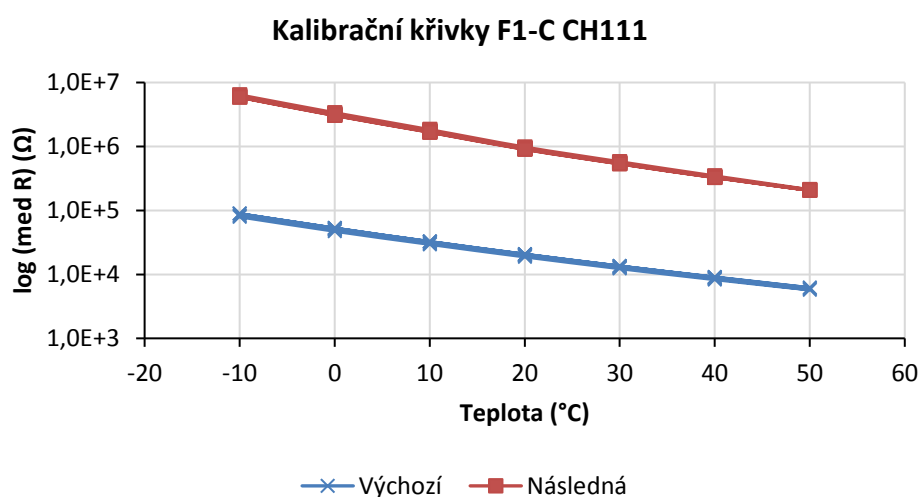
Pro vykreslení kalibračních křivek bylo potřeba získat jeden reprezentativní bod odporu pro každý teplotní schod. Po přiřazení parametrů komory k odporům dle času bylo vždy vybráno posledních dvacet hodnot na každém teplotním schodu, v tomto výběru lze teplotu považovat za ustálenou a pro vyšší teploty i vlhkost. Z těchto dvaceti hodnot byla pak funkcí medián určena reprezentativní hodnota. Medián byl zvolen kvůli nižší náchylnosti k ovlivnění případnou špičkovou hodnotou, na rozdíl od průměru. Tímto způsobem byl získán jeden bod odporu pro každou teplotu a bylo možné vykreslit kalibrační charakteristiky. Na *grafu 5.11* níže lze pozorovat kalibrační křivky pro první sensorový element CH101 z formulace F1.



Graf 5.11: Kalibrační křivky před a po stárnutí pro F1-A CH101

Kalibrační křivky jsou vykresleny před a po stárnutí. Křivky ostatních elementů jsou předmětem přílohy D. Kalibrační křivky v *grafu 5.11* jasně ukazují posun křivek vlivem stárnutí a zároveň změnu hystereze, která byla při výchozí kalibraci patrná a při následné kalibraci se již téměř neprojevuje.

Pro ilustraci změn kalibračních křivek pro zapouzdřené varianty, které neprošly stárnutím, byl vykreslen níže uvedený *graf 5.12*. Pro linearizaci křivek bylo použito semilogaritmické měřítko odporové osy. Na grafu je jasně viditelný řádový posun kalibrační křivky vůči výchozí kalibraci, tento nárůst odporu je způsoben vlivem zapouzdření.



Graf 5.12: Kalibrační křivky před a po stárnutí pro F1-C CH 111

5.2.2.2 Porovnání kalibrací před a po stárnutí

Byla provedena analýza změny kalibračních křivek před a po stárnutí. V rámci vyhodnocení kalibrací bylo se vzorky pracováno po jednotlivých deskách, každá skupina tedy čítá 5 elementů. Důvodem je menší ztráta přesnosti při výpočtu křivek, které každou desku charakterizují (oproti aplikaci výpočtu na celou formulaci) a zároveň postihnoutí případných rozdílů vzniklých vlivem rozdílné výroby každé sady.

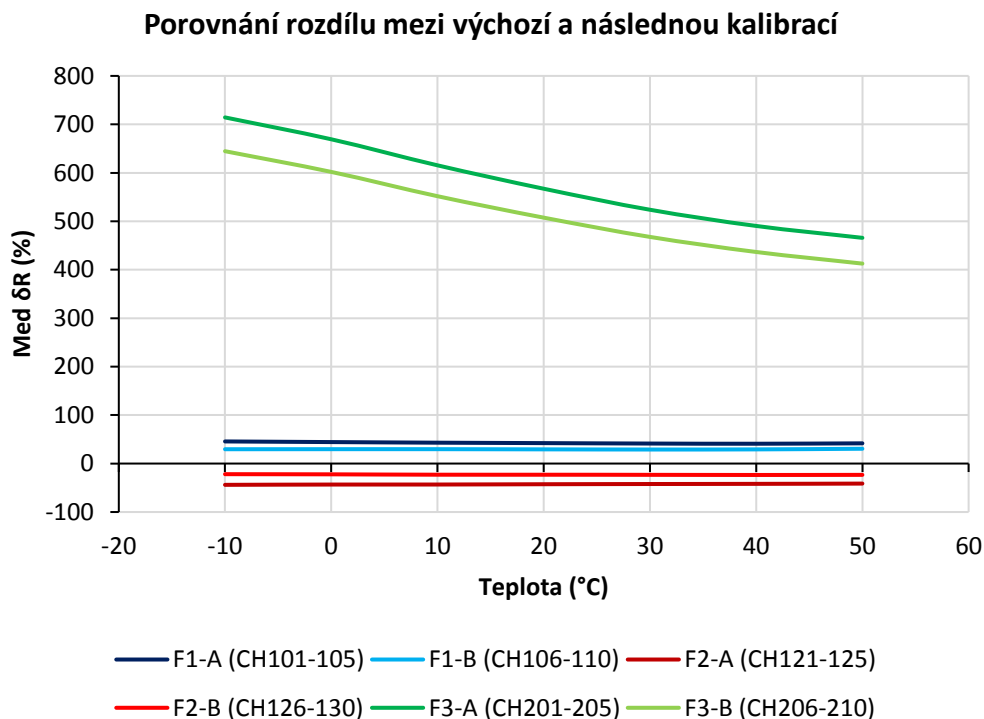
Pro porovnání kalibrací byl použit pouze třetí schodový průběh z kalibračního profilu. Při třetím průběhu lze předpokládat, že jsou sensorové elementy již adaptovány na podmínky v klimatické komoře. Vstupními daty jsou kalibrační průběhy určené dle předchozí podkapitoly. Nejdříve byla pro každý element

odstraněna hystereze pomocí funkce medián. Pro teploty od -10 °C do 40 °C se jedná o medián ze dvou hodnot (průběhu nahoru a průběhu dolů), pro 50 °C je pouze jedna hodnota. Poté byl spočítán relativní rozdíl mezi výchozí a následnou kalibrací dle níže uvedeného vzorce.

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R_0} 100 = \frac{R - R_0}{R_0} 100 (\%) \quad (5.2)$$

Jako referenční hodnoty R_0 jsou použity hodnoty kalibrace před stárnutím, za R jsou dosazovány hodnoty z kalibrace po stárnutí. Výsledek je v procentech. Pro každou skupinu elementů byla dále provedena základní statistická analýza, tabulky s hodnotami jsou k nahlédnutí v elektronické příloze A. Z vypočtených dat byl pro porovnání použit medián rozdílů z každé skupiny elementů. Variabilita hodnot v rámci skupiny je malá, a proto je medián dostatečný údaj pro porovnání skupin.

Na základě mediánů rozdílů mezi kalibracemi byl vytvořen srovnávací *graf 5.13*.



Graf 5.13: Relativní porovnání kalibračních křivek před a po stárnutí

Formulace F1 vykazuje po stárnutí zvýšení odporu. U formulace F2 se naopak projevuje záporný posun kalibračních křivek. Formulace F3 projevuje velký nárůst odporu. U formulace F3 není křivka konstantní, pro nižší teploty je posun větší než pro vyšší teploty. U této formulace tedy nedošlo pouze k posunu kalibrační křivky, ale zároveň k jejímu natočení. Formulace F1 a F2 vykazují pouze zanedbatelné natočení charakteristik.

5.2.2.3 Porovnání hystereze

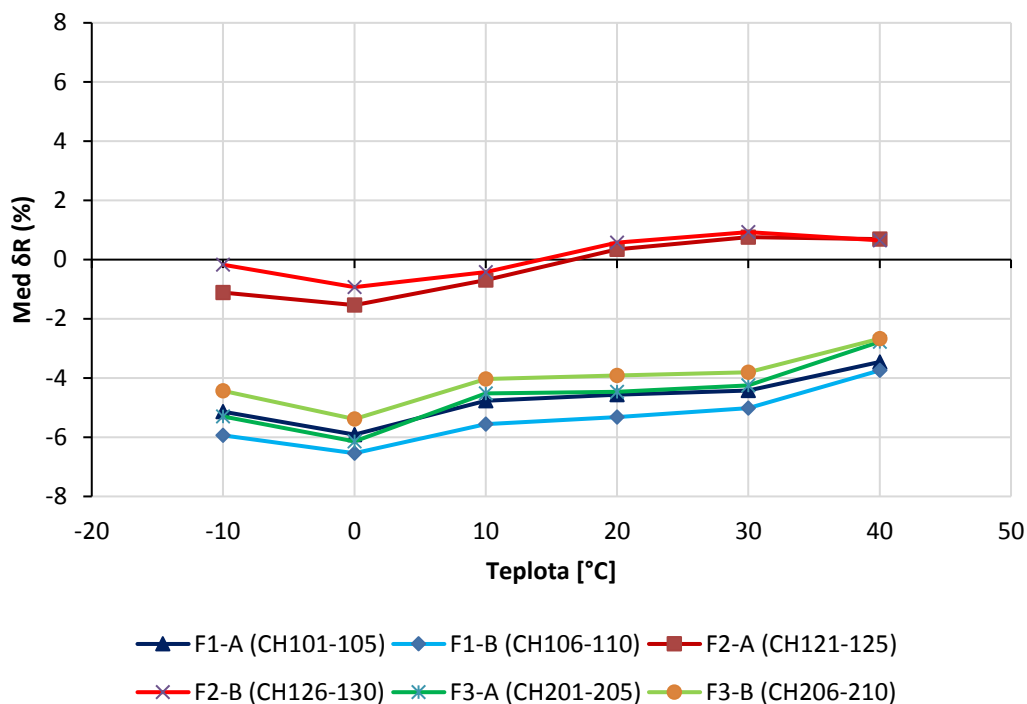
Byla provedena analýza hystereze při kalibraci před stárnutím i po stárnutí. Vstupními daty jsou mediánové kalibrační křivky vypočtené dle kapitoly 5.2.2.1. Vykreslení kalibračních křivek. Hystereze byla určována v třetím schodovém průběhu kalibračního profilu. Během třetího průběhu lze považovat vzorky za adaptované na prostředí komory. Hystereze byla určena podle vztahu (5.2). Jako referenční hodnota byla brána hodnota odporu při vzestupné části. Například pro hysterezi při teplotě 20 °C bylo do vztahu dosazeno následovně:

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R_0} 100 = \frac{R_{20down} - R_{20up}}{R_{20up}} 100 (\%) \quad (5.3)$$

Pro teplotu 50 °C je v rámci jednoho schodovitého průběhu pouze jedna hodnota, vypočtená hystereze při této teplotě je tedy nulová a v grafech není uváděna.

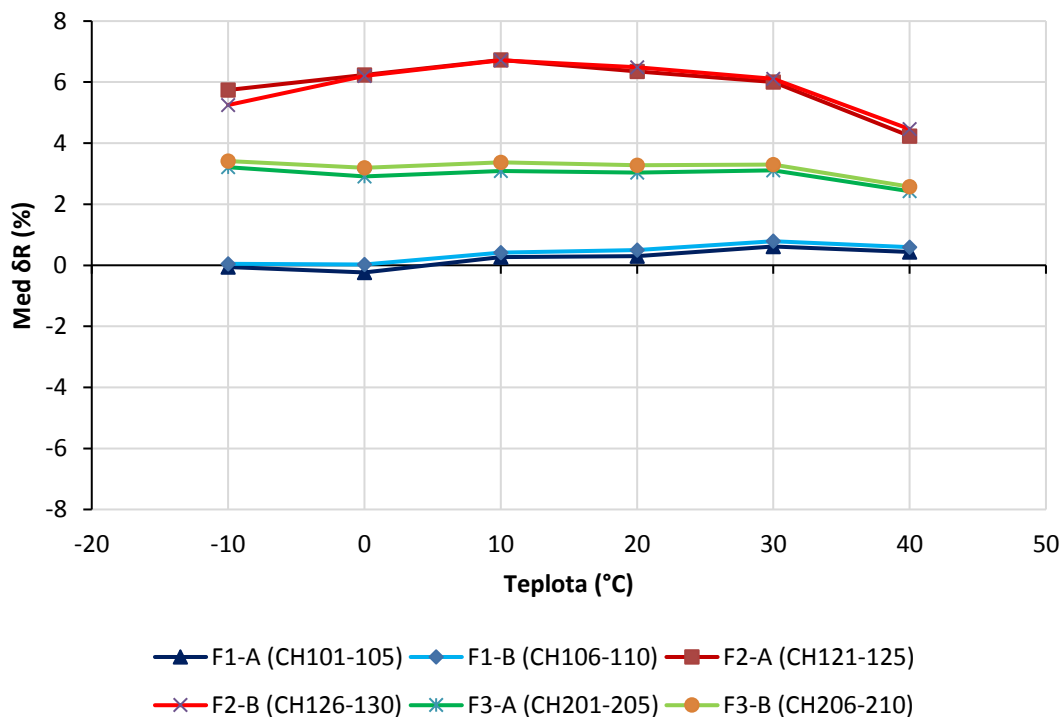
Hystereze byla vypočtena pro každý vzorek zvlášť, následně byly vzorky sjednoceny do skupin dle výrobní formulace a desky, každá skupina obsahuje 5 senzorových elementů. V rámci skupiny byla provedena základní statistická analýza. Tabulky s výsledky statistické analýzy jsou v elektronické příloze A. Variabilita mezi vzorky ve skupině je malá a chování skupiny tak lze charakterizovat mediánem. Porovnávací grafy mediánové hystereze jsou vykresleny na další stránce. Grafy nemodelují funkční závislost, proložení je pouze pro ilustraci trendu.

Hystereze při výchozí kalibraci



Graf 5.14: Hystereze při výchozí kalibraci

Hystereze při následné kalibraci

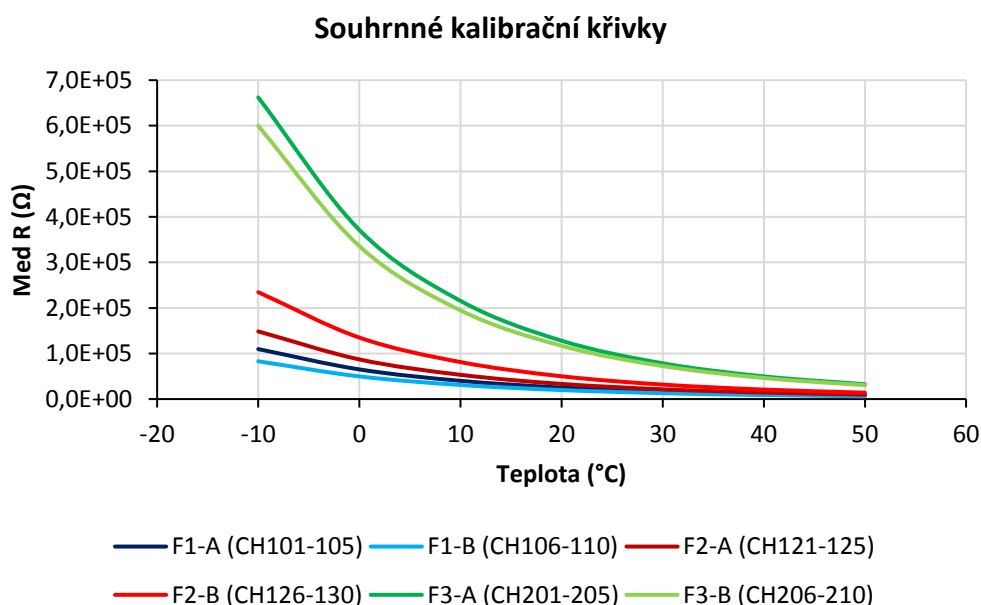


Graf 5.15: Hystereze při následné kalibraci

Z grafů 5.14 a 5.15 na předchozí straně je patrná výrazná hystereze Formulace F1 a F2 při výchozí kalibraci před stárnutím. Formulace F3 před stárnutím projevovala minimální hysterezi. Po stárnutí se při následné kalibraci projeví významné změny. Formulace F1 má po stárnutí jen minimální hysterezi, medián se pohybuje v mezích od -1 % až do 1 %. Naopak hystereze formulace F3 se značně zvýšila a je v mezích od 5 % do 7 %. Formulace F2 vykazuje hysterezi okolo 3 %.

5.2.2.4 Souhrnné kalibrační křivky

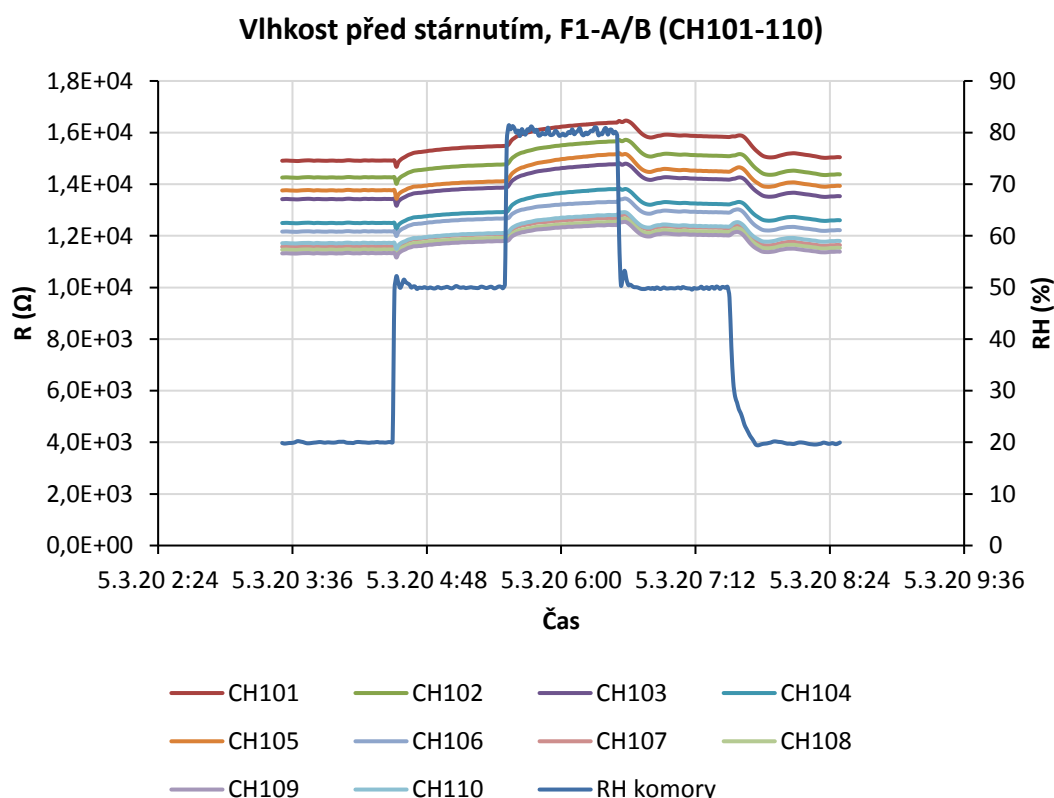
Jako poslední byly vykresleny souhrnné kalibrační křivky pro každou skupinu, pro porovnání chování skupin v rámci jednoho grafu. Pro vykreslení křivek byly opět použity průběhy ze třetí kalibrační části s odstraněnou hysterezí pomocí mediánu. Nejprve byly vykresleny křivky pro každý sensorový element, tyto křivky byly sdruženy do skupin po pěti podle jednotlivých desek a jsou k nalezení v příloze E. Pro každou skupinu byla poté určena mediánová křivka. Celkem tak bylo získáno 6 mediánových křivek, které jsou vykresleny v grafu 5.16 níže. Graf jasně ukazuje, v jakých hodnotách odporů se formulace pohybují. V kombinaci s grafy z přílohy E je však vidět nejen velká variabilita mezi skupinami ale i variabilita mezi elementy v jedné skupině. Možnosti aplikace jedné kalibrační křivky na celou sadu vzorků budou dále rozebrány v podkapitole matematický model.



