

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Charakterizace tištěných flexibilních termistorů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr KAČÍREK**
Osobní číslo: **E15N0015P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Charakterizace tištěných flexibilních termistorů**
Zadávatel katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Popište prakticky používané moderní typy termistorů, princip jejich funkce, jejich konstrukční provedení a materiálové složení, základní parametry a charakteristiky, metody jejich měření a postupy kalibrace termistorů. Samostatně se věnujte problematice termistorů vyráběných tiskovými technikami.
2. Popište technologii výroby tištěných termistorů v poloprovozních podmínkách.
3. Navrhněte metodiku charakterizace tištěných termistorů z poloprovozní výroby s využitím dostupné měřicí instrumentace.
4. Statisticky charakterizujte soubor vzorků z poloprovozní výroby s využitím navržené metodiky.
5. Na základě výsledků statistického vyhodnocení navrhněte metodu kalibrace senzorů pro výrobu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. FRADEN, Jacob. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 4. vyd. Springer-Verlag New York, 2010. ISBN 978-1-4419-6466-3.
2. WEBSTER, John G. a Halit EREN. Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement. 2. vyd. CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4398-4889-0.
3. CHILDS, Peter R. N. Practical temperature measurement. Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0 7506 5080 X.
4. ALEXANDER, Matthew D. a Kerry T.B. MACQUARRIE. Toward a Standard Thermistor Calibration Method: Data Correction Spreadsheets. Ground Water Monitoring and Remediation [online]. 2005, roč. 25, č. 4, s. 75781 [vid. 12. duben 2015]. ISSN 1069-3629. Dostupné z: doi:10.1111/j.1745-6592.2005.00050.x
5. Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Wiley Online Library, AIP Scitation, Google Scholar, ResearchGate, Mendeley ...)

Vedoucí diplomové práce: Ing. Silvan Pretl, Ph.D.

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017


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




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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou charakterizace tištěných termistorů v poloprovozních podmínkách. V první části práce jsou popsány konvenční typy termistorů NTC a PTC. Druhá část je zaměřena na flexibilní a tištěnou elektroniku a třetí část se zabývá praktickými zkouškami na daných vzorcích termistorů. V závěru práce jsou interpretovány výsledky získané měřením.

Klíčová slova

Termistor, flexibilní elektronika, tištěná elektronika, hystereze, kalibrace senzoru, teplotní charakteristiky.

Abstract

This work deals with the characterization of printed thermistors in pilot plant conditions. The first part of the thesis describes conventional types of NTC and PTC thermistors. The second part is then focused on flexible electronics and printed electronics and in the third part deals with practical tests on given thermistor samples. At the end of the thesis the results obtained by the measurement are interpreted.

Key words

Thermistor, flexible electronics, printed electronics, hysteresis, sensor calibration, temperature characteristics.

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 18.5.2017

Petr Kačírek

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM ZKRATEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ	10
ÚVOD	11
1 KONVENČNÍ TYPY TERMISTORŮ	12
1.1 HISTORIE KONVENČNÍCH TERMISTORŮ	12
1.2 DRUHY KONVENČNÍCH TERMISTORŮ	12
1.2.1 NTC termistory.....	13
1.2.2 PTC termistory.....	13
1.2.3 Fyzikální podstata NTC a PTC termistorů.....	15
1.3 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ, VÝROBA A KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ TERMISTORŮ	15
1.3.1 Materiálové složení.....	15
1.3.2 Výroba NTC	16
1.3.3 Výroba PTC	16
1.3.4 Konstrukční provedení	16
1.4 OBLASTI POUŽITÍ	19
1.5 VÝHODY A NEVÝHODY KONVENČNÍCH TYPŮ TERMISTORŮ	20
1.6 ZÁKLADNÍ PARAMETRY A VLASTNOSTI.....	21
1.7 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY NTC A PTC TERMISTORŮ	23
1.7.1 R-T charakteristika NTC termistoru	23
1.7.2 Teplotní časová konstanta NTC termistoru.....	24
1.7.3 I-R charakteristika NTC termistoru	24
1.7.4 R-T charakteristika PTC termistoru.....	24
1.7.5 I-t charakteristika dynamické odezvy u PTC termistoru	25
1.7.6 I-V charakteristika PTC termistoru	25
1.8 OBECNÉ MOŽNOSTI KALIBRACE A JEJICH POPIS MATEMATICKÝMI MODELY	26
1.8.1 Matematické modely kalibrací	27
1.8.2 Současné modely.....	28
1.8.3 Prostý model	28
1.8.4 Frádenův model	29
1.8.5 Steinhart-Hartův model.....	31
1.8.6 Zhodnocení matematických modelů	32
1.9 METODY MĚŘENÍ	32
1.9.1 Měření pomocí Wheastnoeova můstku.....	33
1.9.2 Měření pomocí digitálního multimetru	33
1.9.3 Měření a určení klíčových parametrů termistorů.....	34
2 TIŠTĚNÉ FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA	36
2.1 KONVENČNÍ FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA	36
2.1.1 Aplikace konvenční flexibilní elektroniky.....	36
2.2 PROGRESIVNÍ FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA	37
2.2.1 Tenkovrstvá technologie	37
2.3 TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA	38
2.3.1 Provedení tištěné elektroniky	38
2.4 TIŠTĚNÉ TERMISTORY	38
2.4.1 Sítotisk.....	39
2.4.2 Tištěné termistory na keramický substrát.....	40
2.4.3 Tištěné termistory na flexibilní substrát	41
3 CHARAKTERIZACE TIŠTĚNÝCH TERMISTORŮ	41

3.1	MATERIÁLY A TECHNOLOGIE VÝROBY TIŠTĚNÝCH TERMISTORŮ V POLOPROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH.....	42
3.2	METODIKA CHARAKTERIZACE TIŠTĚNÝCH TERMISTORŮ.....	43
3.2.1	<i>Použité přístroje.....</i>	48
3.3	MĚŘÍCÍ METODA	48
3.4	STATISTICKÁ CHARAKTERIZACE.....	49
3.4.1	<i>Analýza hysteréze.....</i>	51
3.4.2	<i>Analytické vyjádření teplotní závislosti.....</i>	59
3.5	METODA KALIBRACE SENZORŮ PRO VÝROBU	66
3.5.1	<i>Metoda kalibrace senzorů pro toto měření</i>	67
3.6	DISKUZE VÝSLEDKŮ	67
	ZÁVĚR	68
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	70
	PŘÍLOHY	1