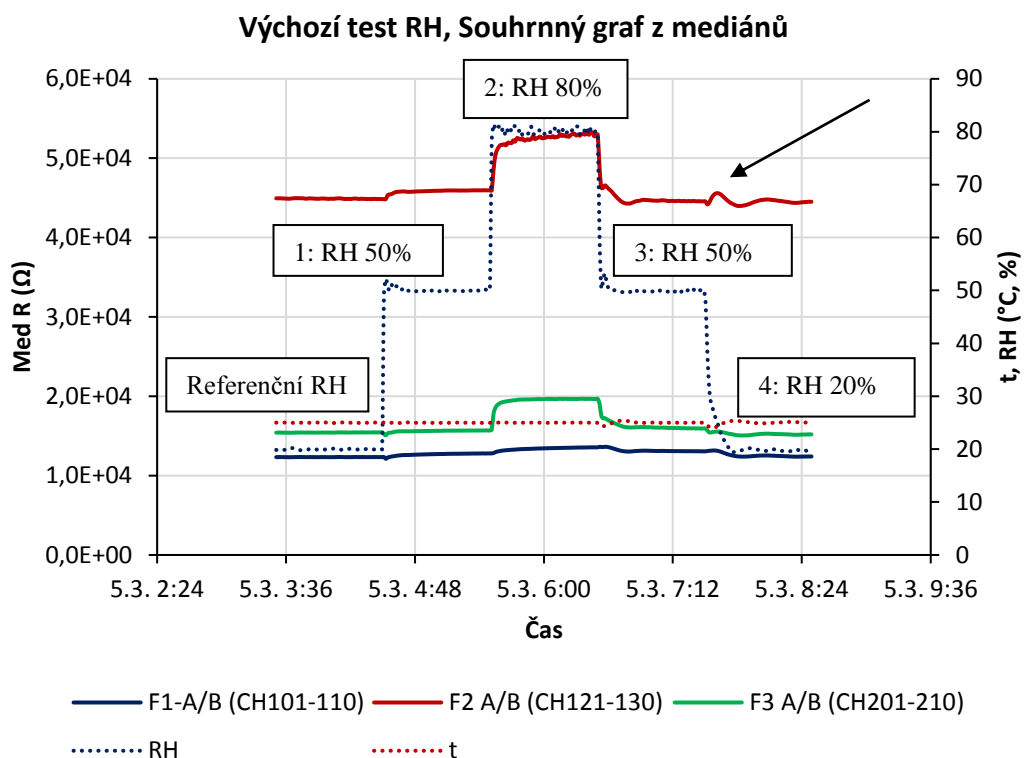
Graf 5.16: Souhrnné mediánové kalibrační křivky pro jednotlivé skupiny vzorků

5.2.3 Analýza vlhkostní části kalibrace

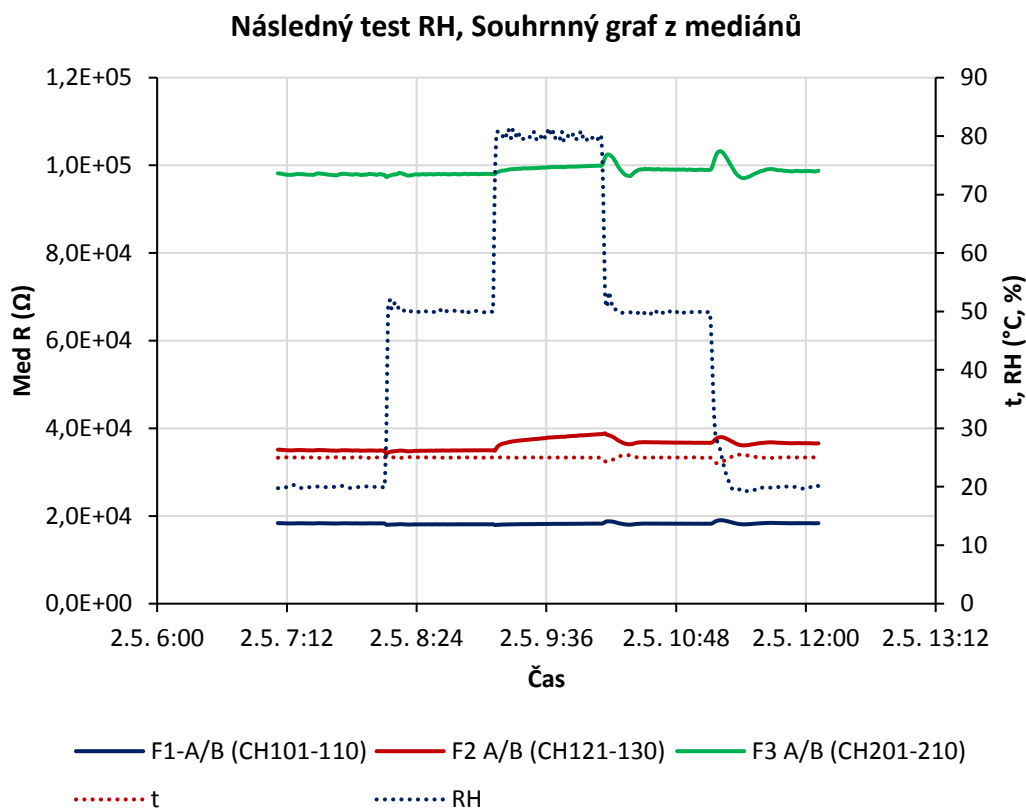
V rámci vlhkostní části byl analyzován vliv změny relativní vlhkosti při konstantní teplotě. Vliv vlhkosti byl vyhodnocen pro stav před stárnutím a po stárnutí. Stav v komoře během vlhkostní části lze vidět v druhé polovině grafů v příloze C. Pro připomenutí test probíhal při teplotě 25 °C, přičemž relativní vlhkost byla měněna od 20 % do 80 % a zpět s krokem 30 %. Nejprve byly vykresleny grafy celkového průběhu odporu během testu. Sensorové elementy byly rozřazeny do skupin jen podle druhu formulace, výrobní deska nebyla rozlišována. Příklad *grafu 5.17* pro formulaci F1 před stárnutím je uveden níže, ostatní grafy lze nalézt v příloze F. Z grafu je patrné, že průběh jednotlivých elementů se liší pouze hodnotou odporu, tvarově jsou si podobné, a tak lze pro analýzu vlivu vlhkosti použít pouze jednu reprezentativní křivku. Pro každou formulaci byl tedy spočten medián z průběhu odporu elementů a byly vykresleny porovnávací grafy, které jsou na další stránce.



Graf 5.17: Vliv vlhkosti na sensorové elementy F1-A/B CH101-110 před stárnutím



Graf 5.18: Souhrnný graf vlivu vlhkosti před stárnutím, šipka označuje zvlnění nedodržením konstantní teploty, dále jsou označeny oblasti RH pro další vyhodnocení



Graf 5.19: Souhrnný graf vlivu vlhkosti po stárnutí

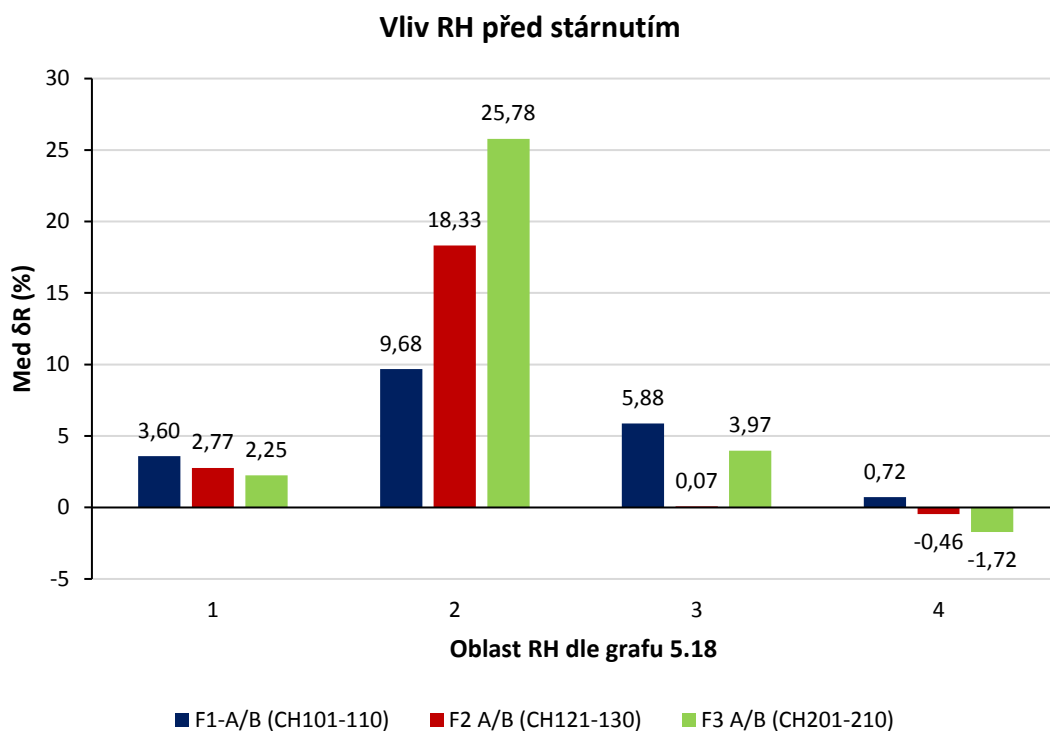
Grafy 5.18 a 5.19 zobrazují mediánové křivky vlivu RH pro jednotlivé formulace. Z prvního grafu je patrný velký vliv 80 % vlhkosti na změnu odporu u senzorů formulace F2 a F3. Z druhého grafu je pak vidět, že tento vliv se stárnutím povedlo snížit.

Šipka v grafu 5.18 zvýrazňuje zvlnění charakteristiky. Tyto zvlnění lze pozorovat na všech křivkách, jedná se o změnu odporu vlivem změny teploty v komoře, kdy komora nedokázala udržet konstantní teplotu. Ve stejném grafu jsou dále označeny oblasti vlhkosti podle jednotlivých vlhkostních schodů. Pro porovnání vlivu RH byl proveden výpočet procentuální změny odporu. Jako referenční odpor je brán odpor při prvním schodu, označeném jako referenční RH. Na každém teplotním schodu byl určen medián z posledních pěti hodnot z průběhu každého sensorového elementu, tím byla získána jedna reprezentativní hodnota z konce intervalu. Následně byl proveden výpočet procentuální změny dle rovnice:

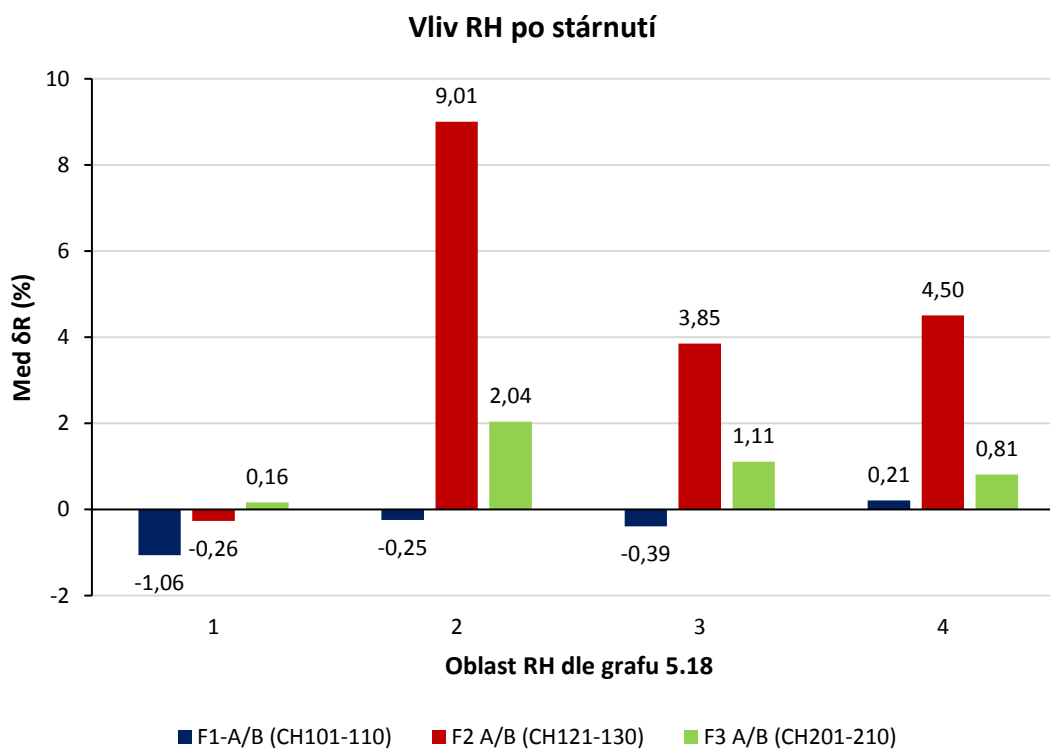
$$\delta R = \frac{\Delta R}{R_0} 100 = \frac{R - R_0}{R_0} 100 (\%) \quad (5.4)$$

Kde R_0 je medián odporu na schodu označeném jako referenční a za R jsou dosazovány hodnoty mediánu odporu z ostatních schodů. Výsledek je v procentech. Tento výpočet byl proveden pro každý sensorový element a následně byla vypočtena mediánová změna v rámci každé formulace.

Z vypočítaných hodnot pak byla vykreslena dvojice sloupcových grafů, které jsou uvedeny na následující stránce.



Graf 5.20: Procentuální porovnání vlivu RH před stárnutím



Graf 5.21: Procentuální porovnání vlivu RH po stárnutí

Z grafů 5.20 a 5.21 je patrná změna odporu působením relativní vlhkosti. Zatímco před stárnutím je vidět velký vliv RH zejména pro oblast číslo 2, která odpovídá 80 % RH, po stárnutí je vliv snížen. Formulace F1 a F3 má po stárnutí minimální změnu odporu vlivem RH. Naopak formulace F2 nadále projevuje významnou závislost změny odporu na změně RH.

5.2.4 Optická inspekce

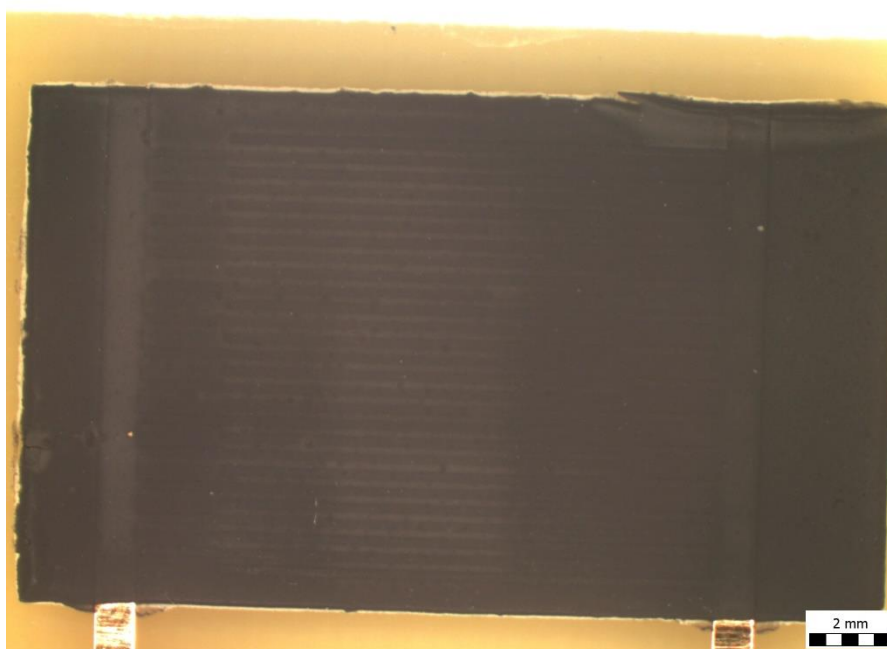
Po provedení testovací sekvence byla provedena optická inspekce vzorků mikroskopem s možností pořízení snímků. Postupně byly nafoceny všechny sensorové elementy a v případě nálezu defektu byl pořízen detail. Na obrázku níže je mikroskopické pracoviště, ve kterém byla inspekce provedena. V následujícím textu budou uvedeny významné nálezy, snímky všech ostatních jsou součástí elektronické přílohy A.



Obr. 5.3: Mikroskopické pracoviště KET na FEL ZČU

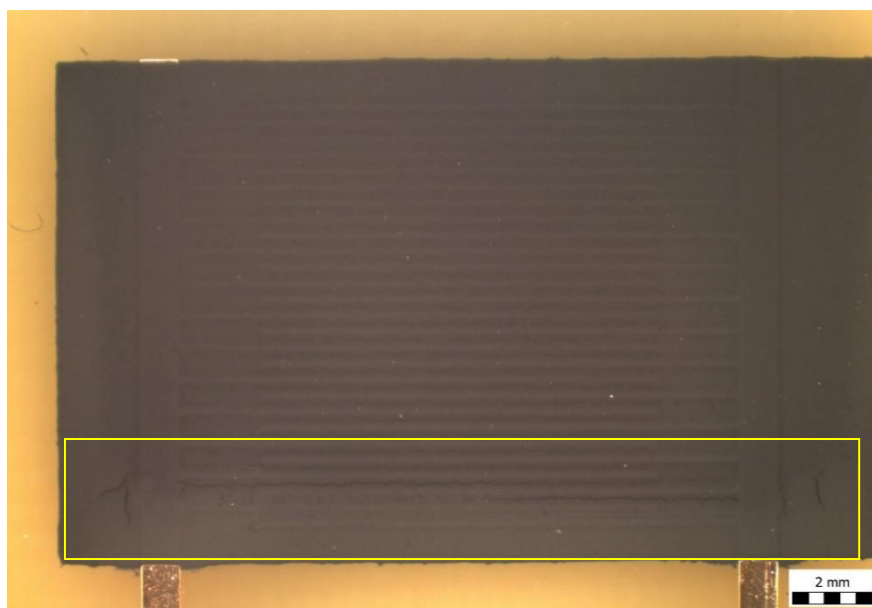
Optickou inspekci byly nalezeny vlastnosti a poškození charakteristické vždy pro konkrétní formulaci.

Na *obrázku 5.4* níže je snímek elementu CH105 z formulace F1. Vzorky této formulace nevykazují žádné známky mechanického poškození. Mají viditelnou elektrodovou strukturu a lze na nich pozorovat tmavé a světlé oblasti, které mohou souviset s nerovnoměrným rozmístěním materiálu.



Obr. 5.4: Snímek elementu CH105, formulace F1

Formulace F2 vykazuje poškození termosenzitivní vrstvy. Na snímcích níže jsou patrné praskliny v dolní části struktury. Praskliny jsou vedeny podél elektrodových prstů. Toto poškození je patrné na všech vzorcích z formulace F2. Poškození se nicméně elektricky neprojeví, vzorky po stárnutí vykazují menší odpor než před stárnutím, praskliny tedy nepřerušují vodivý kanál a pravděpodobně tak nevedou až k elektrodám a jsou jen povrchové. U vzorků je dobře viditelná elektrodová struktura.

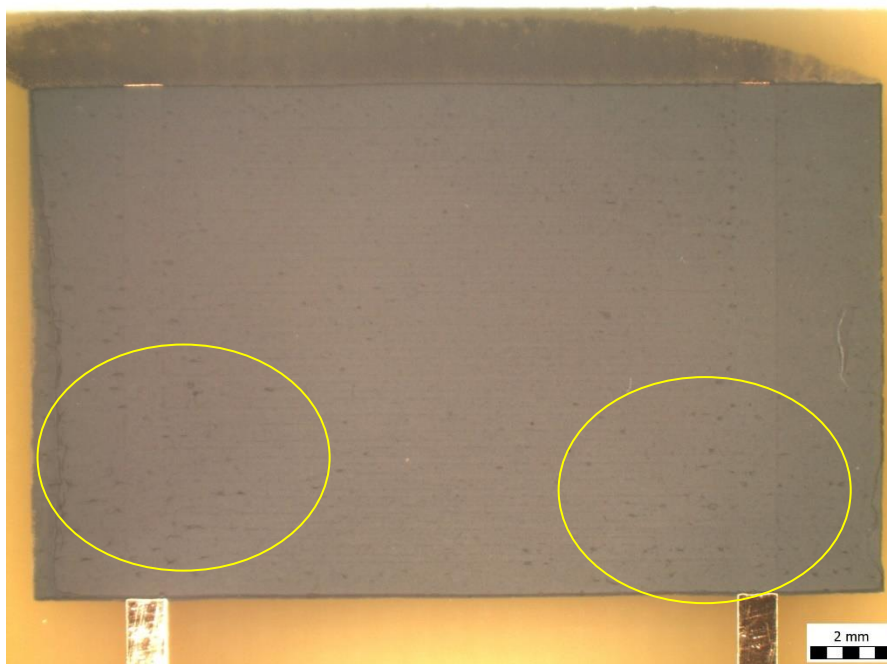


Obr. 5.5: Snímek elementu CH122, formulace F2



Obr. 5.6: Snímek elementu CH122, formulace F2, detail

Formulace F3 má patrné poškození napříč všemi sensorovými elementy. Struktura termosenzitivní vrstvy je zpuchřelá a vznikají lokální praskliny. Elektrodová struktura není u vzorků vidět. Níže na *obrázku 5.7* je snímek elementu CH208, podobný rozsah poškození vykazují i ostatní vzorky formulace F3. Extrémním případem poškození je pak element CH210 na *obrázku 5.8* na další stránce, který je kompletně zničen a je odhalena elektrodová struktura. Na odhalené elektrodové struktuře bylo provedeno měření tloušťky elektrodových prstů, zda odpovídá výrobnímu návrhu, bylo zjištěno, že ano. Měření je předmětem snímku *obrázku 5.9* taktéž na další stránce.