Seznam zkratek

LCD	Displej z tekutých krystalů (liquid crystal display)
NTC	Termistor s negativním teplotním koeficientem
OLED.....	Organická elektroluminiscenční dioda (Organic light-emitting diode)
PTC	Termistor s pozitivním teplotním koeficientem
RFID	Identifikace na rádiové frekvenci (Radio Frequency Identification)
RTD	Odporový teploměr (resistance temperature detectors)
SMT	Povrchová montáž (surface mount technology)
TCR.....	Teplotní koeficient odporu (Temperature coefficient of resistance)
TFT	Tenkvrstvé tranzistory (Thin Film Transistor)
THT.....	Osazování plošných spojů součástkami s drátovými vývody (Through-hole technology)

Seznam symbolů

α	Teplotní koeficient
β	Citlivostní konstanta
Co.....	Kobalt
Fe	Železo
Fe ₂ O ₃	Oxid hlinitý
H.....	Teplotní kapacita
Mn.....	Mangan
PET	Polyethylentereftalát
R _m	Minimální odpor
T _c	Teplota přechodu
V ₂ O ₅	Oxidy vanadičité
δ	Ztrátový činitel

Úvod

Cílem této diplomové práce je charakterizace tištěných termistorů v poloprovozních podmínkách. Předmětem této práce, která je rozdělena do tří samostatných částí, je seznámení s prakticky používanými moderními typy termistorů, popis jejich funkce, konstrukčního provedení, materiálového složení, základních parametrů a také jsou zde charakterizovány problematiky termistorů, vyráběných tiskovými technikami. Dále se práce zabývá popisem technologie výroby tištěných termistorů v poloprovozních podmínkách, metodikou charakterizace tištěných termistorů a statistickým zpracováním a vhodně navrženou metodou kalibrace senzorů pro výrobu.

Flexibilní elektronice se v posledních letech dostává na trhu s elektronikou pozornosti více než kdy dříve. Tato elektronika má na rozdíl od klasické křemíkové elektroniky řadu výhod. Jednou z výhod flexibilní elektroniky je například cena při výrobě, která je podstatně nižší než u obyčejné křemíkové elektroniky. Její další nezměrnou výhodou je její vysoká flexibilita a také její nízká váha. Díky těmto vlastnostem je flexibilní elektronika kandidátem na příští generaci spotřební elektroniky, kde hlavní cílem jsou nízké náklady, přenosnost, ohebnost a lehkost.

1 Konvenční typy termistorů

Tato část diplomové práce obsahuje stručný náhled do historie konvenčních termistorů. Poté poznáme oblasti použití jednotlivých typů termistorů NTC a PTC. Následně bude poukázáno na možné výhody a nevýhody konvenčních provedení termistorů, po kterých bude následovat úvod do jednotlivých typů (NTC a PTC). Po této kapitole bude pojednáváno o materiálovém složení, základních parametrech a konstrukčním provedení. Předposlední kapitola se bude zabývat možnými způsoby kalibrace v obecném pojednání, následované popisem matematických modelů teplotních charakteristik. Poslední kapitola bude obsahovat způsoby měření jednotlivých typů termistoru.

1.1 Historie konvenčních termistorů

První NTC termistor byl objeven roku 1833 Michaelem Faradayem. Tehdy podal první zprávy o polovodičovém chování sulfidu stříbra. Faraday si všiml, že odpor sulfidu stříbra dramaticky klesl se zvyšující se hodnotou tepla.

Vzhledem k nízké úrovni tohoto odvětví v těchto letech bylo velmi náročné zhotovit takovou součástku a využít její potenciál. Trvalo to přibližně dalších 100 let, než začala vůbec první komerční výroba životaschopných termistorů. Jejich vynálezcem byl roku 1930 Samuel Ruben. První využití bylo v kompenzačních obvodech v oblasti letectví. [1]

1.2 Druhy konvenčních termistorů

Termistor je elektrotechnická součástka, jejíž elektrický odpor je závislý na teplotě. Název termistor je spojením (zkrácením) dvou slov: tepelný a rezistor. Tento název se většinou používá pro senzory na bázi oxidů kovů, vyrobených ve formě absolutních teplotních "čidel". To znamená, že může měřit teplotu s rozsahem k absolutní nule, což je $T = 0 \text{ K}$, tj. $-273,15 \text{ °C}$.

Všechny termistory rozdělujeme do dvou skupin. První touto skupinou jsou NTC termistory, které se používají jako teplotní čidla a vyznačují se klesajícím odporem při zahřátí součástek. Druhou skupinou jsou PTC termistory, kde naopak odpor při zahřátí součástek značně roste. [5,7]