Obr. 5.7: Snímek elementu CH208, formulace F3



Obr. 5.8: Snímek elementu CH210, formulace F3

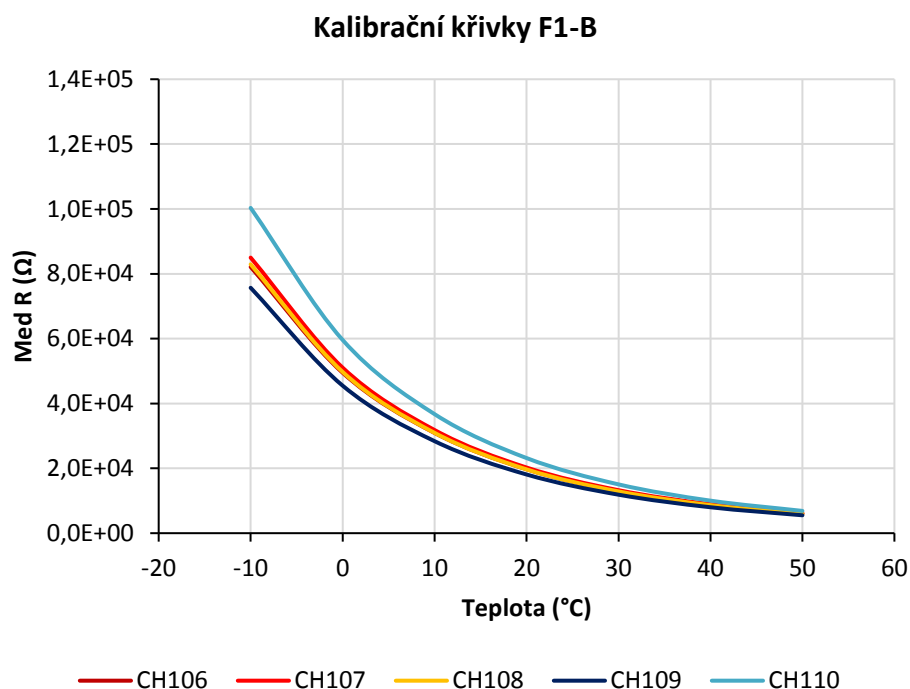


Obr. 5.9: Měření rozměrů elektrodových prstů na elementu CH210

5.2.5 Matematický model

V kapitole bude popsána aplikace trojice matematických modelů, jedná se o aproximační model a dále dvojici dle kapitoly 2: jednoduchý model a Steinhartův-Hartův model.

Modely byly počítány pro formulaci F1 desku B. Formulace F1 byla zvolena kvůli dobrým výsledkům v testování, zejména pak, protože ji dle dlouhodobého stárnutí lze prohlásit za ustálenou. Kalibrační křivky sensorových elementů F1-B jsou k nahlédnutí na *grafu 5.22* níže.



Graf 5.22: Kalibrační křivky pro F1-B

Z pětice vzorků z grafu výše byl zvolen element CH108 jako reprezentativní. Modely jsou nejdříve spočítány pro tento konkrétní element a následně jsou vypočtené modely aplikovány na celou skupinu. Srovnání modelů bude vyhodnoceno z hlediska přesnosti na konkrétním vzorku a z hlediska aplikovatelnosti na celou sadu.

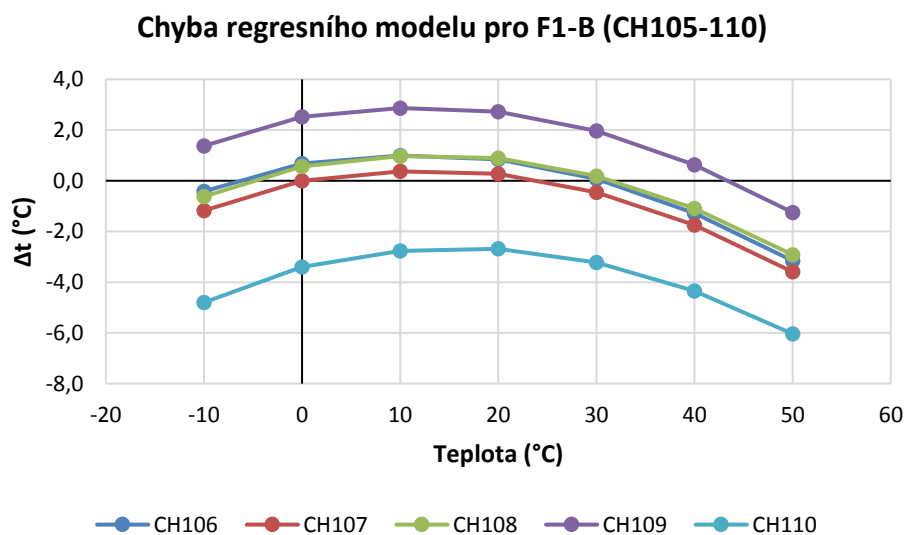
5.2.5.1 Exponenciálně regresní model

Regresní model byl vytvořen pomocí online nástroje pro regresní analýzu na webové stránce xuru.org. Na základě zadání bodů kalibrační křivky CH108 byla spočítána exponenciální křivka, která aproximuje kalibrační křivku senzoru. Rovnice (5.5) je vypočtenou aproximační křivkou. Hladina spolehlivosti pro tuto křivku je $R^2 = 0,9977$. Pro použití modelu a zpětný výpočet teploty na základě odporu je třeba vyjádřit inverzní funkci, která je předmětem výrazu (5.6).

$$R = 51049,901e^{-4,563 \cdot 10^{-2}t} \quad (5.5)$$

$$t = \frac{-1}{4,563 \cdot 10^{-2}} \left(\ln \frac{R}{51049,901} \right) \quad (5.6)$$

Dosažením odporu termistoru R do rovnice (5.6) lze získat hodnoty teploty t pro naměřené odpory dle regresního modelu. Přesnost modelu je vyjádřena rozdílem vypočtené teploty od reálné teploty. Chybu regresního modelu pro celou sadu F1-B ilustruje níže uvedený graf 5.23.



Graf 5.23: Absolutní chyba regresního modelu pro F1-B

Z grafu je patrné, že regresní model je použitelný pouze pro konkrétní sensorový element, případně pro elementy se stejnou kalibrační křivkou, pro ostatní vzorky ze stejné sady chyba narůstá až do -6 °C.

5.2.5.2 Jednoduchý model

Jednoduchý model byl popsán v kapitole 2 této práce. Z rozboru jednoduchého modelu plyne, že pro jeho použití je třeba provést výpočet materiálové konstanty teploty β dle vztahu (5.7).

$$\beta = \frac{\ln \frac{R_1}{R_0}}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (5.7)$$

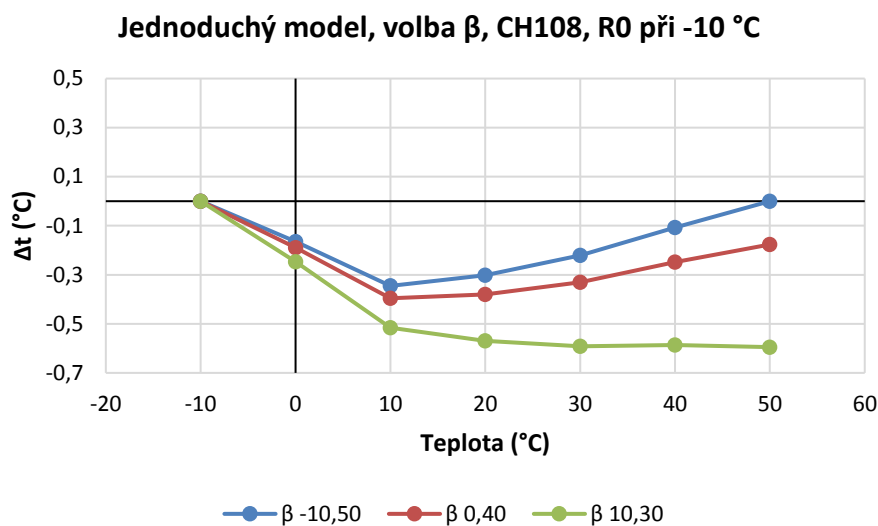
Pro výpočet konstanty je třeba dosadit do vztahu (5.7) dvojici naměřených bodů $[T_0, R_0]$ a $[T_1, R_1]$.

Po určení materiálové konstanty teploty lze provést dosazováním naměřených odporů výpočet teploty dle vztahu (5.8).

$$T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln \frac{R_t}{R_0}}{\beta} \right)^{-1} \quad (5.8)$$

Do vztahu (5.8) je třeba dosadit za bod $[T_0, R_0]$, jedná se o kalibrační bod. Poté se již dosazuje naměřený odpor R_t termistoru. Chyba modelu bude malá v okolí kalibračního bodu a se vzdáleností se bude zvyšovat. Tento kalibrační bod nemusí být na stejné teplotě, jako jeden z bodů, použitých pro výpočet materiálové konstanty teploty. Pokud je kalibrační bod zvolen jiný, než jaký byl použit pro výpočet materiálové konstanty teploty, pak výsledný model bude mít nulovou chybu pouze v kalibračním bodě, pokud je ale zvolen jeden z bodů použitých pro výpočet konstanty, pak bude mít výsledný model nulovou chybu ve dvou bodech, které byly pro konstantu použity. Tato skutečnost byla zjištěna experimentálním výpočtem různých koeficientů β a zpětným výpočtem teplot dle modelu a následným vyjádřením chyby.

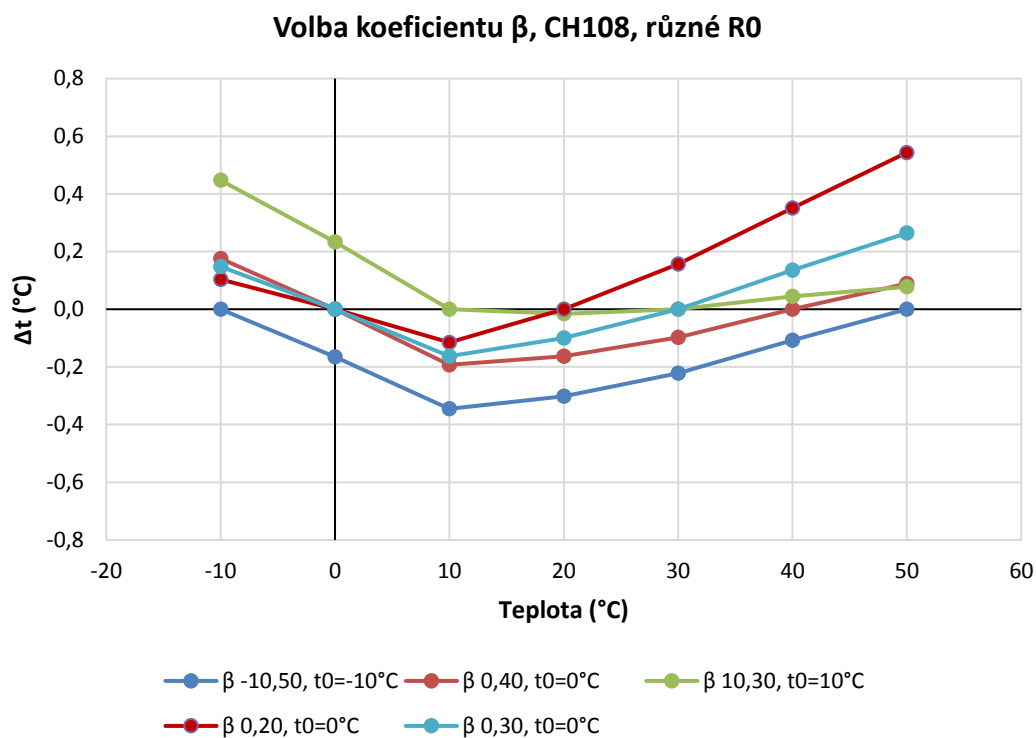
Experimentálně byla určena trojice koeficientů β při teplotách $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, dále $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nakonec $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na základě zpětného výpočtu a vyjádření chyby byla vykreslena pětice grafů, viz *graf 5.24* níže, ostatní jsou v příloze G.



Graf 5.24: Porovnání přesnosti modelů s různým koeficientem β při kalibrační teplotě $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Grafy v příloze G se liší tím, že pro zpětný výpočet je vždy použit kalibrační bod při jiné teplotě. V *grafu 5.24* jsou křivky při zvoleném kalibračním bodě $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a lze pozorovat, že $\beta = -10,50$ má dva body s nulovou chybou, zatímco ostatní křivky mají pouze jeden při kalibrační teplotě.

Na základě této skutečnosti byl vytvořen *graf 5.25* pro porovnání přesnosti modelů s různými koeficienty β . Pro každý model je jako kalibrační bod použit jeden z bodů, pomocí kterého byl určen konkrétní koeficient β . Oproti původní trojici koeficientů byly doplněny ještě dva při teplotách $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Graf 5.25: Volba koeficientu β pro jednoduchý model, vykreslena je chyba modelů s různým β při různých kalibračních teplotách

Z grafu 5.25 je patrný fenomén dvojice bodů s nulovou chybou, každá z křivek prochází nulou v teplotách podle toho, jaké teploty byly použity pro výpočet koeficientu β .

Číselné hodnoty vypočtených koeficientů shrnuje následující tabulka.

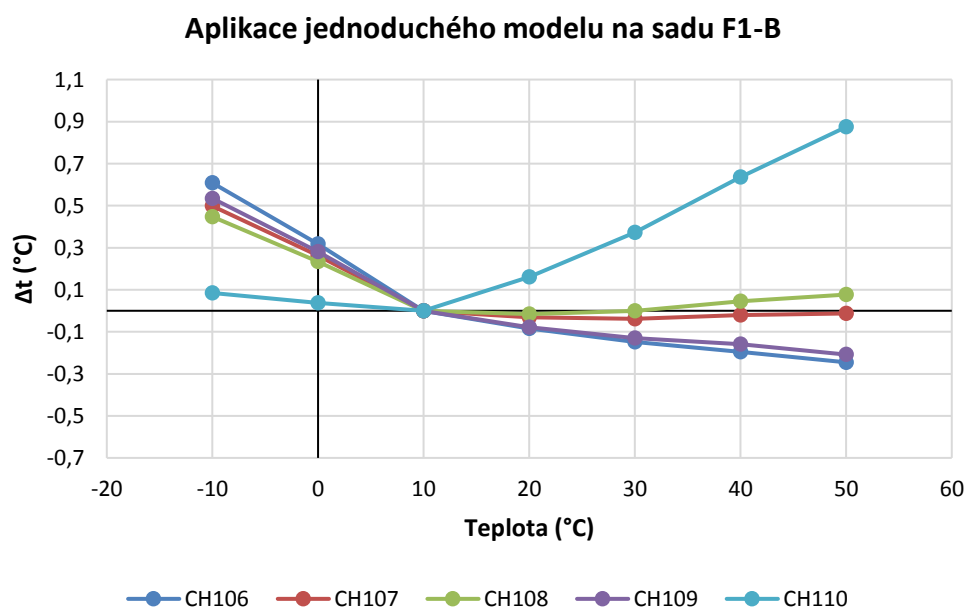
Tab. 5.2: Hodnoty koeficientu β pro různé kalibrační teploty

$\beta -10,50$	3732,3 K
$\beta 0,40$	3741,3 K
$\beta 10,30$	3762,7 K
$\beta 0,20$	3712,8 K
$\beta 0,30$	3730,2 K

Tabulka 5.2 ilustruje, že hodnoty koeficientu β se pro různé kalibrační teploty liší jen málo. Zároveň z grafu 5.25 je patrné, že při rozsahu teplot od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ je chyba pro různé koeficienty podobná a nepřesahuje $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Modely se liší zejména výskytem nulové chyby, podle zvolené kalibrační teploty. Dále je z grafu patrný nárůst nepřesnosti se vzdáleností od kalibračních bodů. Z představených variant byl vybrán model s použitím β 10,30 při kalibrační teplotě $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, který vyniká téměř nulovou chybou v rozsahu $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Představený model lze získat dosazením do vztahu (5.8) v následujícím tvaru:

$$T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln \frac{R_t}{R_0}}{3762,7} \right)^{-1} \quad (5.9)$$

Do modelu dle vztahu (5.9) byly poté dosazovány hodnoty jednotlivých odporů termistorů R_t ze skupiny F1-B. Kalibrační bod dle rovnice (5.9) byl dosazován jako $[283,15\text{ K}, R_{t \text{ při } 10\text{ }^{\circ}\text{C}}]$. Pro každý sensorový element byl spočten rozdíl vypočtené teploty a reálné teploty a byl vykreslen graf 5.26.



Graf 5.26: Aplikace jednoduchého modelu na celou sadu senzorů F1-B

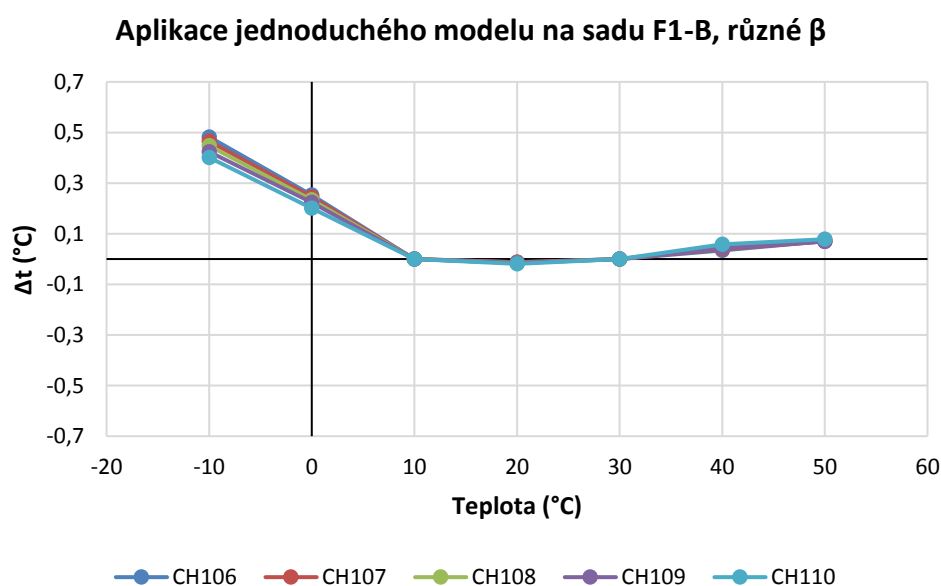
Graf 5.26 vypovídá o tom, že pro charakterizaci celé skupiny stačí určit pouze jeden koeficient β . Element CH 108 v grafu 5.26 má dva body s nulovou chybou, protože koeficient β byl počítán ze stejného referenčního bodu, pro ostatní je dosazovaný odpor jiný, a tak mají pouze jeden nulový bod při kalibrační teplotě 10 °C. Maximální chyba dosahuje 0,9 °C. Představený model lze aplikovat pro celou sadu vzorků, přesnost do 1 °C je dostatečná pro aplikace, které nevyžadují vysoce přesné určení teploty.

Dále byl vypočítán koeficient β při teplotách 10 °C a 30 °C pro každý sensorový element ze sady F1-B. Vypočtené koeficienty shrnuje tabulka níže.

Tab, 5.3: Hodnoty koeficientu $\beta_{10,30}$ pro sadu F1-B

Vzorek	$\beta_{10,30}$ [K]
CH106	3736,7
CH107	3755,9
CH108	3762,7
CH109	3739,9
CH110	3828,1

Tabulka 5.3 ukazuje variabilitu koeficientu $\beta_{10,30}$ pro jednotlivé vzorky z dané sady. Pro dosažení větší přesnosti lze použít pro každý vzorek specifický koeficient β . Výsledkem je pak speciální model pro každý vzorek, jejichž grafická interpretace je předmětem grafu 5.27.



Graf 5.27: Aplikace jednoduchého modelu s $\beta_{10,30}$ pro každý senzor

5.2.5.3 Steinhartův-Hartův model

Popis Steinhartova-Hartova modelu je předmětem kapitoly 2 této práce. Model pro výpočet teploty je definován vztahem (5.10).

$$T = [b_0 + b_1 \ln R_t + b_3 (\ln R_t)^3]^{-1} \quad (5.10)$$

Pro výpočet koeficientů b_0 , b_1 , b_3 je třeba znát tři kalibrační body. Jejich dosazením do vztahu (5.10) lze vytvořit soustavu tří rovnic o třech neznámých. Pro výpočet modelu pro senzorový element CH108 byly použity odpory při teplotách $-10\text{ }^\circ\text{C}$, $20\text{ }^\circ\text{C}$ a $50\text{ }^\circ\text{C}$. Výsledná soustava rovnic je následující:

$$263,15 = [b_0 + b_1 \ln(82903,87) + b_3 (\ln 82903,87)^3]^{-1} \quad (5.11)$$

$$293,15 = [b_0 + b_1 \ln(19674,88) + b_3 (\ln(19674,88))^3]^{-1} \quad (5.12)$$

$$323,15 = [b_0 + b_1 \ln(5955,177) + b_3 (\ln(5955,177))^3]^{-1} \quad (5.13)$$

Řešení koeficientů b bylo nalezeno programem MATLAB pomocí výpočtu přes inverzní matici a jejich hodnoty jsou zapsány v níže uvedené tabulce

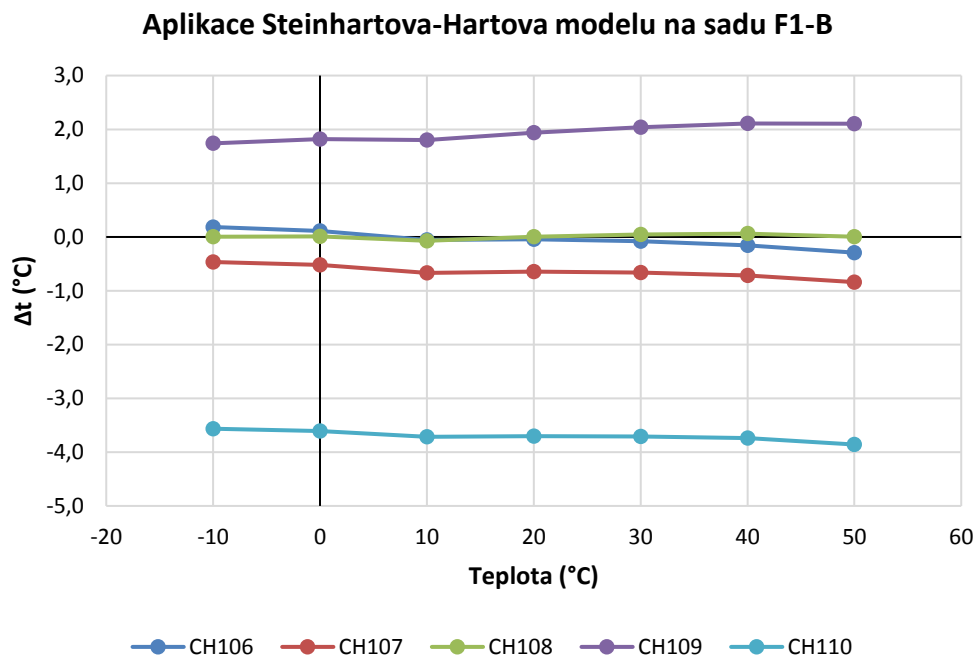
Tab. 5.4: Koeficienty pro model Steinhart-Hart

b_0	9,0041E-04
b_1	2,4726E-04
b_3	6,8374E-08

A výsledný model dle Steinharta-Harta je následující:

$$T = [9,0041 \cdot 10^{-4} + 2,4726 \cdot 10^{-4} \ln R_t + 6,8374 \cdot 10^{-8} (\ln R_t)^3]^{-1} \quad (5.14)$$

Model dle vztahu (5.14) byl pak použit pro výpočet teplot pro všechny vzorky sady F1-B a následně byl určen rozdíl mezi vypočtenou teplotou a reálnou teplotou, který je vynesena v grafu 5.28 na další stránce.

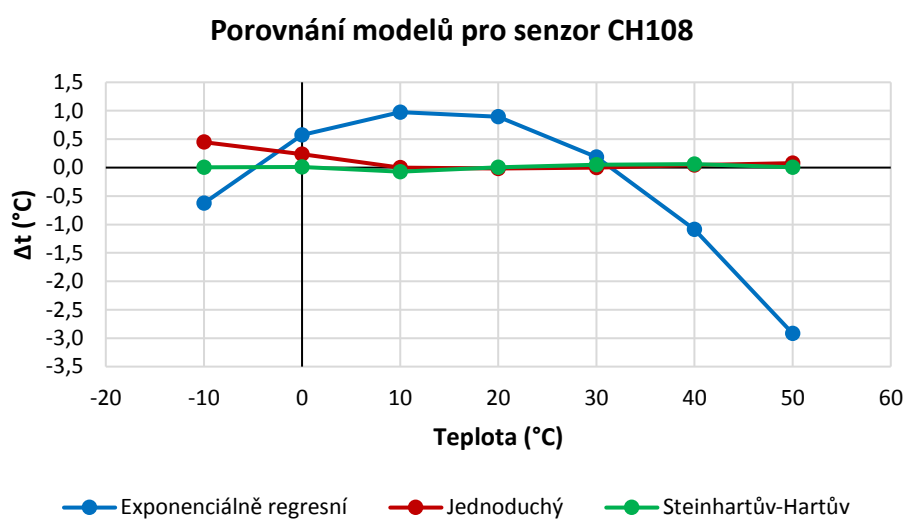


Graf 5.28: Aplikace Steinhartova-Hartova modelu na celou sadu senzorů F1-B

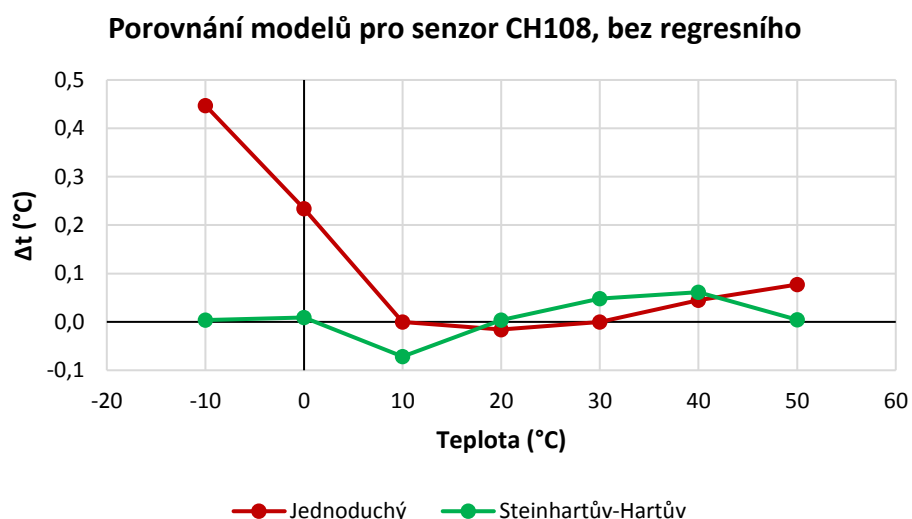
Z grafu 5.28 je patrné, že Steinhartův-Hartův model nelze použít na celou sadu a je tedy třeba provést tříbodovou kalibraci pro výpočet koeficientů pro každý element zvlášť. Pro element CH 108 je vidět, že pro sledovaný interval teplot dosahuje model velké přesnosti v celém intervalu teplot.

5.2.5.4 Porovnání modelů

Trojice představených modelů byla počítána pro senzorový element CH108, jehož kalibrační křivka je prostřední v rámci sady F1-B. Přesnost jednotlivých modelů je porovnána při aplikaci modelu na tento element, pro porovnání byly vyneseny rozdíly mezi počítanou a reálnou teplotou a byl vytvořen souhrnný *graf 5.29* a dále *graf 5.30* pouze pro model jednoduchý a model Steinharta-Harta.



Graf 5.29: Porovnání modelů pro senzor CH108



Graf 5.30: Porovnání jednoduchého a Steinhartova-Hartova modelu pro senzor CH108

Z grafu 5.29 je patrné, že exponenciálně regresní model nevede k takové přesnosti, jako kalibrační modely. Chyba regresního modelu se pohybuje od -3 °C do 1 °C .

Graf 5.30 detailně porovnává chybu jednoduchého a Steinhartova-Hartova modelu. Jednoduchý model má dobrou přesnost v okolí kalibračního bodu, ale se vzdáleností chyba roste. Jeho chyba se pohybuje v přibližném rozmezí od 0 °C do $0,5\text{ °C}$. Steinhartův-Hartův model dosahuje výborné přesnosti v celém měřeném rozsahu, jeho chyba se pohybuje v intervalu od $-0,1\text{ °C}$ do $0,1\text{ °C}$. Ve zkráceném rozsahu od 10 °C do 40 °C však dosahuje lepších výsledků jednoduchý model, zejména díky optimalizaci výpočtu koeficientu β .

Regresní model nelze aplikovat na celou sadu. Exponenciální model lze aplikovat na celou sadu s použitím souhrnného β vypočteného z jednoho vzorku skupiny a následného použití jednobodové kalibrace. Pro vyšší přesnost lze spočítat β pro každý sensorový element zvlášť. U Steinhartova-Hartova modelu je dosahováno velké přesnosti v celém teplotním rozsahu, ale jeho použití vyžaduje třibodovou kalibraci s výpočtem koeficientů pro každý sensorový element, který je výpočetně náročný a je citlivý na přesnost.

6 Diskuse

Tato kapitola shrnuje výsledky dosažené v kapitole 5. Dále diskutuje nedostatky testovacího plánu a využitelnost výsledků do budoucna.

6.1 Shrnutí výsledků testování

Byl proveden plán s testovací sekvencí výchozí kalibrace, dlouhodobé stárnutí, následná kalibrace, po testovací sekvenci byla provedena optická inspekce a aplikace matematických modelů. Kalibrační měření sestávalo ze dvou částí, změna teploty při konstantní vlhkosti pro určení kalibračních křivek a změna vlhkosti při konstantní teplotě pro určení vlivu vlhkosti na odpor sensorových elementů. Před dlouhodobým stárnutím bylo provedeno zapouzdření poloviny vzorků.

Jakožto stěžejní část testovacího plánu bylo první vyhodnocení dlouhodobého stárnutí. Vzorky byly pro vyhodnocení sdruženy do skupin podle výrobní formulace a podle zapouzdření. Byl proveden rozbor celého naměřeného průběhu pro určení pouze těch bodů, které odpovídají ustálenému prostředí v testovací peci. Z výběru dat pouze pro stárnutí byly vytvořeny poměrové grafy. Odpor termistorů po dobu stárnutí byl vztažen k prvnímu bodu, čímž lze názorně porovnat chování jednotlivých formulací mezi sebou. Tyto grafy, jež jsou k nahlédnutí v příloze B, ukazují rozdílné chování formulací během stárnutí. Formulace F1 v nezapouzdřené variantě vykazuje rychlé ustálení odporu, po kterém se již chová stabilně. Formulace F2 vykazuje mírně zápornou změnu odporu po celou dobu stárnutí a formulace F3 vykazuje neustálou změnu odporu s proměnou tendencí. Změny odporu lze přisoudit vysychání termosenzitivní vrstvy a odpařování látek použitých při výrobě. Naproti tomu zapouzdřené varianty všech formulací vykazují po celou dobu rychlý nárůst odporu a v koncovém bodě stárnutí velkou variabilitu odporu. O žádné ze zapouzdřených variant nelze prohlásit, že je ustálená. Dále byl vypočten procentuální drift z počátečního a koncového bodu stárnutí. Drift byl určen pro každý vzorek a následně byla provedena statistická analýza viz tabulka 5.1. Formulace F1 v nezapouzdřené variantě má mezi jednotlivými variantami nejmenší variabilitu driftu, pohybuje se od -13,33 % do 15,85 %. Všechny zapouzdřené varianty vykazují velký nárůst odporu a velkou variabilitu v rámci skupin.

Vzhledem k neustálosti a variabilitě v koncovém bodě bylo rozhodnuto o vyřazení zapouzdřených variant z dalšího vyhodnocení a jsou považovány za nevyhovující. Neustálost je přisuzována použité metodě zapouzdření, kdy lepidlo z adhezivní pásky proniká do struktury termosenzitivní vrstvy a způsobuje její narušení, což vede ke změně odporu.

Dále bylo vyhodnoceno měření z výchozí a závěrečné kalibrace. Senzorové elementy byly sdruženy do skupin dle výrobní desky. Vyhodnocení bylo provedeno jako porovnání stavu před dlouhodobým stárnutím a po dlouhodobém stárnutí, přičemž výchozí kalibrace je považována za referenční. Z teplotní části kalibračních profilů byly vykresleny kalibrační křivky. Pro kalibrační křivky byl vypočten medián z posledních dvaceti hodnot na každém teplotním schodu pro určení reprezentativního bodu. V rámci posledních dvaceti hodnot lze podmínky v komoře považovat za ustálené. Pro porovnání byly uvažovány pouze křivky ze třetího schodovitého profilu kalibrace. Byla určena procentuální změna kalibrační křivky v každém teplotním bodě před a po stárnutí. Toto porovnání ukázalo, že u formulace F1 došlo k mírnému kladnému posunu kalibračních křivek, u formulace F2 k mírnému zápornému posunu a u formulace F3 k velkému kladnému posunu. Změna odporu u F3 je v mezích od 450 % do 700 % (procentuální změna odporu na každé teplotě), což vypovídá i o natočení kalibrační křivky. U formulací F1 a F2 je natočení zanedbatelné.

Dále byla analyzována hystereze z kalibrace před a po stárnutí. Hystereze byla vyhodnocována ze třetího schodovitého průběhu. Před stárnutím měla formulace F1 výraznou hysterezi, po stárnutí byla hystereze eliminována a pohybuje se v mezích od -1 % do 1 % změny odporu. U formulace F2 naopak došlo k rozvoji hystereze v mezích od 4 % do 6,5 % změny odporu. Formulace F3 vykazuje hysterezi před i po stárnutí.

Nakonec byly z teplotní části vyhodnoceny souhrnné kalibrační křivky pro každou desku senzorových elementů.

Jako poslední byla vyhodnocena druhá část kalibračního profilu a sice vliv vlhkosti. Vliv vlhkosti byl analyzován jako změna vlivu před a po stárnutí. Jako reprezentativní

hodnota odporu jednotlivých vzorků na každém vlhkostním schodu byl použit medián z posledních pěti hodnot. Vyhodnocení bylo provedeno jako procentuální změna odporu během vlhkostních schodů, přičemž první schod je brán jako referenční hodnota. Měření ukázalo, že před stárnutím se u vzorků projevoval významný vliv relativní vlhkosti, zejména při hodnotě 80 % RH, kdy mediánová změna odporu u F1 dosahovala 9,68 %, u F2 18,33 % a u F3 25,75 %. Po stárnutí došlo u formulace F1 k odstranění vlivu RH, změna odporu se pohybuje v hodnotách do 1 %. Formulace F2 má i po stárnutí významný vliv RH na změnu odporu a formulace F3 má mírný vliv v mezích do 2 %.

Optická inspekce po testovací sekvenci odhalila specifické poškození termosenzitivní vrstvy u formulace F2 a F3. Sensorové elementy formulace F2 jsou poškozeny prasklinami podél elektrodoých prstů, nicméně praskliny struktury se elektricky neprojeví, a tak lze prohlásit, že nepřerušují vodivý kanál. Formulace F3 má lokální zpuchření struktury, které u jednoho elementu CH210 vedlo ke kompletnímu zničení, kdy je odhalena elektrodová struktura, na které bylo provedeno měření tloušťky čar, bylo zjištěno, že provedení odpovídá návrhu.

Pro formulace F1, desku B byl proveden rozbor aplikovatelnosti matematických modelů pro charakterizaci. Formulace F1 byla volena na základě kladných výstupů z jednotlivých částí testování. Modelování bylo provedeno pomocí exponenciální aproximace, dále pomocí jednoduchého modelu, a nakonec pomocí Steinhartova-artova modelu. Model byl vytvořen pro jeden vzorek ze skupiny a následně byl aplikován na ostatní pro zjištění využitelnosti pro celou skupinu. Aproximační model dosahuje chyby až $-2,5$ °C i pro vzorek, na kterém je vytvořen a nelze jej aplikovat na celou skupinu. Jednoduchý model dosahuje dobré přesnosti v užším intervalu teplot v okolí kalibračního bodu, byl proveden rozbor volby kalibračních bodů pro dosažení co největší přesnosti. Chyba nepřesahuje 1 °C a model lze aplikovat i na celou sadu vzorků. Steinhartův-Hartův model vyžaduje třibodovou kalibraci se složitým výpočtem kalibračních koeficientů řešením soustavy rovnic. Dosahuje dobré přesnosti v celém rozsahu teplot. Výpočet je ale třeba provést pro každý vzorek zvlášť, model nelze aplikovat na celou skupinu.

6.2 Zhodnocení testovacího plánu

Testovací plán byl založen na normalizovaných testech dle skupiny norem ČSN EN 60068 a na požadavcích plynoucích z budoucího umístění senzorů do země. Z norem vycházely meze přesnosti, samotná realizace měření již v souladu s normami neproběhla a byla přizpůsobena měřicí infrastruktuře. Na základě poznatků z testování lze navrhnout několik optimalizačních kroků testovacího plánu.

Při teplotní části kalibračního měření byl čas pro ustálení podmínek v komoře 1 hodina, tento čas není dostatečný a relativní vlhkost v komoře se nestihla ustálit, zejména pak pro nízké teploty. Při opakovaném měření by tedy bylo vhodné čas prodloužit. Dále při měření dlouhodobého stárnutí bylo zjištěno, že čidlo testovací pece měří změny teploty jen při náběhu na testovací teplotu, poté je ve výpisu již jen 100 °C, ačkoliv muselo docházet k oscilaci okolo cílové teploty vlivem regulace. Bylo by tedy vhodné společně se vzorky vkládat i referenční čidlo pro měření podmínek. Při měření je třeba hlídat časovou synchronizaci multimetru a testovacího zařízení pro následné přesné přiřazení dat. Doba 1000 h při dlouhodobém stárnutí umožnila ustálení pouze u formulace F1, pro ustálení ostatních formulací by bylo vhodné dobu prodloužit.

Testovací plán byl sestaven pro experimentální formulace senzorů realizovaných tiskovými technologiemi. Jeho hlavním účelem je určit, zda lze formulaci využít pro měření teploty. Plán umožňuje vyhodnotit kalibrační křivky, analyzovat hysterezi, určit vliv vysoké vlhkosti, dále ověřit dlouhodobou stabilitu a určit dlouhodobý drift. Jako takový tedy poskytuje dostatek informací pro rozhodnutí o využitelnosti formulace v reálném prostředí a dává základ pro sestavení cílených testů dle zaměření budoucího využití. Testovací plán lze použít i pro testování experimentálních senzorů při umístění do vzorků půdy.

6.3 Využitelnost testovaných senzorových elementů

Použitý testovací plán jasně ukázal perspektivu formulace F1, kterou dle dlouhodobého stárnutí lze prohlásit za ustálenou, zároveň u ní vlivem stárnutí téměř zanikla hystereze, vlivem RH u ní dochází pouze k minimálním změnám odporu a nevykazuje žádné mechanické poškození.

Z hlediska budoucí aplikace pro měření teploty zeminy v zemědělství je však kritická volba vhodného zapouzdření formulace. Důležitost zapouzdření byla zmíněna v kapitole 3.2. V rámci testování bylo provedeno experimentální zapouzdření, které dle výstupu z měřicího plánu selhalo a zapouzdřené varianty byly z vyhodnocení vyřazeny.

Budoucí výzkum uplatnitelnosti formulace by tak měl směřovat zejména k výběru a testování nejvhodnějšího zapouzdření. Do budoucna lze doporučit například zapouzdření pomocí tepelné laminace. Další testování by se pak zaměřovalo na vliv tohoto zapouzdření a na postupný výběr nejvhodnější varianty, která bude senzorový element dostatečně chránit, avšak nebude negativně ovlivňovat jeho vlastnosti.

Dalším krokem by pak mělo být testování vzorků společně s vhodným zapouzdřením v půdních podmínkách. Prvotní měření by mělo proběhnout v laboratořích podobnou sekvencí, jako byla použita v této práci, tj kalibrace, dlouhodobý vliv a následně ověření vlastností druhou kalibrací. Poté, by bylo možné přistoupit k experimentálnímu nasazení in-situ v předem vytipované lokalitě.

Závěr

Cílem práce bylo sestavení testovacího plánu pro nalezení perspektivní formulace tištěného senzoru teploty pro budoucí uplatnění v zemědělských aplikacích. Teoretická část práce se věnuje důvodům nasazení senzorů v zemědělských aplikacích, dále problematice senzorů samotných, poté enviromentálním podmínkám a jejich testování, včetně použití v půdě. Praktická část začíná návrhem a popisem výroby experimentálních termistorů, pro jejichž otestování je představen testovací plán, který je dále realizován a je popsán detailní rozbor naměřených dat. Testovací plán umožňuje změření kalibračních křivek senzorů, dále vyhodnocení vlivu relativní vlhkosti na vlastnosti senzorů, poté zhodnocení hystereze a také dlouhodobé stability. Dále je provedena mikroskopická inspekce a jsou zkoumány možnosti aplikovatelnosti matematických modelů. Navíc byl zkoumán vliv experimentálního zapouzdření provedeného na polovině senzorů.

Testování dlouhodobé stability v podmínkách 100 °C po dobu 1000 h odhalilo, že experimentální zapouzdření ovlivňuje senzorové elementy velkým neustáleným nárůstem odporu, což vedlo k jejich vyřazení z dalšího testování. U nezapouzdřených variant bylo prokázáno, že pouze formulace F1 může být prohlášena za ustálenou.

Vyhodnocení hystereze ukázalo, že formulace F1 a F3 měly před stárnutím významnou hysterezi, zatímco formulace F2 ne. Po stárnutí byla hystereze formulace F1 téměř odstraněna a pohybuje se v mezích ± 1 °C změny odporu. U formulace F2 se naopak hystereze rozvinula a u formulace F3 zůstala.

Porovnání kalibračních křivek před a po dlouhodobém stárnutí ukázalo, že u formulace F1 došlo k mírnému kladnému posunu, u formulace F2 k mírnému zápornému a F3 vykazuje velký kladný posun a zároveň natočení kalibračních křivek.