1.2.1 NTC termistory

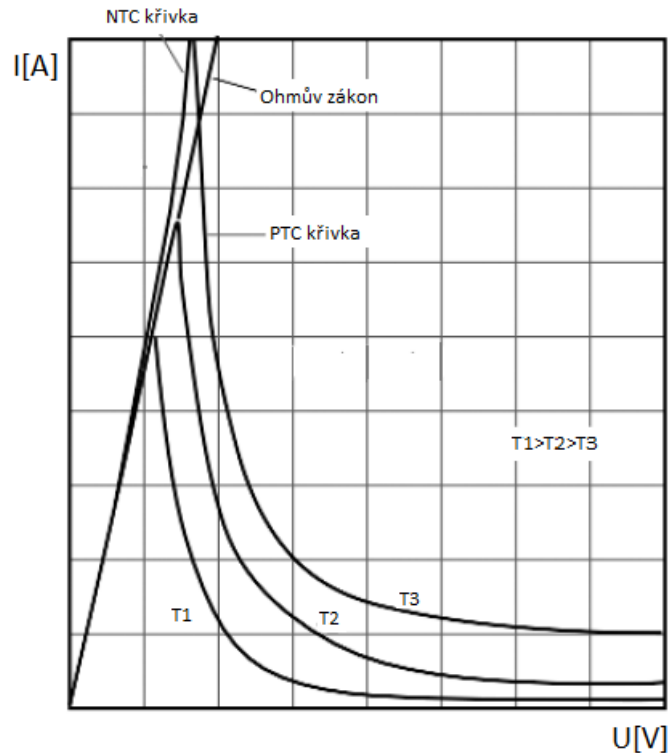
Jak již bylo zmíněno, NTC termistory se využívají především pro přesné měření teploty. Konvenční termistory jsou konstruovány na bázi kov-oxid a hlavní vlastností tohoto termistoru je snižující se odpor při nárůstu teploty viz druhý odstavec v úvodní kapitole „Termistor“. Nominální rezistance NTC termistoru je dána rezistivitou materiálu a jeho geometrickým uspořádáním (nominální rezistance je vztažena ke konkrétní teplotě). Vztah mezi teplotou a odporem je vysoce nelineární. Při nutnosti vysoké přesnosti či vysoké škály provozních teplot by termistory nikdy neměly být nastavovány přesně podle listů daných od výrobců. Důvodem je tolerance jmenovitých hodnot odporu při teplotě 25 °C, která činí $\pm 5\%$. Tato tolerance je v praxi celkem běžná. Může být však ještě snížena při výrobě, aby bylo dosaženo vyšší přesnosti. Nevýhodou však je, že se musí tyto termistory individuálně kalibrovat v rozsahu provozních teplot. Dále mohou výrobci zkrátit termistor broušením na požadované rozměry, které přímo odpovídají jmenovité hodnotě. Tyto individuální opravy však zvyšují náklady na jednotlivé typy provozních termistorů. Alternativou těchto kalibrací může být v konečném důsledku vlastní kalibrování pomocí známé teploty a daného odporu. Zde však není zaručena vysoká přesnost. [3,4,5,7,8]

1.2.2 PTC termistory

Obecně by se dalo říci, že všechny kovy mohou být nazývány PTC materiály. Nicméně jejich teplotní koeficienty odporu jsou poměrně nízké a v praxi se již moc nevyskytují. Naopak keramické PTC materiály jsou charakteristické tím, že mají vysokou teplotní závislost a mohou být využívány například v keramických topidlech. Tyto termistory jsou vyrobeny z polykrystalické keramické hmoty, která je obvykle založena na bazických sloučeninách jako například titaničitan barnatý, pevné roztoky barya či stroncium titaničité (vysoce odporové materiály) s polovodičovou příměsí. Curieova teplota (charakteristická vlastnost feromagnetických a piezoelektrických látek) se v těchto kompozitních materiálech poměrně rychle mění, což vede často ke zvýšení odporu až o několik řádů. Na rozdíl od rezistoru NTC má PTC termistor pozitivní teplotní charakter. To znamená, že se zvyšující se teplotou odpor termistoru roste.

Je také důležité si uvědomit, že pro termistor existují dva faktory, které hrají klíčovou roli. Jeden z faktorů je teplota okolního prostředí a druhým faktorem je samo-ohřívání nebo-li self-heating. Jeden nebo dokonce i oba tyto faktory poté dokáží posouvat hranici pracovního

bodu termistoru. Teplotní citlivost ovlivňuje V-A charakteristiku, jak je patrné na obr. 1.1. Tento graf dále znázorňuje V-A charakteristiku NTC termistoru se superlineárním průběhem (tzn. diverguje vzhůru od lineárního ohmického průběhu). Dále jsou do grafu zaneseny tři V-A charakteristiky PTC termistoru pro tři různé teploty. To znamená, že vyjadřuje teplotní závislosti při konstantním TCR, kde zkratka TCR (Temperature coefficient of resistance) vyjadřuje jeden z hlavních parametrů, který je využit pro charakterizaci odporu termistoru, kde TCR definuje změnu odporu v závislosti na změně okolní teploty.



Obr. 1.1: V-A char. PTC a NTC podle teplotní závislosti, převzato z [5]

Jelikož Ohmův zákon pracuje se zjednodušujícím předpokladem nulové teplotní závislosti, je v grafu zázorněn pouze přímkou.

Negativní teplotní koeficient je znázorněn NTC křivkou, která znázorňuje pokles odporu vlivem zvyšujícího se proudu. Zvyšující se proud má za následek jouleovy ztráty, které jsou způsobeny kolizemi mezi elektrony urychlovanými elektrickým polem a atomární strukturou materiálu, v němž se elektrony pohybují. Dochází tak k přenosu kinetické energie, která se přeměňuje na tepelnou energii. V důsledku toho roste teplota materiálu, která u NTC termistoru vede k excitaci nových nosičů náboje, tzn. poklesu odporu a nárůstu proudu.

Posledním typem součinitele odporu je pozitivní teplotní koeficient. Jeho výhodou je skutečnost, že připojením na zdroj napětí a jeho následným zvyšováním nedochází u kovů k přehřívání, a naopak se chovají jako samoregulační zařízení. Příklad využití této vlastnosti můžeme nalézt u vlákna žárovky, která neshoří, protože nárůstem teploty se začne zvyšovat i odpor, který omezuje průtok proudu. Tento samoregulační efekt se významnou měrou podílí na samotném chodu termistoru. [3,4,5,7,8]

1.2.3 Fyzikální podstata NTC a PTC termistorů

NTC termistor – fyzikální podstata tohoto termistoru spočívá v nárůstu počtu elektronů, které vlivem tepelné energie nesou náboj do vodivého pásma. Tato energie narůstá se zvyšujícím se proudem a zapříčiňuje tak nárůst vodivosti s rostoucí teplotou.

PTC termistor – většina těchto termistorů bývá využívána jako spínací součástka, což znamená, že teplota prudce narůstá až od určité kritické teploty. Tyto součástky jsou vyrobeny z dopované polykrystalické keramiky, která obsahuje například titan barnatý a další sloučeniny. Dielektrická konstanta tohoto feroelektrického materiálu se mění s teplotou. Vysoká dielektrická konstanta zabraňuje pod Curiovy teplotou formování potenciálových krystalických bariér (tzn. potencialový gradient vznikající na rozhraní oblastí s prostorovým nábojem opačných polarit), což vede k nízkému odporu. V této oblasti má termistor malý záporný teplotní součinitel. Při dosažení Curiovy teploty se dielektrická konstanta sníží natolik, aby umožnila vytvoření krystalických bariér, které vedou ke zvyšování odporu v závislosti na zvyšující se teplotě. [31]

1.3 Materiálové složení, výroba a konstrukční provedení termistorů

Tato část práce se zabývá materiálovým složením termistorů, výrobou, konstrukčním provedením a využitím moderních typů termistorů.

1.3.1 Materiálové složení

Termistory se vyrábějí z oxidu kovu (Mn, Fe, Co, Ni ...), který se rozemele na prášek (vyrábí se tzv. práškovou metalurgií) a podle požadovaných vlastností se přidávají další příměsi a pojidla. Poté se směs za vysokého tlaku slisuje. Tvar termistoru (tyčinky, destičky) závisí na pozdějším použití, kdy například menší termistory ve formě kuliček mívají průměr okolo 0,15 mm do 1,5 mm. Nakonec se nechá vypálit v peci (při teplotách větších než 1000 °C) [10,11]

1.3.2 Výroba NTC

Termistory NTC se vyrábějí práškovou, tenkovrstvou nebo tlustovrstvou technologií. V prvním případě se senzory vyrábí ze směsí kovů (např. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, $\text{MnO} + \text{CoO}$), následně se vylisují, a tím dojde k celkovému zpevnění. Tento děj probíhá za vysokých teplot. Příkladem tenkovrstvého NTC senzoru může být negastor SiC pro rozsah teplot $-100\text{ }^\circ\text{C}$ až $+450\text{ }^\circ\text{C}$, vyrábění technologií vysokofrekvenčního napařování na substrát Al_2O_3 s β (citlivostní konstanta) v rozmezí od 1600 do 3400 a základní hodnota odporu při teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$ od $1\ \Omega$ do $1\ \text{M}\Omega$. Dalším příkladem může být také miniaturní negastor z polykrystalického křemíku dopovaného bórem.

Tlustovrstvé senzory vznikají nanášením speciálních past, které se následně vypálí. U cermetových NTC termistorových past tvoří funkční materiál polovodičová polykrystalická keramika na bázi přesně řízených směsí některých kovů (například Mn, Co, Ni, Cu). Jako nosný substrát NTC cermetových vrstev se obvykle používá korundová keramika (96% Al_2O_3). Kromě těchto cermetových past existují například i polymerní NTC pasty na bázi uhlíku.

1.3.3 Výroba PTC

PTC termistory se vyrábí z polykrystalické keramiky, například z titaničitanu barnatého (BaTiO_3). Dále se vyrábějí například sintrováním přesně řízených práškových směsí, a to obvykle do tvaru malého disku s průměrem od 3 mm do 25mm. Referenční teplota PTC termistorů (teplota přechodu) závisí na chemickém složení a obvykle se používá teplota v rozsahu $60\text{ }^\circ\text{C}$ do $180\text{ }^\circ\text{C}$. [11,12]

1.3.4 Konstrukční provedení

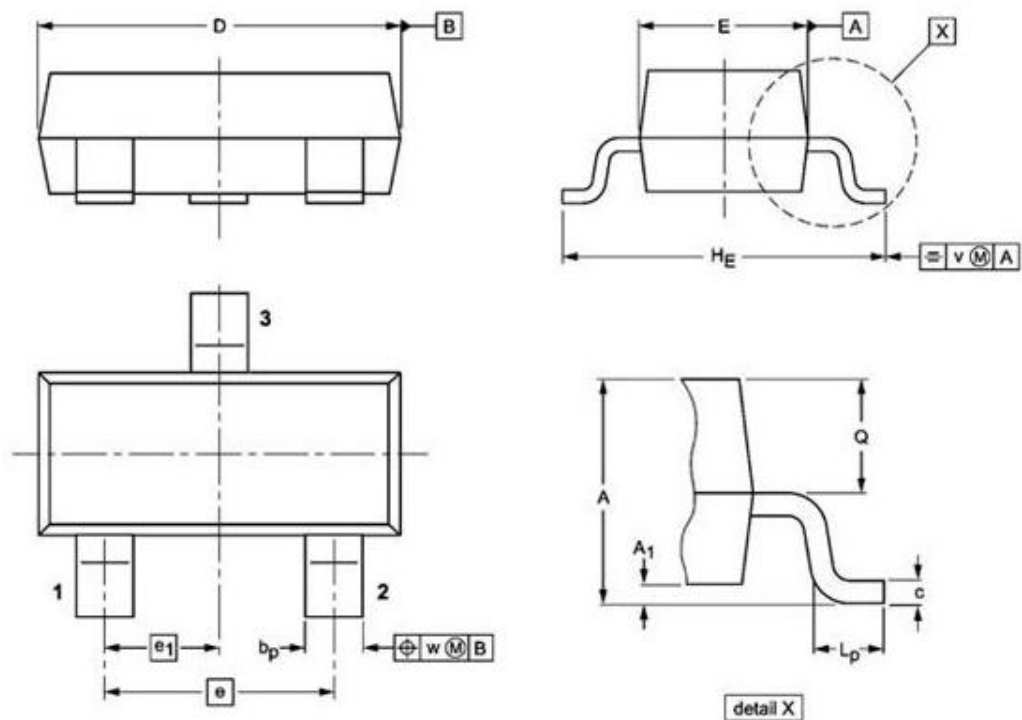
1. THT (Through-hole technology) – tento způsob konstrukčního provedení spočívá ve vyvedení drátových vývodů skrz desku plošného spoje, kde jsou tyto vývody následně zapájeny. Existují dva druhy vývodů u tohoto provedení, a to radiální nebo axiální.