Porovnání vlivu relativní vlhkosti před a po stárnutí ukázalo velký vliv před stárnutím, který byl následky stárnutí částečně odstraněn. F1 má po stárnutí změnu odporu vlivem RH v hodnotách do 1 %, F2 pořád významně reaguje na změny RH a F3 má změnu odporu do 2 %.

Optická inspekce dále odhalila poškození struktury u skupin F2 a F3. F2 má praskliny struktury podél elektrodoých prstů, F3 vykazuje puchýřkovité lokální praskliny. F1 nemá viditelné mechanické poškození.

Na vybranou formulaci F1 byla aplikována trojice matematických modelů a sice exponenciální regrese, jednoduchý model a Steinhartův-Hartův model. Exponenciální regrese pomocí online nástroje xuru.org vykazuje chybu až $-2,5$ °C a nelze ji tak považovat za spolehlivou. Exponenciální model dosahuje chyby maximálně 1 °C a lze jej s úspěchem aplikovat na celou sadu experimentálních termistorů s tím, že vyžaduje jen jednobodovou kalibraci a jeho přesnost klesá se vzdáleností od kalibračního bodu. Model Steinharta-Harta vykazuje velkou přesnost v celém rozsahu teplot, ale vyžaduje složitou tří bodovou kalibraci pro každý termistor. Pro vybranou formulaci F1 je doporučeno používat jednoduchý model.

Výše popsané závěry ukazují perspektivu formulace F1. Pro budoucí výzkum je třeba věnovat pozornost vhodnému zapouzdření, jež je pro aplikace v zemině kritické. Byla doporučena možnost tepelné laminace.

Testovací plán vykazuje některé nedostatky. Objevují se problémy s regulací vlhkosti v klimatické komoře, referenčním měřením teploty v testovací peci, dále je třeba striktně hlídat synchronizaci času mezi zařízeními.

Seznam literatury

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors*. 5th ed. San Diego: Springer International Publishing AG, 2015. ISBN 3319307673.
- [3] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02057-6.
- [4] SRISRUTHI, S., N. SWARNA, G. M. SUSMITHA ROS a Edna ELIZABETH. Sustainable agriculture using eco-friendly and energy efficient sensor technology. *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology, RTEICT 2016 - Proceedings* [online]. 2017, 1442–1446. Dostupné z: doi:10.1109/RTEICT.2016.7808070
- [5] MENŠÍK, L., VIK, R., PRETL, S., BĚLOHOUBEK, J., SYROVÝ, T., SYROVÁ, L., KUBÁČ, L., MENŠÍK, L. *Možnosti uplatnění internetu věcí (IoT) v precizním zemědělství v ČR*. 2019. ISBN ISSN 0139-6013.
- [6] MARIOS, Sophocleous a Julius GEORGIOU. Precision agriculture: Challenges in sensors and electronics for real-time soil and plant monitoring. *2017 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, BioCAS 2017 - Proceedings* [online]. 2018, 2018-Janua, 1–4 [vid. 2020-05-20]. Dostupné z: doi:10.1109/BIOCAS.2017.8325180
- [7] AYZAZ, Muhammad, Mohammad AMMAD-UDDIN, Zubair SHARIF, Ali MANSOUR a El Hadi M. AGGOUNE. Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access* [online]. 2019, 7, 129551–129583 [vid. 2020-05-20]. ISSN 21693536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2019.2932609
- [8] Hydroponics: introduction. *lowimpact.org* [online]. [vid. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.lowimpact.org/lowimpact-topic/hydroponics/>
- [9] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 2. díl: polovodičové prvky a elektronky*. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-161-6.
- [10] HART, JOHN S. STEINHART STANLEY R. Calibration curves for thermistors. *Deep-Sea Research* [online]. 1968, 15, 497–503 [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: doi:10.1016/0011-7471(68)90057-0
- [11] CONG, Yu, Zhou WANG-CHAO, Sun BIN a Zhou HANG-XIA. Study on NTC thermistor characteristic curve fitting methods. *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology* [online]. 2011, 4, 2209–2213 [vid. 2019-11-09]. Dostupné z: doi:10.1109/ICCSNT.2011.6182415
- [12] CHEN, Chiachung. Evaluation of resistance – temperature calibration equations for NTC thermistors. *Measurement* [online]. 2009, 42(7), 1103–1111 [vid. 2019-11-09]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2009.04.004
- [13] ALEKSIC, Obrad a Pantelija NIKOLIC. Recent advances in NTC thick film thermistor properties and applications. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics* [online]. 2017, 30(3), 267–284 [vid. 2020-01-15]. ISSN 0353-3670. Dostupné z: doi:10.2298/fuee1703267a
- [14] SCHUBERT, Michaela, Christian MÜNCH, Sophie SCHUURMAN, Véronique POULAIN, Jaroslaw KITA a Ralf MOOS. Characterization of nickel manganite NTC thermistor films prepared by aerosol deposition at room temperature. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2018, 38(2), 613–619 [vid. 2020-01-15]. ISSN 1873619X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.09.005
- [15] ALI, Zahid. What is thermistor. *theengineeringprojects.com* [online]. [vid. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.theengineeringprojects.com/2019/10/what-is-thermistor.html>
- [16] ALIANE, A., V. FISCHER, M. GALLIARI, L. TOURNON, R. GWOZIECKI, C. SERBUTOVIEZ, I. CHARTIER a R. COPPARD. Enhanced printed temperature sensors on flexible substrate. *Microelectronics Journal* [online]. 2014, 45(12), 1621–1626 [vid. 2020-01-15]. ISSN 00262692. Dostupné z: doi:10.1016/j.mejo.2014.08.011
- [17] SUPADECH, J., E. RATANAUDOMPHISUT, C. HRUANUN a A. POYAI. Characteristics of silicon thin film thermistors. *5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2008* [online]. 2008, 2, 853–856 [vid. 2020-05-20]. Dostupné z: doi:10.1109/ECTICON.2008.4600564
- [18] HORA, Petr. Vztah teploty vzduchu a půdy různých půdních druhů. In: *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí*. Praha: Česká bioklimatická společnost v nakl. Český hydrometeorologický ústav, 2011. ISBN 9788086690872.
- [19] ALEKSIC, Stanko O., Nebojsa S. MITROVIC, Miloljub D. LUKOVIC, Sonja D. VELJOVIC-JOVANOVIC, Snezana G. LUKOVIC, Maria V. NIKOLIC a Obrad S. ALEKSIC. A ground

- temperature profile sensor based on NTC thick film segmented thermistors: Main properties and applications. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2018, 18(11), 4414–4421 [vid. 2020-04-28]. ISSN 1530437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2018.2820123
- [20] POPIEL, C. O., J. WOJTKOWIAK a B. BIERNACKA. Measurements of temperature distribution in ground. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2001, 25(5), 301–309 [vid. 2020-04-28]. ISSN 08941777. Dostupné z: doi:10.1016/S0894-1777(01)00078-4
- [21] FLORIDES, Georgios a Soteris KALOGIROU. Annual ground temperature measurements at various depths. *8th REHVA World Congress, Clima* [online]. 2005, 1–6 [vid. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://ktisis.cut.ac.cy/handle/10488/844>
- [22] Plzeň-Mikulka. *portal.chmi.cz* [online]. [vid. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/prehled-stanic/plzen-mikulka>
- [23] BAUER, Jan a Nils ASCHENBRUCK. Design and implementation of an agricultural monitoring system for smart farming. *2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany, IOT Tuscany 2018* [online]. 2018, 1–6. Dostupné z: doi:10.1109/IOT-TUSCANY.2018.8373022
- [24] KOOL, Dilia, Joshua L. HEITMAN, Naftali LAZAROVITCH, Nurit AGAM, Thomas J. SAUER a Alon BEN-GAL. In Situ Thermistor Calibration for Improved Measurement of Soil Temperature Gradients. *Soil Science Society of America Journal* [online]. 2016, 80(6), 1514–1519 [vid. 2020-06-02]. ISSN 1435-0661. Dostupné z: doi:10.2136/sssaj2016.05.0134
- [25] ČSN EN 60068-1 ED.2. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 1: Obecně a návod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [26] ČSN EN 60068-2-1 ED.2. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-1: Zkoušky - Zkouška A: Chlad*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [27] ČSN EN 60068-2-2. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-2: Zkoušky - Zkouška B: Suché teplo*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [28] ČSN EN 60068-2-78 ED.2. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-78: Zkoušky - Zkouška Cab: Vlhké teplo konstantní*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [29] ČSN EN 60068-2-30 ED.2. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-30: Zkoušky - Zkouška Db: Vlhké teplo cyklické (cyklus 12 h + 12 h)*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [30] ČSN EN 60068-2-14 ED.2. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-14: Zkoušky - Zkouška N: Změna teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [31] ČSN EN 60068-2-38. *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-38: Zkoušky - Zkouška Z/AD: Složená cyklická zkouška teplotou a vlhkostí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

Seznam příloh

- A: Optický nosič s elektronickou verzí práce a zdrojovými soubory dat
- B: Grafy relativního stárnutí, vztažené k počátečnímu bodu stárnutí
- C: Podmínky naměřené v klimatické komoře při výchozí a závěrečné kalibraci
- D: Kalibrační křivky před a po stárnutí pro nezapouzdřené senzory
- E: Souhrnné grafy s kalibračními křivkami bez hystereze
- F: Grafy s celkovým průběhem vlivu vlhkosti před a po stárnutí
- G: Grafy volby koeficientu β pro jednoduchý model.

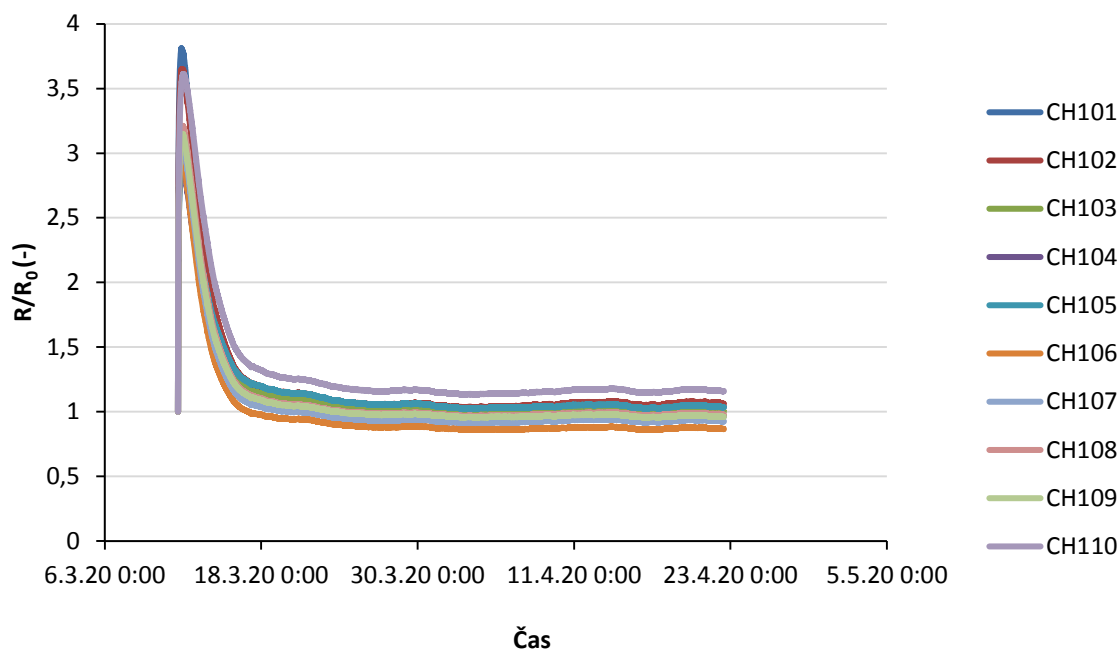
Příloha A

Nosič s elektronickou verzí práce. Dále obsahuje soubory, ve kterých bylo provedeno vyhodnocení dat. Soubor s vyhodnocením kalibrací, dále soubor s vyhodnocením stárnutí, a nakonec soubor s analýzou matematických modelů.

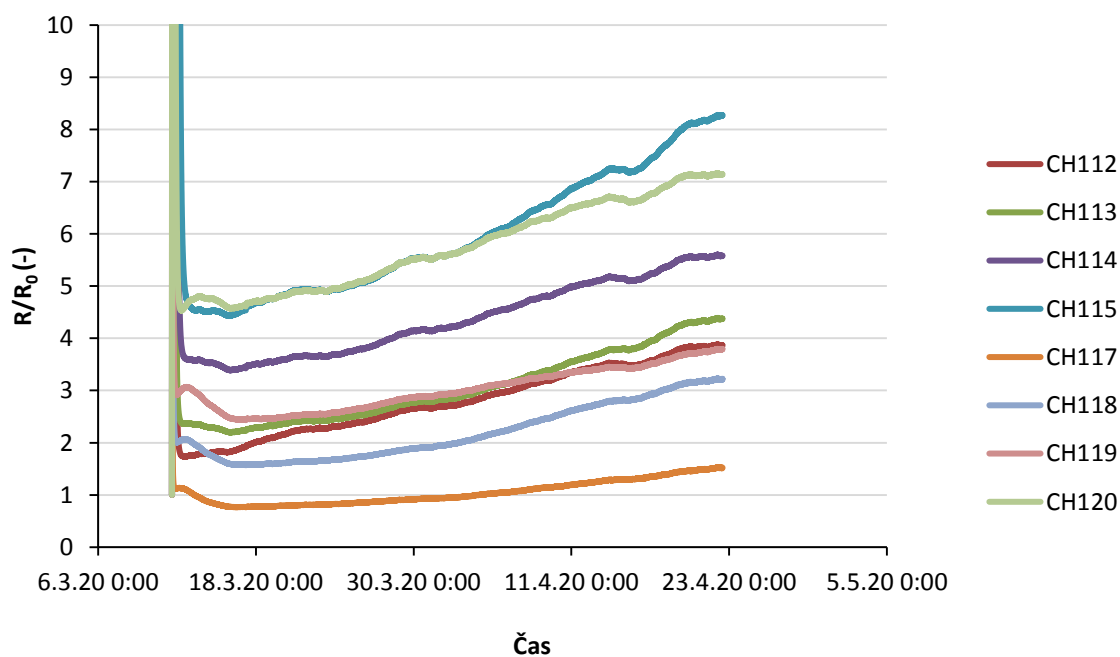
Příloha B

Grafy relativního stárnutí, vztáženého k počátečnímu bodu

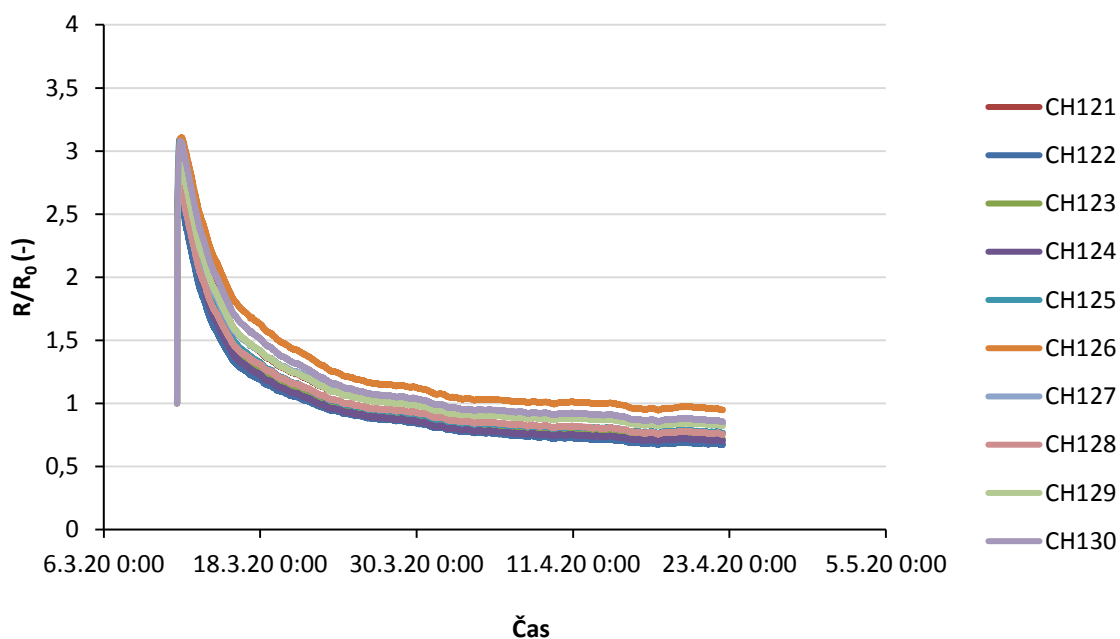
Dlouhodobé stárnutí R/R₀, F1-A/B (CH101 - 110), nezapouzdřené



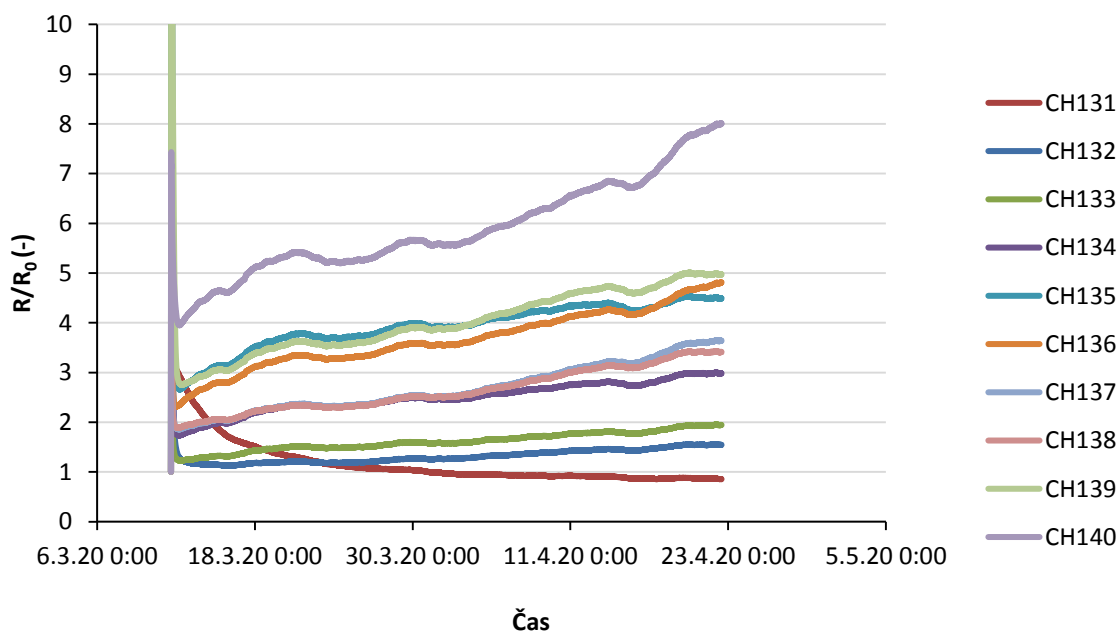
Dlouhodobé stárnutí R/R₀, F1-C/D (CH111 - 120), zapouzdřené



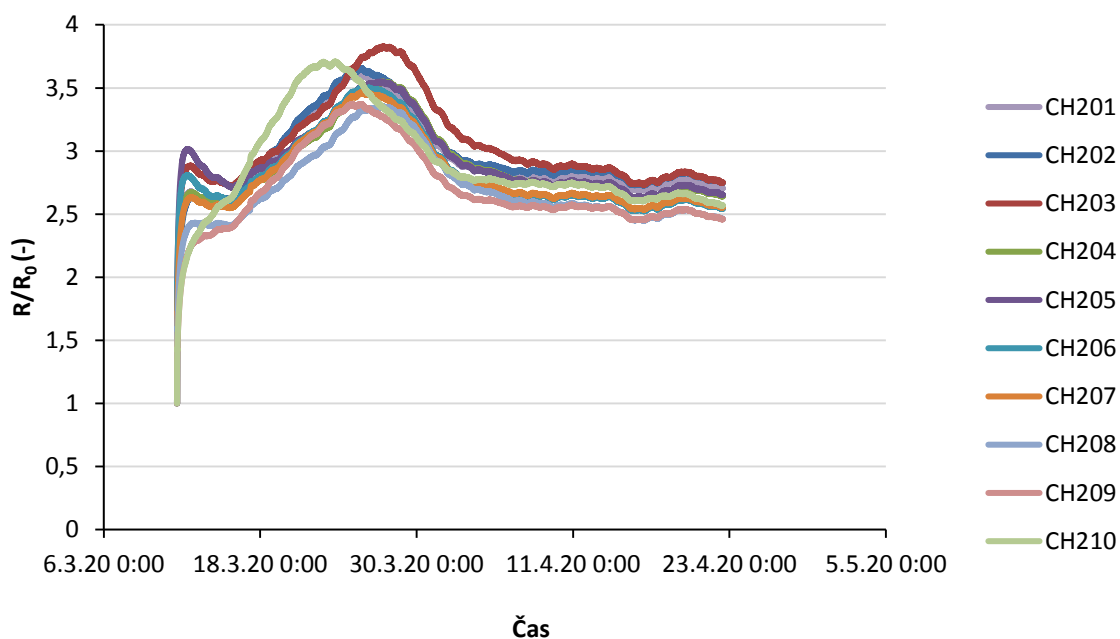
Dlouhodobé stárnutí R/R₀, F2-A/B (CH121 - 130), nezapouzdřené



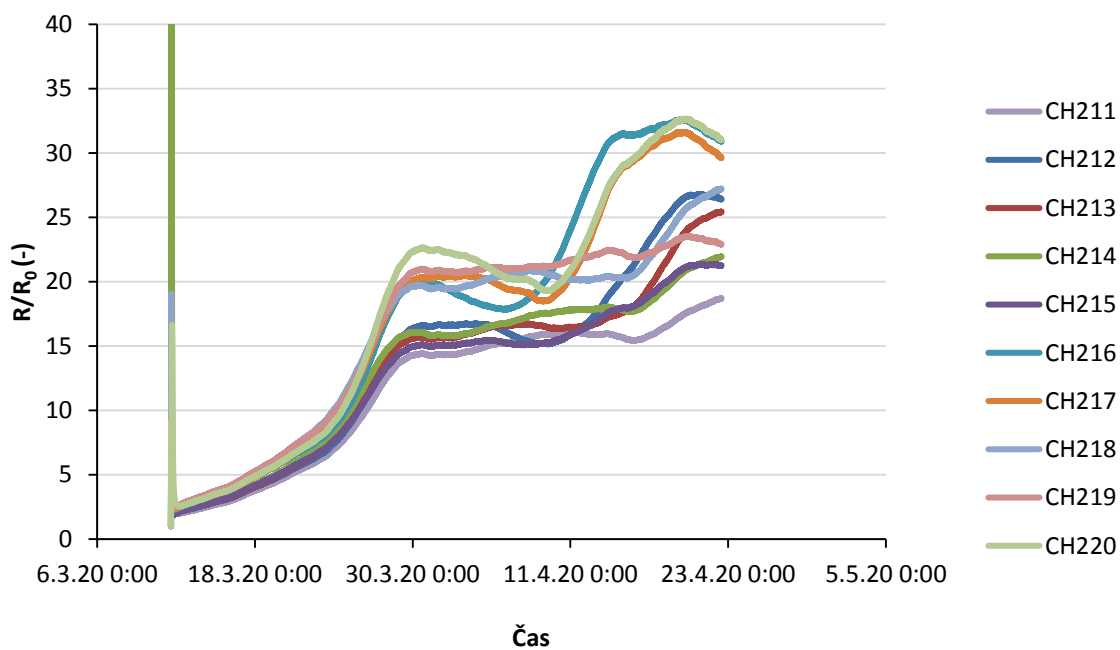
Dlouhodobé stárnutí R/R₀, F2-C/D (CH131 - 140), zapouzdřené



Dlouhodobé stárnutí R/R₀, F3-A/B (CH201 - 210), nezapouzdřené

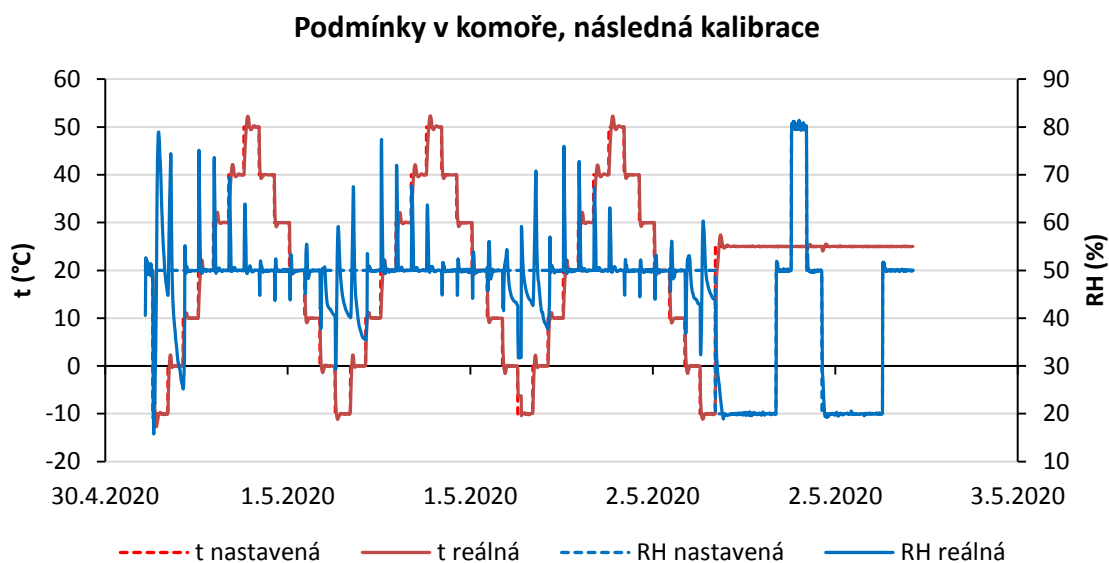
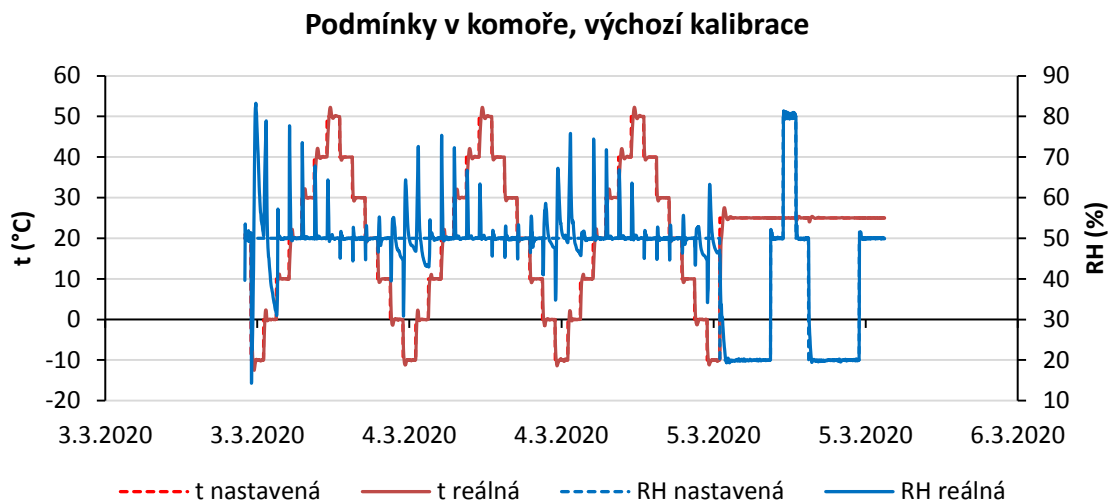


Dlouhodobé stárnutí R/R₀, F3-C/D (CH211 - 220), zapouzdřené



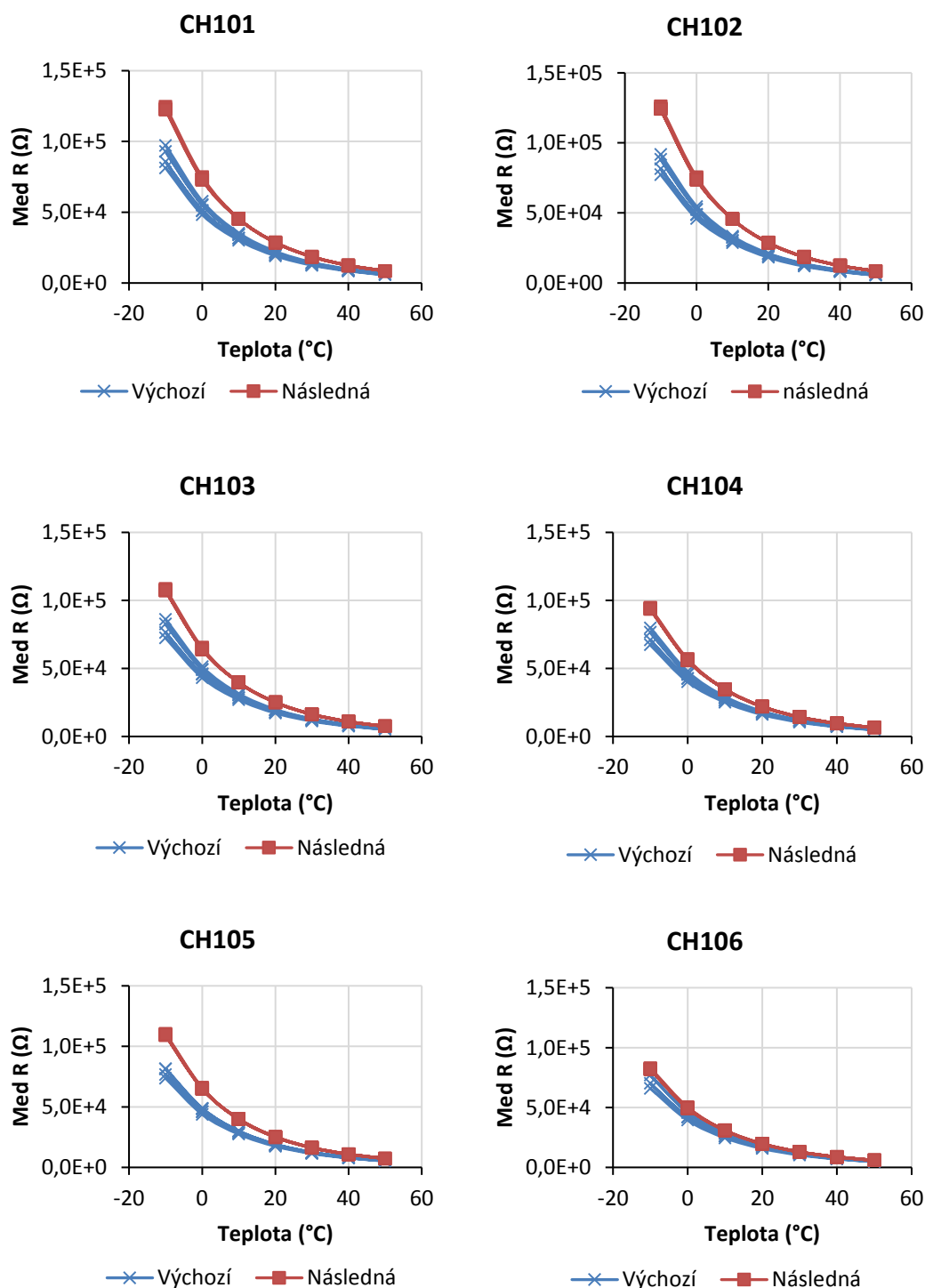
Příloha C

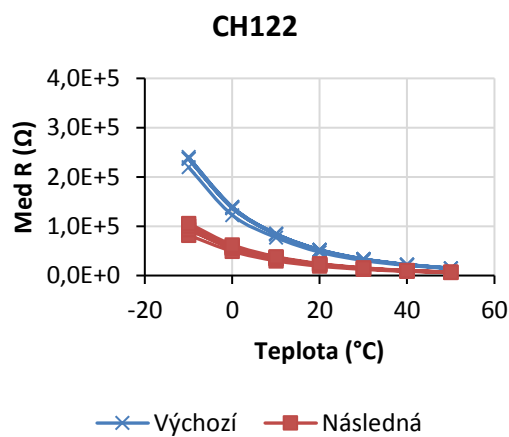
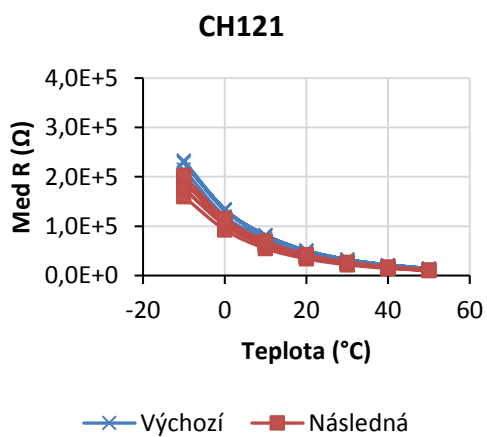
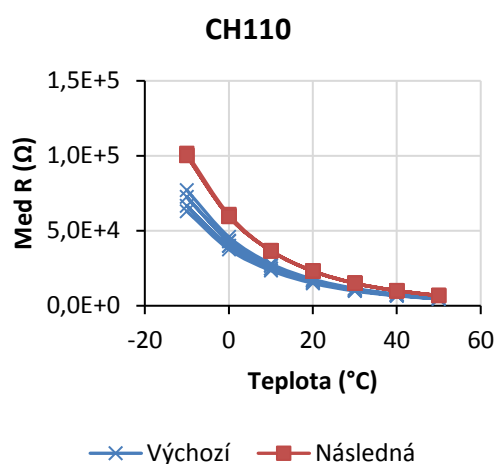
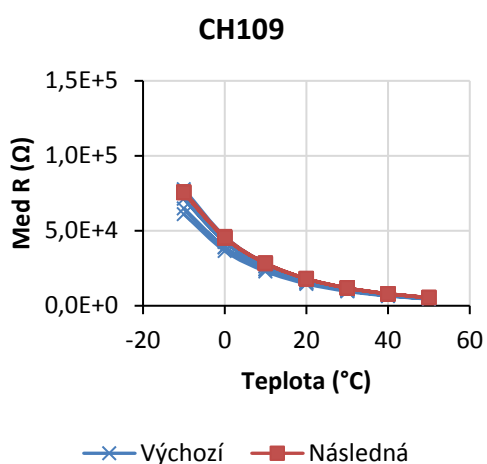
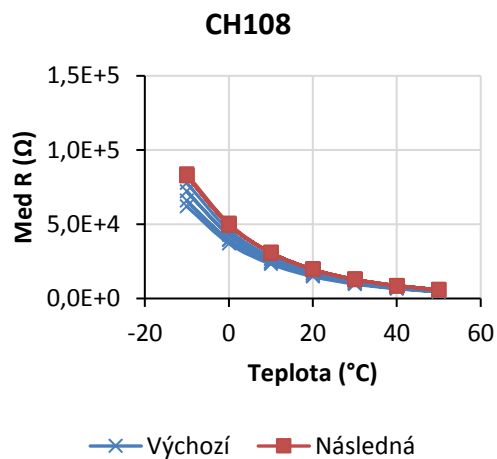
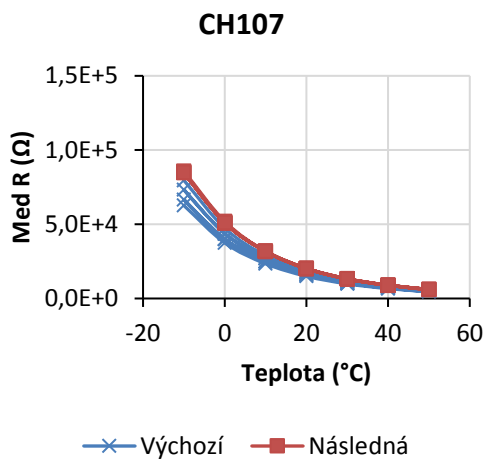
Podmínky naměřené v klimatické komoře při výchozí a závěrečné kalibraci

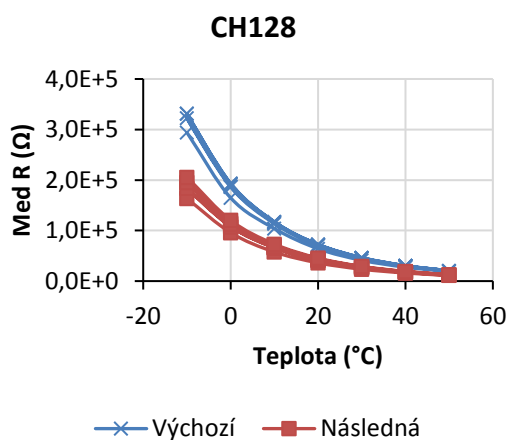
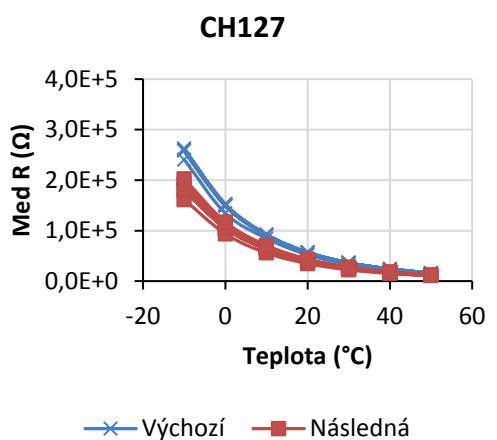
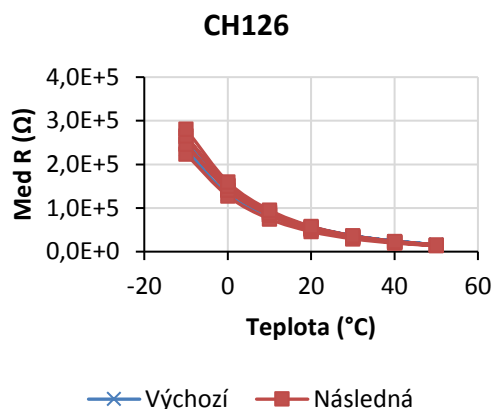
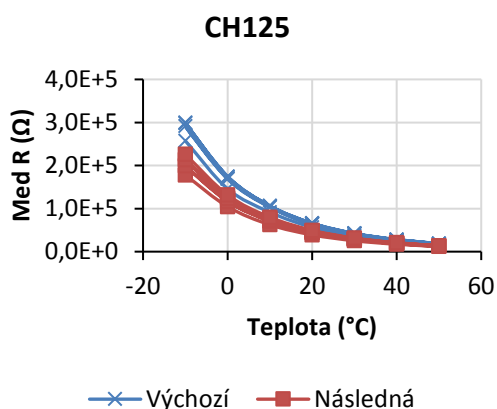
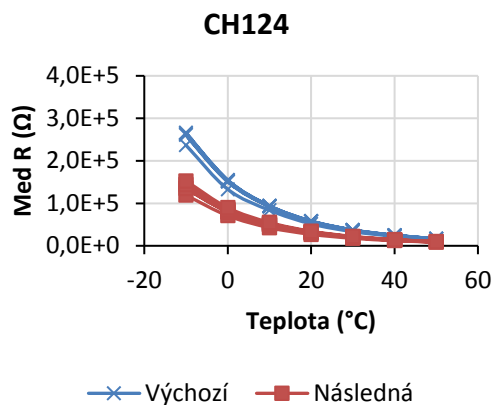
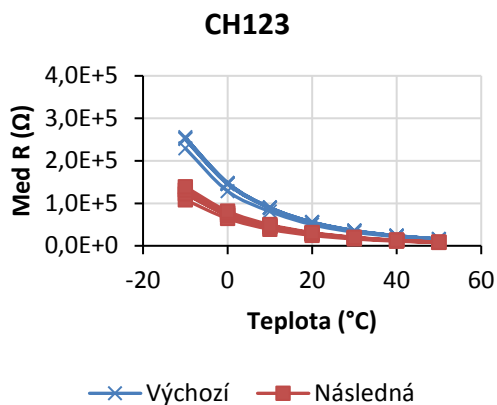


Příloha D

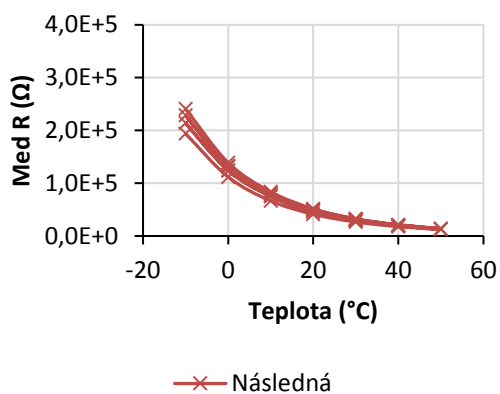
Kalibrační křivky před a po stárnutí pro nezapouzdřené vzorky