[2,28]



Obr. 1.2: Radiální a axiální THT provedení termistoru převzato z [28]

2. SMT (Surface mount technology) – toto konstrukční provedení spočívá v pájení a osazování povrchu plošného spoje. Tento plošný spoj může být vícevrstvý. Nejvíce se však využívá čtyř vrstev mědi, přičemž bývá osazena horní a spodní vrstva plošného spoje. Součástky, které jsou použity přímo pro toto konstrukční provedení, se nazývají SMD (surface mount device) součástky. [2,29]



UNIT	A	A ₁ max.	b _p	c	D	E	e	e ₁	H _E	L _p	Q	v	w
mm	1.1 0.9	0.1	0.48 0.38	0.15 0.09	3.0 2.8	1.4 1.2	1.9	0.95	2.5 2.1	0.45 0.15	0.55 0.45	0.2	0.1

Obr. 1.3: Konstrukční SMD provedení termistoru převzato z [29]

3. BD (bare die) – principem tohoto provedení je kombinace vodivého lepení s mikrodrátkovým bondováním. Tyto samotné termistorové čipy jsou převážně určeny pro společnou integraci s jinými funkčními součástkami do společného pouzdra. Využití nalezneme například u výkonových součástek, které mívají rozměrnější

pouzdra. [30]



Obr. 1.4: Konstrukční BD provedení termistoru převzato z [30]

4. Pouzdřené termistory – v průmyslových aplikacích se jedná například o různé zapouzdřené sondy v kovovém pouzdře, které se využívají například v elektrických kotlích nebo tepelených čerpadlech. Termistory tohoto typu nalezneme například u firmy AVX nebo Vishay. Tyto termistory jsou také často vybaveny přímo závitem pro montáž, například do rozvodů průmyslových kapalin. Dále se tyto termistory využívají pro měření povrchové teploty, kdy jsou tyto termistory uchyceny v montážních oknech.



Obr. 1.5: NTC, zapouzdřený kovový senzor převzato z [32]

Dalším příkladem mohou být pouzdřené senzory pro měření plynů, kde tyto sondy mají často podobu perforovaných trubiček. Typickým příkladem může být využití termistoru v EGT sensoru. Dalším příkladem je EPCOS NTC termistor od firmy TDK, jehož teplotní výdrž šplhá až k 600 °C a je využíván v automobilové elektronice, kde se vyskytuje v recirkulačním systému výfukových plynů



Obr 1.6: EPCOS NTC od firmy TDK převzato z [34]

5. Mikrotermistory – tyto typy termistorů se vyznačují malou velikostí. Příkladem může

být NTC termistor TO04 od firmy QTI, jehož velikost se pohybuje okolo stovek mikrometrů. [33]



Obr 1.7: NTC termistor TO04 od firmy QTI převzato z [33]

1.4 Oblasti použití

Použití termistorů v elektronice je založeno na několika základních principech. Jeden z principů je založen na změně odporu termistorového čidla v závislosti na teplotě, kterou termistor přímo obklopuje. Další z principů je založen na nelineárním průběhu statické voltampérové charakteristiky přímo ohřívaného termistoru a využití časové změny odporu při zapnutí nebo vypnutí obvodu. Dále nesmí být opomenuta změna zatěžovací konstanty a změna odporu nepřímo ohřívaného termistoru, který je vyhříván na teplotu okolí pomocnou topnou spirálou. [2,8]

Oblasti využití NTC termistorů [3]:

1. Měření teploty – díky své vysoké citlivosti je vhodný pro nízkonákladové aplikace pro měření teploty,
2. Regulace teploty – NTC termistory mohou být využity pro regulaci teploty (vypnout/zapnout) za minimálního množství použitých obvodů,
3. Teplotní kompenzace – v mnoha případech, kdy je požadována vysoká přesnost obvodu, je zapotřebí mít určitý druh teplotní kompenzace (oscilátory, LCD displeje),
4. Omezovač nárazového proudu – výhodou použití termistorů proti klasickým používaným výkonovým odporům je **snesení** výrazně vyššího nárazového proudu,
5. Kontrola kapaliny – termistor může být využit pro snímání přítomnosti nebo nepřítomnosti kapaliny, a to pomocí rozdílu v rozptylu konstant mezi kapalinou a plynem.

Oblastní využití PTC termistorů [3]:

1. Nadproudová ochrana – při nastání poruchového stavu se termistor začne prudce oteplovat, a tím dojde k prudkému nárůstu odporu,
2. Elektronický předřadník – termistor se používá v elektronickém předřadníku jako zpožďovací prvek, pokud je obvod pod napětím,
3. Startování motoru – s PTC termistorem v sérii se startovacím vinutím v elektrickém 1 fázovém stroji působí PTC jako prvek pro časové zpoždění,
4. Řízení napájení baterie – při plném nabití baterie se teplota začne značně zvyšovat, což způsobí i nárůst teploty na PTC termistoru, to zapříčiní zvýšení odporu, a díky tomu se začne snižovat napájecí napětí,
5. Lineární PTC termistor – relativně nedávný vývoj lineárního PTC termistoru je založen na **technologii tlustých vrstev, která je velmi podobná technologii výroby tlustovrstvých odporů.**

1.5 Výhody a nevýhody konvenčních typů termistorů

V Těto kapitole je shrnut výčet výhod a nevýhod konvenčních typů termistorů.

Výhody konvenčních termistorů [5]:

1. Termistor nabízí lepší přesnost v porovnání s RTD (resistance temperature detectors- odporový teploměr) a termočlánkem,
2. Termistory jsou menší co do velikosti při porovnání s termočlánkem,
3. Nabízejí vysokou stabilitu a vynikající opakovatelnost,
4. Termistory poskytují rychlejší odezvu než RTD,
5. Vysoká spolehlivost,
6. Nízké náklady na termistory a snadná přizpůsobitelnost teplotních čidel,
7. Široká škála využití pro snadné měření teploty.

Nevýhody konvenčních termistorů [5]:

1. Vzhledem k tomu, že termistory jsou polovodičové součástky, je jejich elektrická odezva vysoce nelineární. Tento efekt nelinearity je třeba kompenzovat před použitím v měřicích obvodech,
2. Omezený rozsah teploty. Ten má za následek to, že se termistory nemohou využívat při vyšších teplotách.