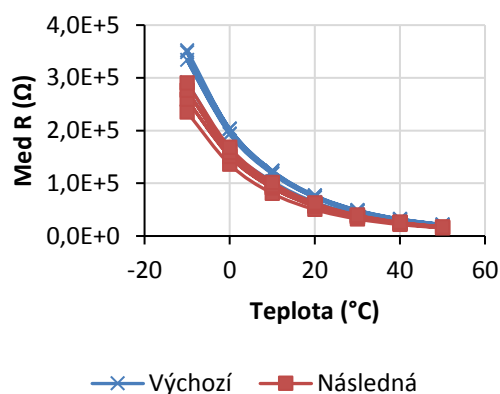




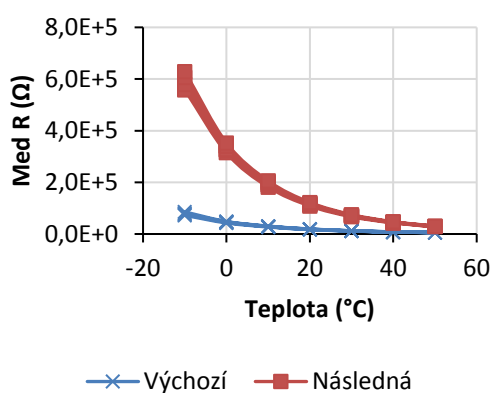
CH129 - výpadek měření



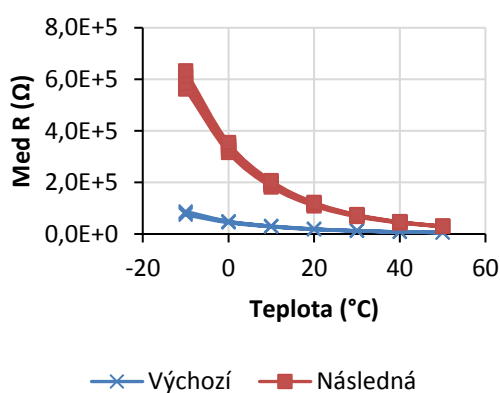
CH130



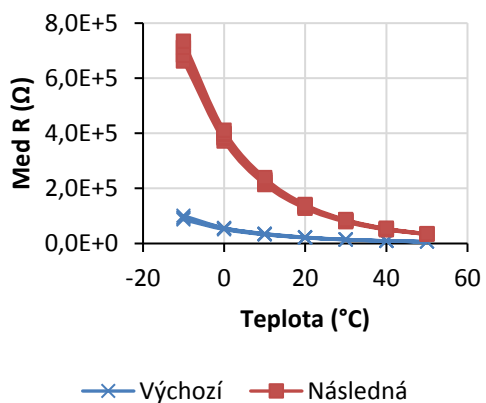
CH201



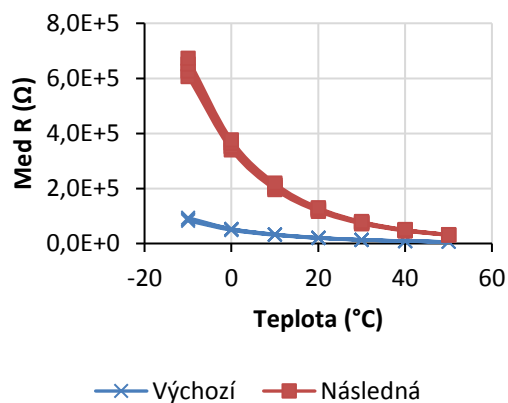
CH202

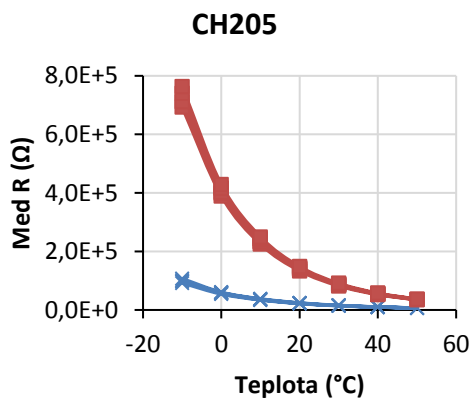


CH203

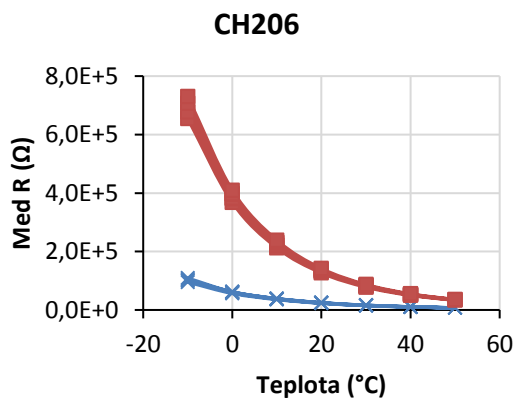


CH204

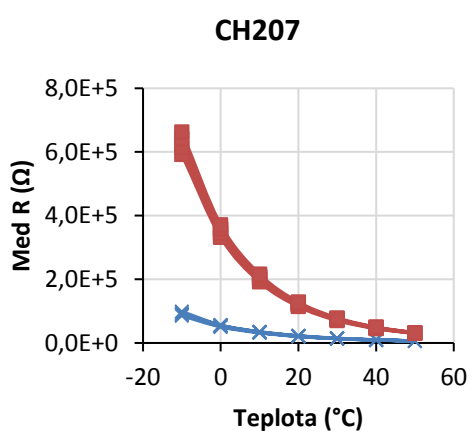




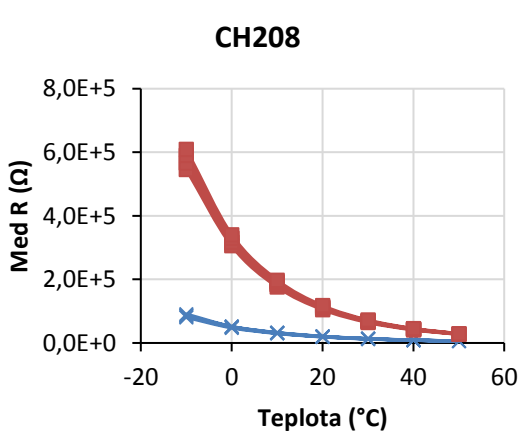
—x— Výchozí —■— Následná



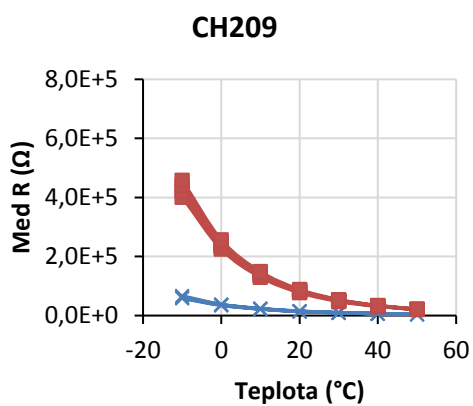
—x— Výchozí —■— Následná



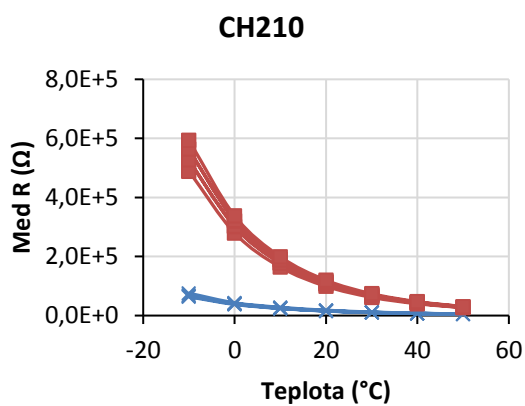
—x— Výchozí —■— Následná



—x— Výchozí —■— Následná



—x— Výchozí —■— Následná

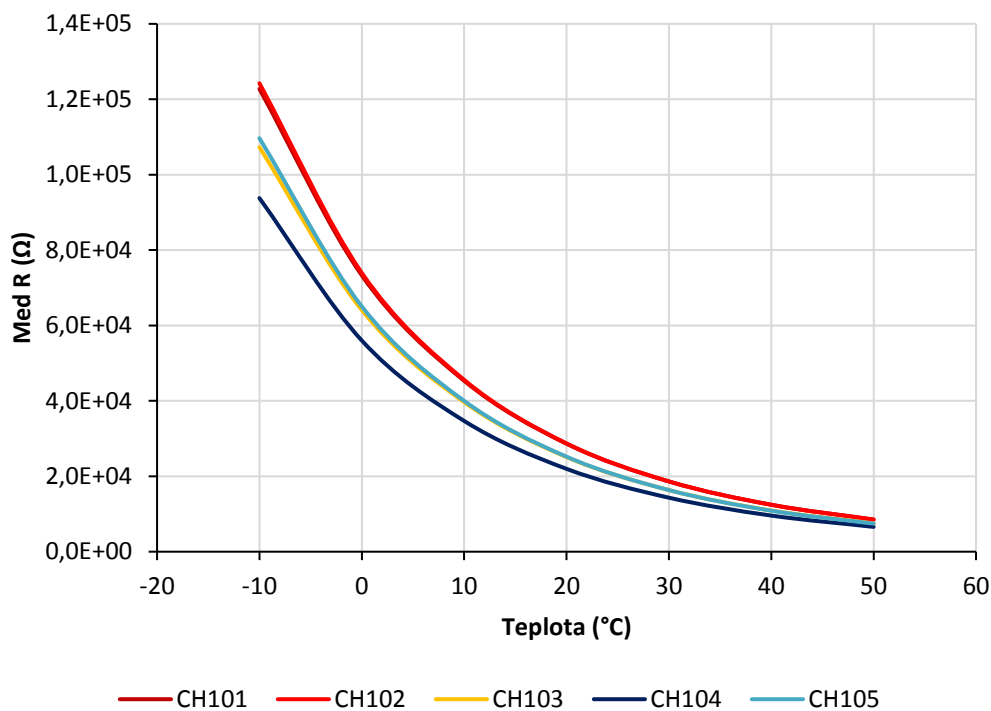


—x— Výchozí —■— Následná

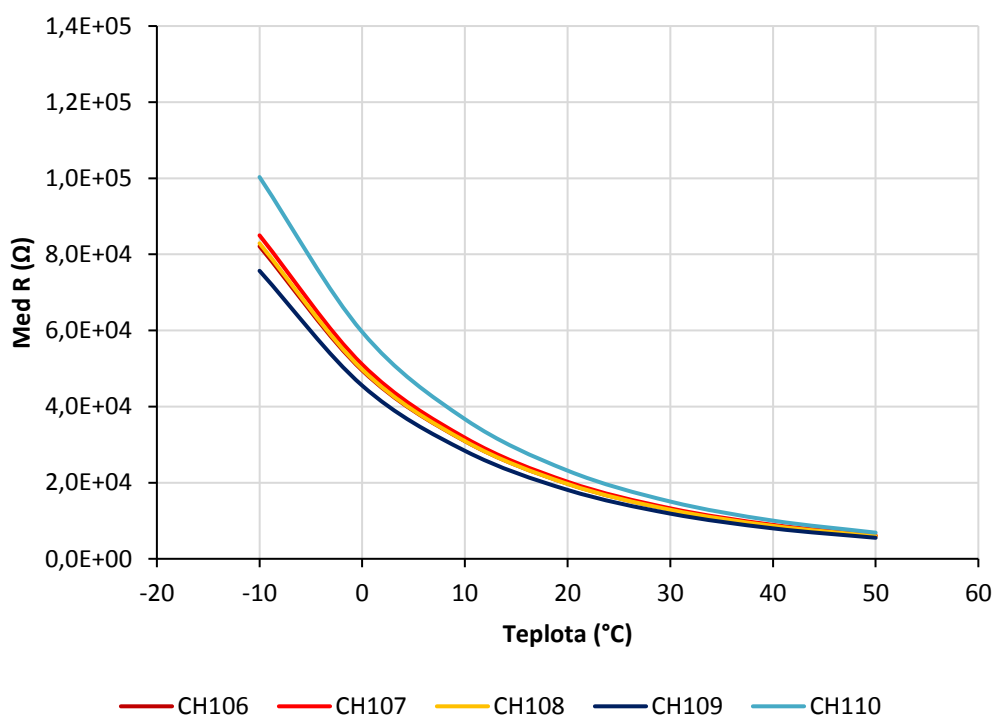
Příloha E

Souhrnné grafy s kalibračními křivkami bez hystereze

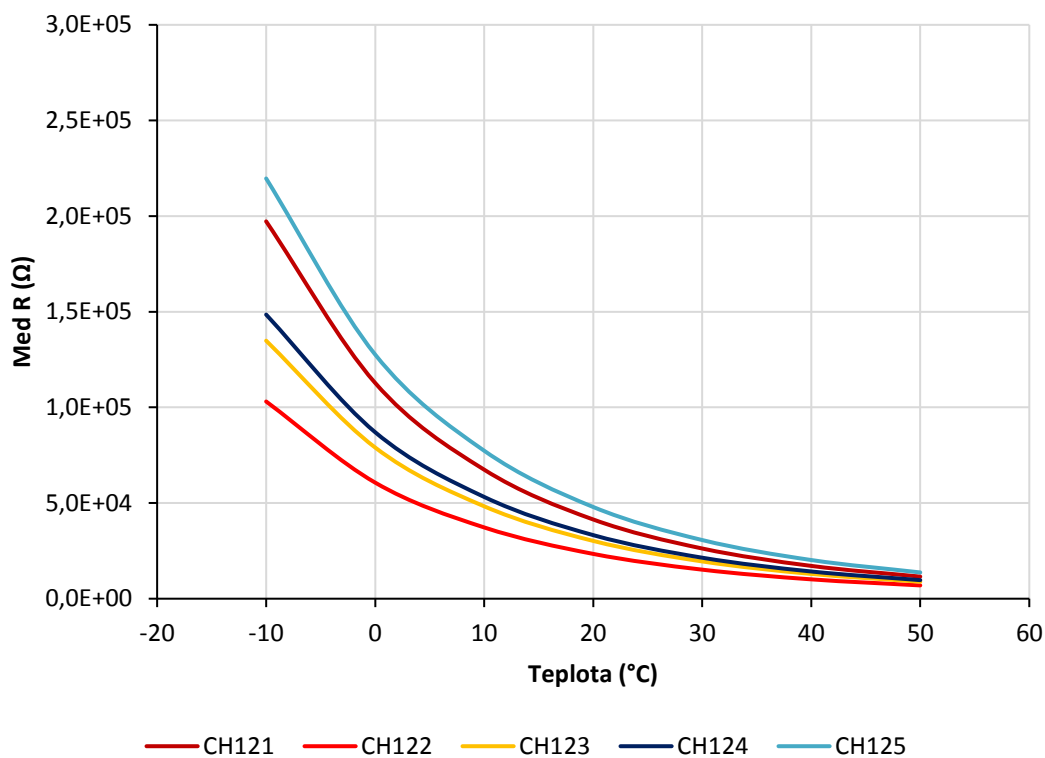
Kalibrační křivky bez hystereze pro F1-A (CH 101-105)



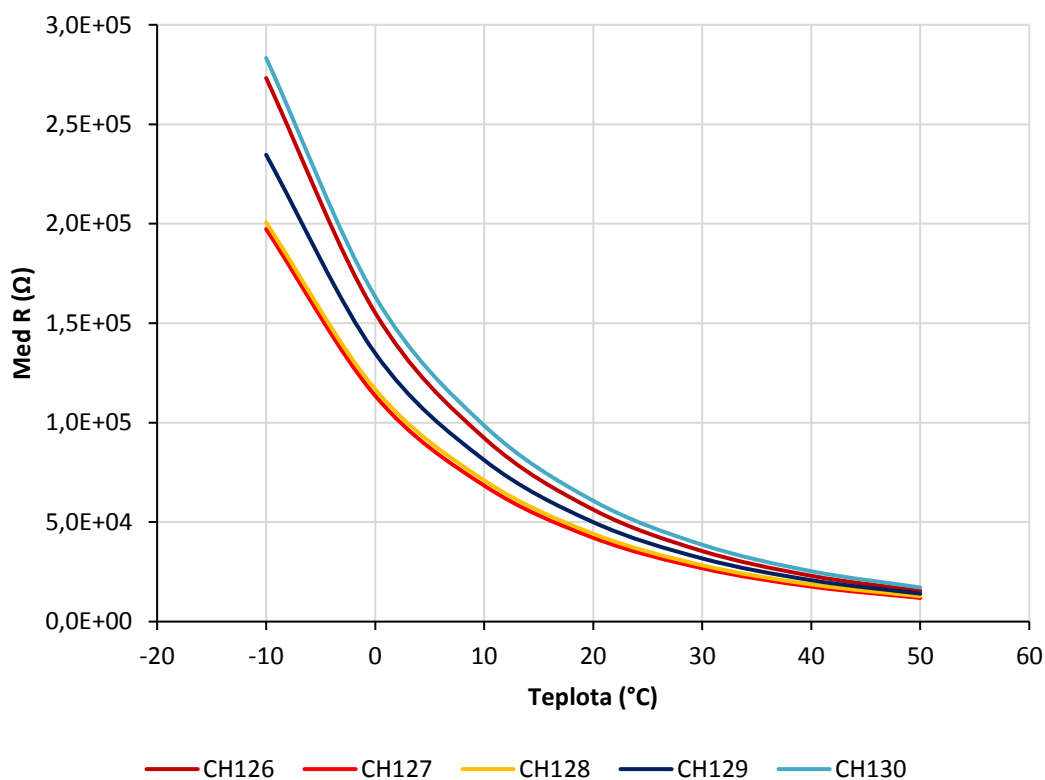
Kalibrační křivky bez hystereze pro F1-B (CH 106-110)



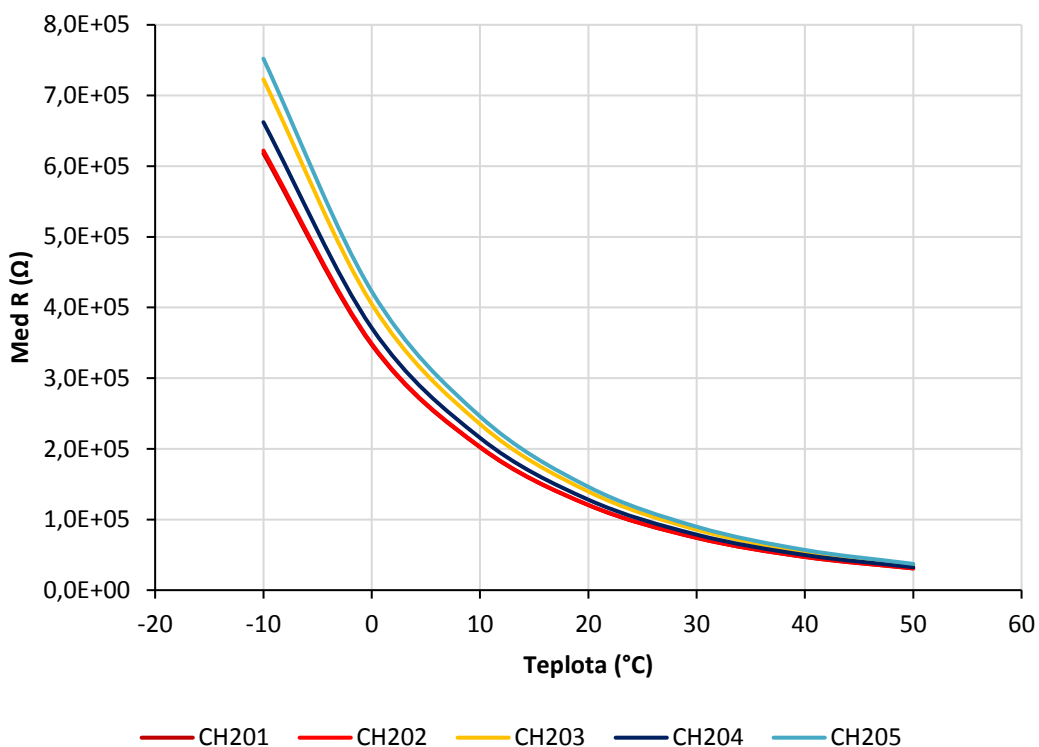
Kalibrační křivky bez hystereze pro F2-A (CH 121-125)



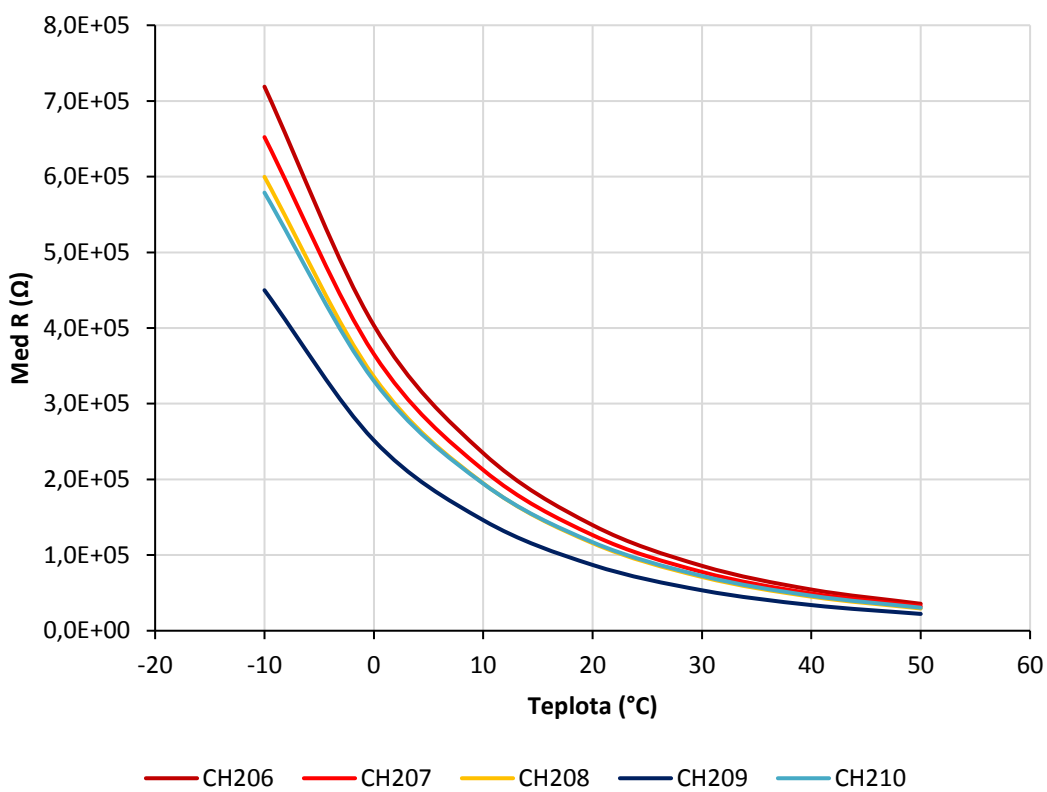
Kalibrační křivky bez hystereze pro F2-B (CH 126-130)