1.6 Základní parametry a vlastnosti

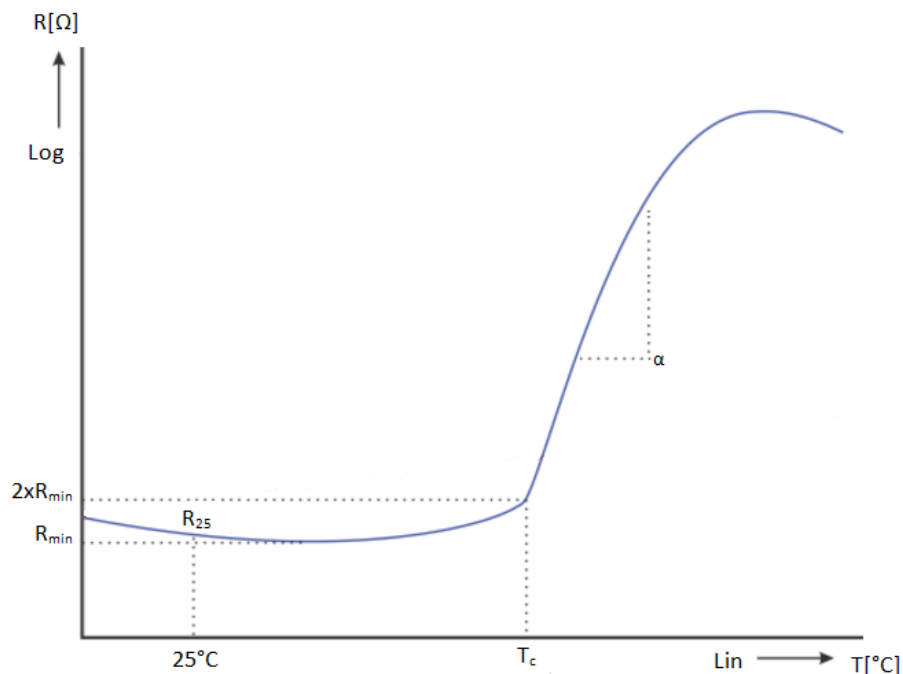
Tato část kapitoly pojednává o základních parametrech, vlastnostech a charakteristikách termistorů typu NTC a PTC.

Základní parametry a vlastnosti termistoru PTC jsou [13]:

1. Jmenovitý odpor R_{25} – tento odpor se měří při teplotě 25 °C (referenční bod pro termistory). Na tomto odporu také vznikají jisté toleranční odchylky, které jsou řádově nižší než 1 %. Tyto odchylky se vztahují k samotnému materiálu u PTC výroby.
2. Minimální odpor R_m – tato hodnota je definována jako nejnižší hodnota odporu, kterou je možno ještě změřit. V tomto bodě se na křivce mění teplotní koeficient z negativního na pozitivní a často se tento bod využívá jako základ pro měření teploty přechodu T_c . Často tato hodnota také ukazuje maximální možný proud, který protéká obvodem.
3. Teplota přechodu T_c – teplota, při které se začíná odpor termistoru měnit skokově (tato teplota se také nazývá teplotou spínací, teplota přechodu, nebo Curiova teplota a je po většinu času definována jako teplota, při které je odpor dvojnásobkem hodnoty minimálního odporu).
4. Odporová tolerance – typické hodnoty u PTC termistoru bývají 0,5 % až 1 %.
5. Teplotní rozsah – komerční PTC termistory spadají do dvou hlavních kategorií. První kategorií jsou termistory z teplotně citlivých křemíkových termistorů, také známých jako "silistorů", které pracují v provozních teplotách od -60 °C do 150 °C. Druhou kategorií tvoří spínací PTC termistory, které pracují stabilně v teplotách od 60 °C do 120 °C. Nicméně některé termistory mohou být zhotoveny i pro teploty od 0 °C do 200 °C.
6. Ztrátový činitel (δ) – tím rozumíme množství tepla, které se ztrácí za jednotku času, na základě teplotního rozdílu topného tělesa a okolní teploty.

7. Tepelná kapacita (H) – množství tepla, které je potřebné ke změně teploty termistoru o 1 °C.
8. Maximální napěťové zatížení – tato hodnota se pohybuje řádově od 30 V do 70 V, může však dosáhnout dokonce na 500 V.
9. Teplotní koeficient odporu (α) - definuje změnu odporu v závislosti na změně teploty (citlivost snímače na změnu teploty).

Výčet těchto bodů je zaznamenán v R-T charakteristice spínacího PTC termistoru (body 4,5,6,7,8 se do charakteristiky neuvádí).



Obr. 1.8: R-T charakteristika PTC termistoru

Základní parametry a vlastnosti termistoru NTC jsou [13]:

1. Jmenovitý odpor R_{25} – tento odpor se měří při teplotě 25 °C (referenční bod pro termistory). Na tomto odporu také vznikají jisté toleranční odchylky, které jsou řádově nižší než 1 %. Tyto odchylky se vztahují k samotnému materiálu u NTC výroby (křemíku) a rozměrům čipu.
2. Materiálová konstanta (β) – tato materiálová konstanta řídí sklon R-T charakteristiky (viz obr 1.4).
3. Teplotní koeficient odporu (α) – definuje změnu odporu v závislosti na změně teploty (citlivost snímače na změnu teploty). Tento koeficient je definován jako

viz bod 7 v Základních parametrech a vlastnostech termistoru PTC.

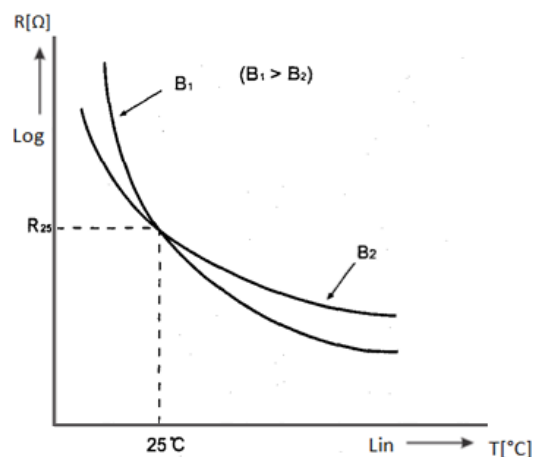
4. Maximální napěťové zatížení – tato hodnota se pohybuje kolem 5 V (elektronické zapojení).
5. Provozní teplotní rozsah – podle datasheetů, například od společnosti Vishay či Murata, se jedná o provozní teploty v rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v extrémních případech až do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.
6. Odporová tolerance – jedná se o odporovou toleranci vztahující se k R_{25} , tato tolerance je oproti skutečné hodnotě nižší než 1 %.
7. Teplotní koeficient odporu (α) - definuje změnu odporu v závislosti na změně teploty (citlivost snímače na změnu teploty).

1.7 Základní charakteristiky NTC a PTC termistorů

Tato část diplomové práce pojednává o základních charakteristikách NTC a PTC termistorů. První část se zabývá NTC charakteristikami a je dále rozdělena do tří podkapitol. U každé této podkapitoly je nastíněna daná charakteristika se stručným popisem.

1.7.1 R-T charakteristika NTC termistoru

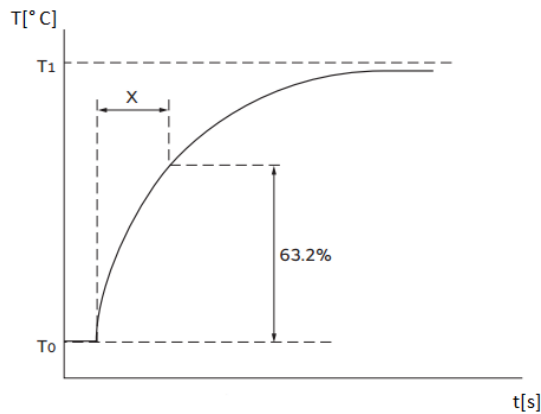
Tato charakteristika nám ukazuje vztah odporu součástky k teplotě pro dvě různé hodnoty materiálové konstanty β . Z grafu je patrné, že se zvyšující se teplotou součástky odpor klesá.



Obr. 1.9: R-T charakteristika NTC termistoru převzato z [12]

1.7.2 Teplotní časová konstanta NTC termistoru

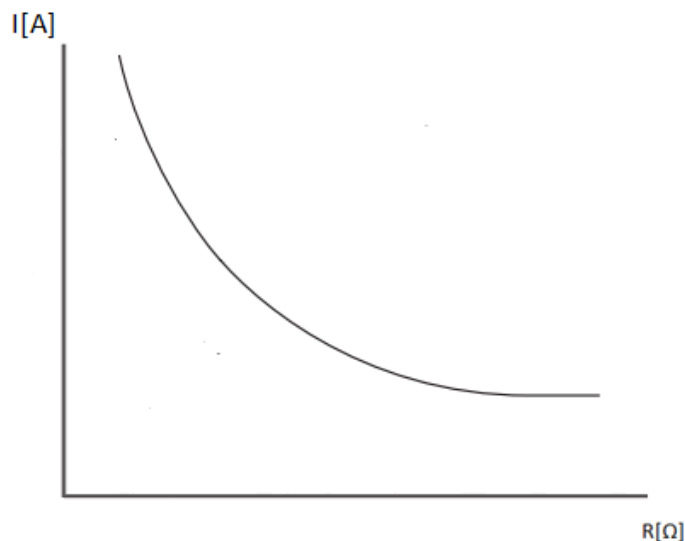
Tato konstanta vyjadřuje čas, za který se změni teplota termistoru vlivem výměny tepla s okolím o 63,2%. Platí v případě, že teplota prostředí byla skokově změněna.



Obr. 2.0 T-s charakteristika NTC termistoru převzato z [12]

1.7.3 I-R charakteristika NTC termistoru

Charakteristika nám ukazuje, že s rostoucím proudem odpor termistoru klesá. Důvodem je zvyšující se teplota materiálu, která vede k excitaci nových nosičů náboje, to znamená poklesu odporu a nárůstu proudu (viz kapitola PTC termistory) [13]

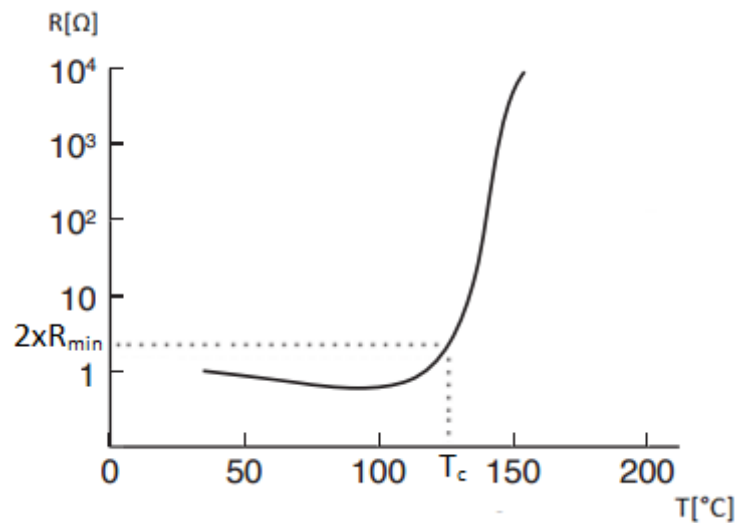


Obr. 2.1: I-R charakteristika NTC termistoru

1.7.4 R-T charakteristika PTC termistoru

Termistory PTC mají na rozdíl od NTC termistorů kladný teplotní koeficient. Jak je patrné z následující charakteristiky, PTC termistory vykazují nelineární závislost odporu na

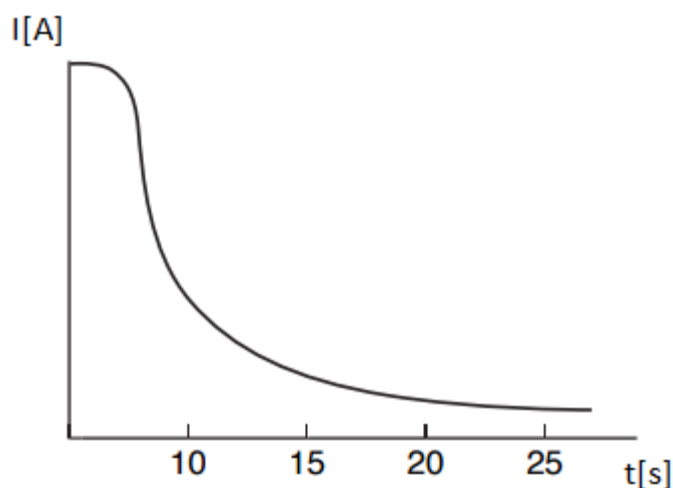
teplotě. Jejich odpor s rostoucím teplem nejprve mírně klesá, a po překročení Curieovy teploty strmě roste (T_c). [20]



Obr. 2.2: R-T charakteristika PTC termistoru

1.7.5 I-t charakteristika dynamické odezvy u PTC termistoru

Charakteristika dynamické odezvy nám ukazuje vztah mezi proudem a časem, za který dojde k rovnovážnému stavu mezi vnitřním oteplením termistoru a jeho následným odvodem tepla po přiložení napětí.