Kalibrační křivky bez hystereze pro F3-A (CH 201-205)

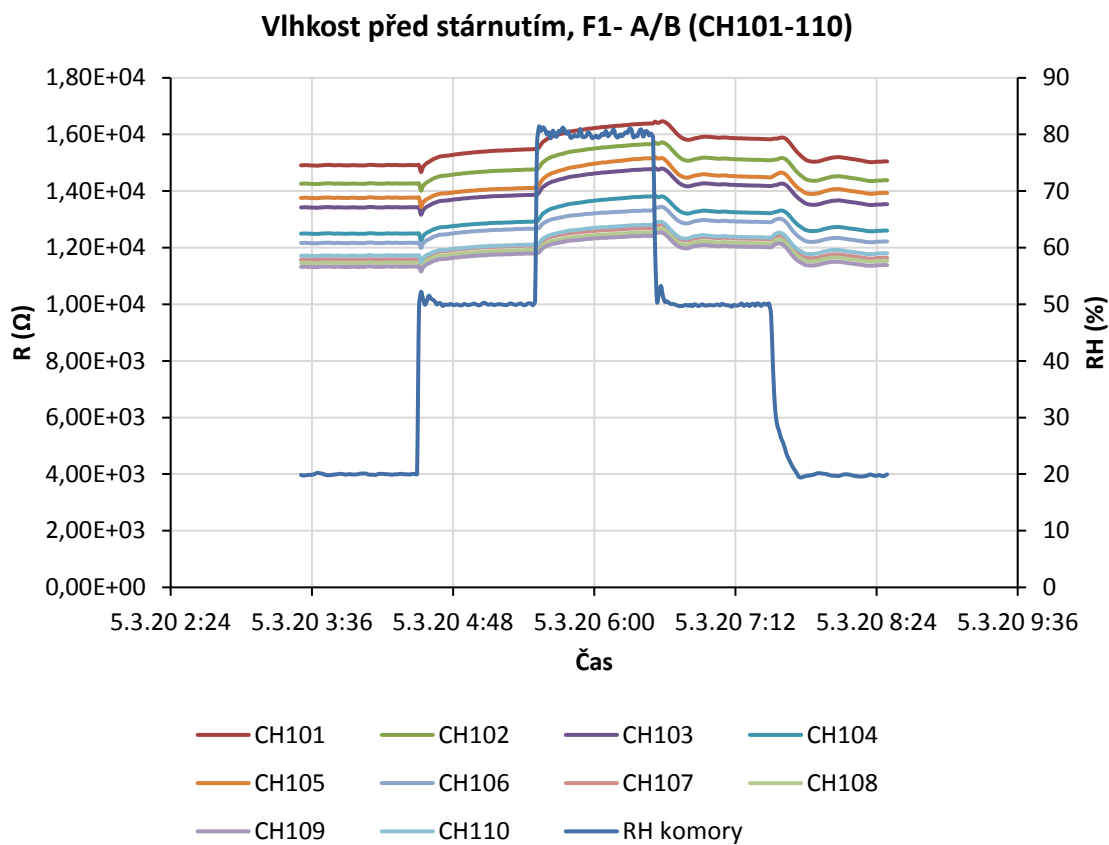


Kalibrační křivky bez hystereze pro F3-B (CH 206-210)

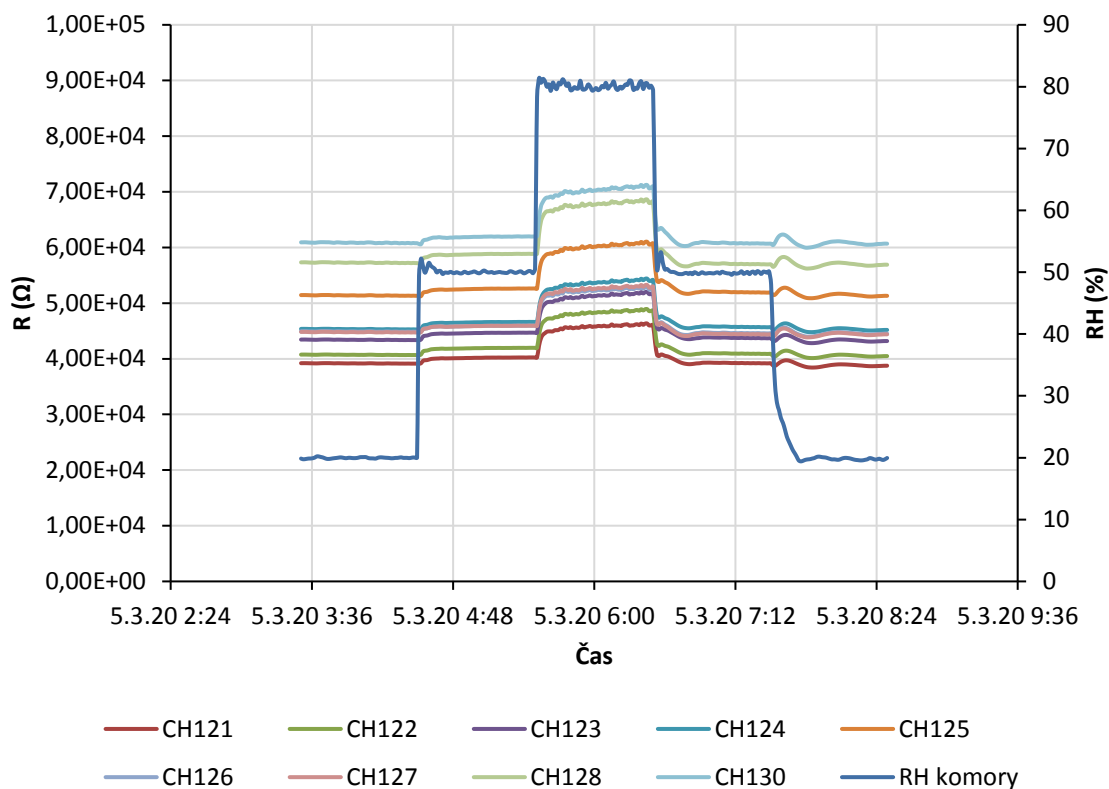


Příloha F

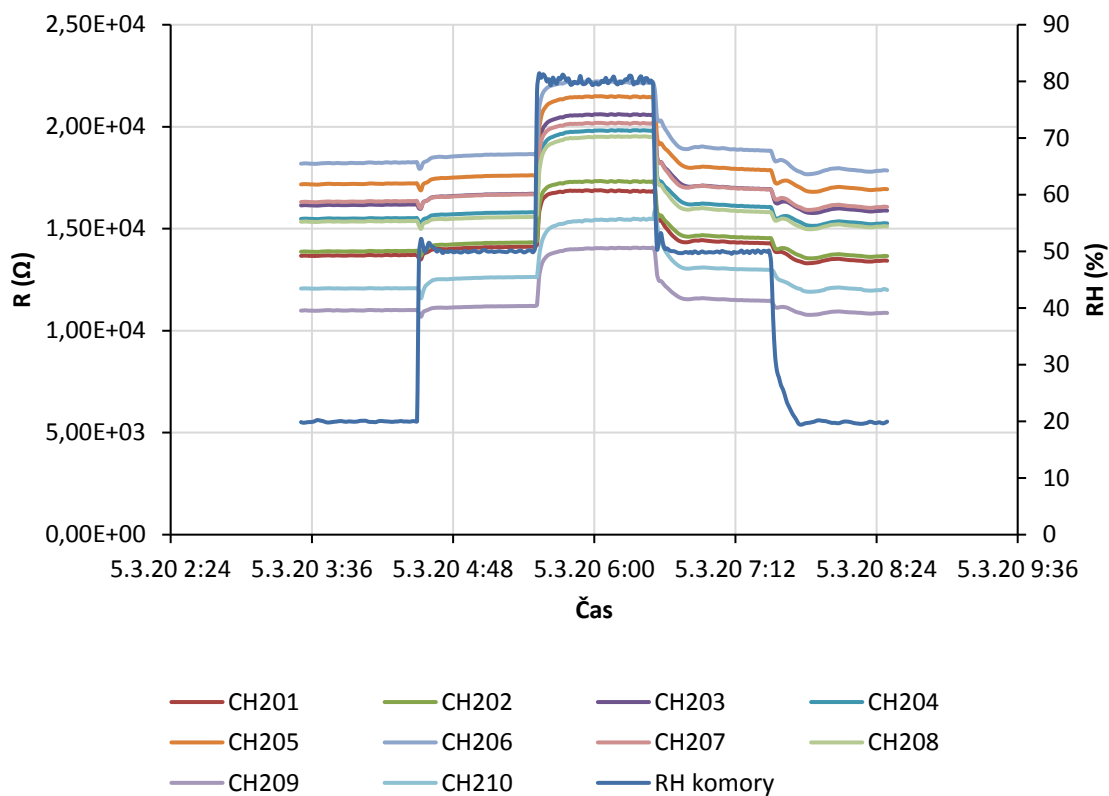
Grafy s celkovým průběhem vlivu vlhkosti před a po stárnutí



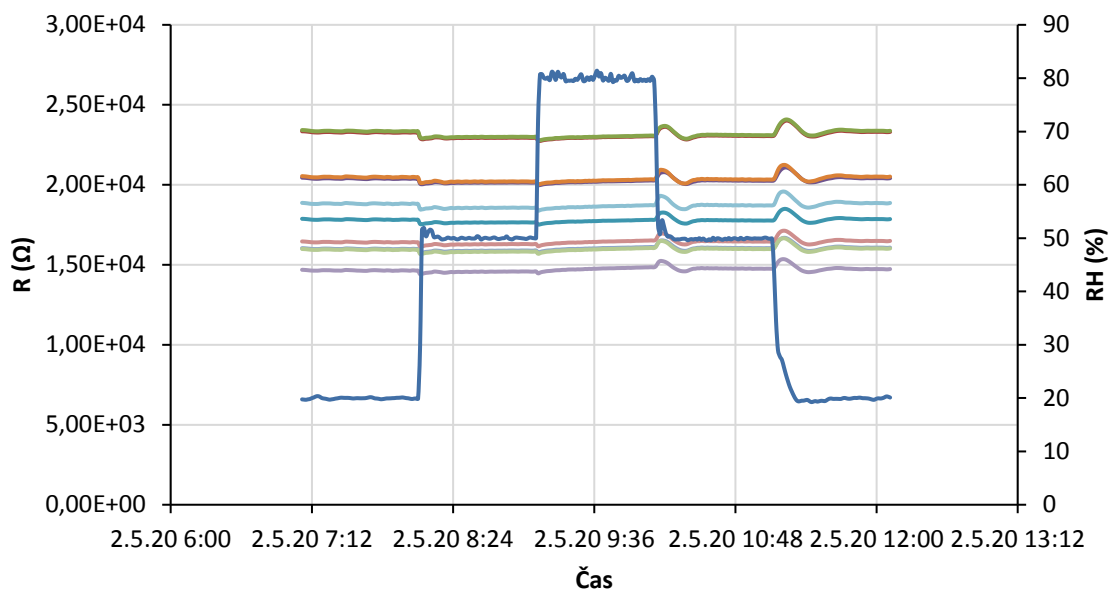
Vlhkost před stárnutím, F2 A/B (CH121-130), CH129 výpadek



Vlhkost před stárnutím, F3-A/B (CH201-210)

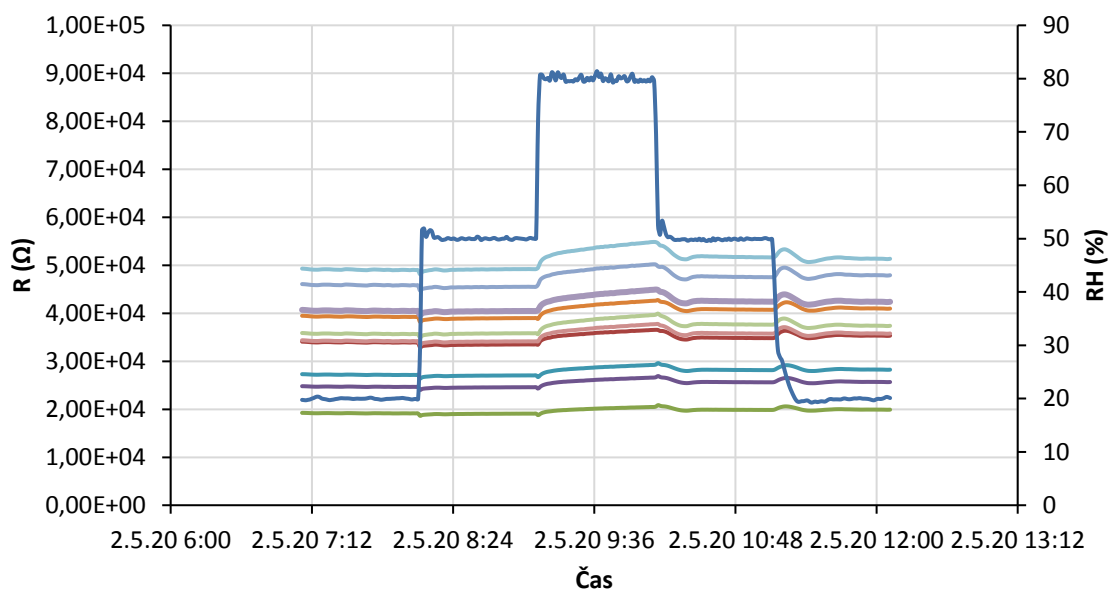


Vlhkost po stárnutí, F1-A/B (CH101-110)



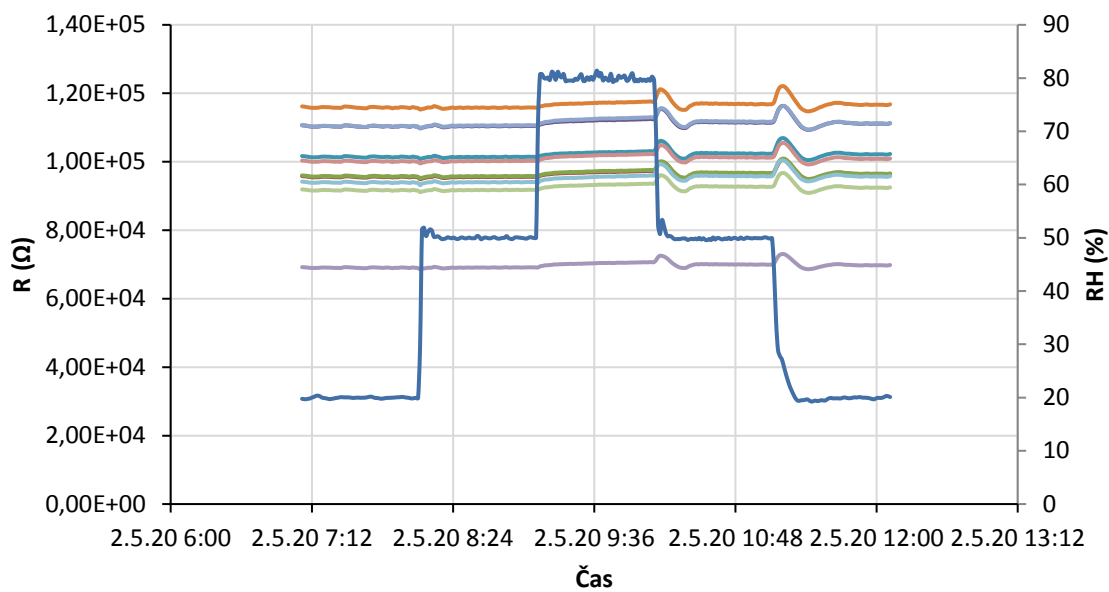
- CH101 — CH102 — CH103 — CH104
- CH105 — CH106 — CH107 — CH108
- CH109 — CH110 — RH komory

Vlhkost po stárnutí, F2-A/B (CH121-130)



- CH121 — CH122 — CH123 — CH124
- CH125 — CH126 — CH127 — CH128
- CH130 — CH129 — RH komory

Vlhkost po stárnutí, F3-A/B (CH201-210)

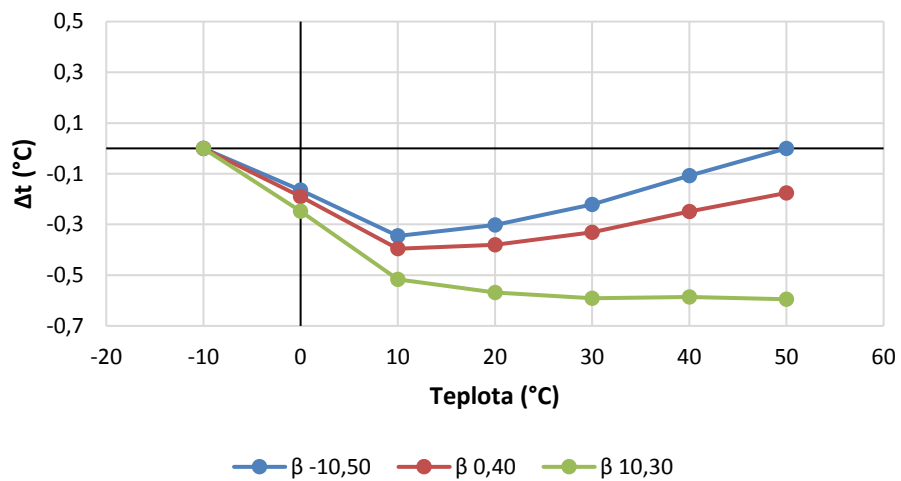


- | | | | |
|---------|---------|-------------|---------|
| — CH201 | — CH202 | — CH203 | — CH204 |
| — CH205 | — CH206 | — CH207 | — CH208 |
| — CH209 | — CH210 | — RH komory | |

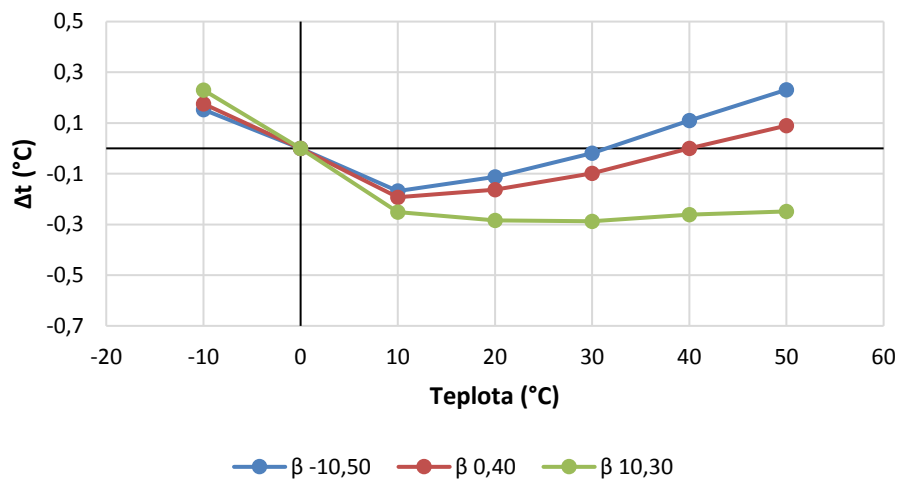
Příloha G

Volba koeficientu β pro jednoduchý model.

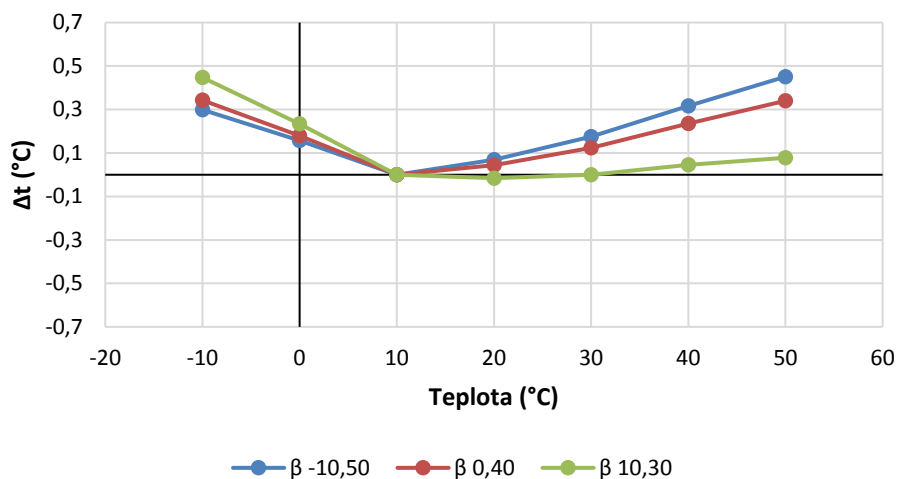
Jednoduchý model, volba β , CH108, R0 při -10 °C



Jednoduchý model, volba β , CH108, R0 při 0 °C



Jednoduchý model, volba β , CH108, R0 při 10 °C



Jednoduchý model, volba β , CH108, R0 při 20°C