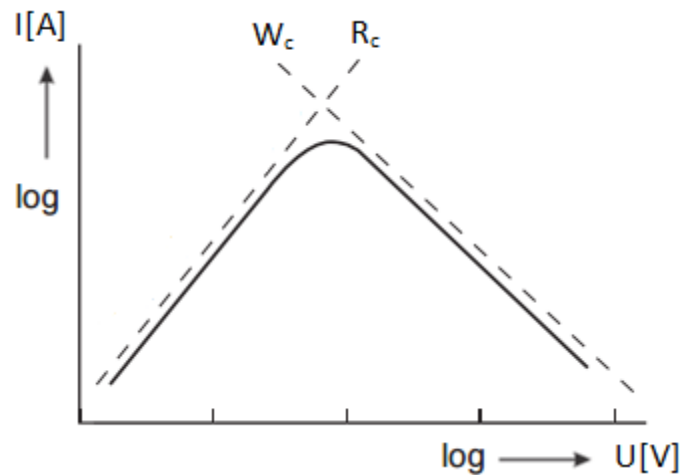


Obr. 2.3: I-t charakteristika PTC termistoru

1.7.6 I-V charakteristika PTC termistoru

Tato charakteristika popisuje vztah mezi přiloženým napětím a proudem. V případě, že se vnitřní samozahřívání termistoru rovná teplu, které termistor vyzařuje ven (rovnovážný stav), vykazuje charakteristika dvě konstantní oblasti. Odborovou oblast R_c a výkonovou oblast W_c .

Na průmětu těchto dvou oblastí poté nalezneme maximální možný proud, který může protékat termistorem. [20]



Obr. 2.4: I-U charakteristika PTC termistoru

1.8 Obecné možnosti kalibrace a jejich popis matematickými modely

Kalibrace je soubor úkonů, kterými se za specifikovaných podmínek stanoví vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím systémem, nebo měřicím přístrojem, nebo hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony (standards). Kalibrace termistorů se provádí v izolované nádobě, která poskytuje stabilní a nastavitelnou teplotu prostředí pro referenční teploměr a článek termistoru. Ten je připojen k multimetru a zaznamenává jeho odpor. Existují tři základní druhy kalibrace. Od výrobce, alternativní a podle aproximací. Ke kalibracím patří také popis matematických modelů kalibrací, kde nejpoužívanější je model Steinhartův. [6]

Kalibrace od výrobce:

Jak již bylo uváděno, termistory mají toleranci jmenovitých hodnot od 1% do 5%. Tato tolerance vyplývá v zásadě z kombinace tolerancí dílčích fází výrobního procesu a vlastností vstupních materiálů. Za předpokladu odladěné výroby, založené na statistické kontrole výrobních procesů, lze dosáhnout velmi malých tolerancí výsledných termistorů a omezit tak potřebu dodatečných kalibrací a trimování. Tento koncept deklaruje například společnost Vishay.

Alternativní kalibrace:

U tohoto druhu kalibrace je termistor kalibrován koncovým uživatelem. Tato metoda se využívá například pro kalibraci teplotních čidel, které jsou vloženy do termostatických lázní s vysokou přesností a stabilitou teploty, a to díky použití fluidních médií s vysokou tepelnou vodivostí. Výrobní náklady se poté odvíjejí od požadované přesnosti jednotlivých termistorů.

Kalibrace podle aproximací:

Poslední metoda kalibrace termistorů je založena na známých teplotních odezvách při jedné z několika známých aproximací (modelů) daných termistorů. [6]

1.8.1 Matematické modely kalibrací

Za předpokladu, že všechny charakteristiky matematického modelu jsou založeny na takzvaném “Odporu při nulovém výkonu“ (tento jev nastává při specifické teplotě, kdy je elektrický ztrátový výkon roven 0), nezpůsobuje elektrický proud procházející termistorem žádné zvýšení teploty, které by mohlo mít následný vliv na celkovou přesnost měření. Zvýšení statické teploty termistoru se vlivem sálání řídí podle vztahu:

$$\Delta T_H = r \frac{N^2 V^2}{S} \quad (1.8.1)$$

kde r je tepelný odpor k okolí, V je stejnosměrné napětí v průběhu měření odporu, S je odpor termistoru při naměřené teplotě a N je pracovní cyklus měření (např., $N=0,1$ znamená, že napětí působí na termistor pouze 10% času). Při měření stejnosměrným napětím se používá většinou $N=1$. Při použití termistoru ve skutečném zařízení musí být přesně stanovena jeho přenosová funkce (teplotní závislost odporu). Protože tato funkce je vysoce nelineární a obecně je specifická pro jednotlivé části zařízení, musí být popsána analytickou rovnicí, která spojuje teplotu, ale také odolnost. Pro tuto synergii bylo navrženo několik matematických modelů pro přenosovou funkci termistorů, avšak musíme mít na paměti, že každý model je pouze aproximací. Obecně se dá říci, že jednodušší modely bývají méně přesné, ale dají se lépe kalibrovat. Na druhou stranu modely, které bývají komplexnější a složitější, mají také náročnější kalibraci a v praxi se hůře využívají. [3,5]

1.8.2 Současné modely

Všechny současné modely jsou založeny na dvou skutečnostech. První skutečností je experimentálně stanovený logaritmus odporu termistoru (\mathbf{R}) a druhou skutečností je vztahování tohoto odporu k jeho absolutní teplotě \mathbf{T} prostřednictvím polynomu. Tento model poté můžeme popsat následující rovnicí:

$$\ln R = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3} \quad (1.8.2)$$

Z této základní rovnice byly poté navrženy tři výpočetní modely [6].

1.8.3 Prostý model

Tento model vykazuje úzký teplotní rozsah. Z toho důvodu jsou i přesně naměřená data mimo tento teplotní rozsah ztracena, a díky tomu lze poté odstranit dva poslední členy z rovnice (1.8.2) a vznikne nám rovnice:

$$\ln R \cong A + \frac{\beta_m}{T} \quad (1.8.3)$$

Kde A je konstanta a β_m je také konstanta, kterou nazýváme materiálová a je značena v Kelvinech. Pokud je odpor termistoru \mathbf{R}_0 kalibrován při známé teplotě \mathbf{T}_0 , pak je vztah závislosti odporu na teplotě vyjádřen jako:

$$R = R_0 e^{\beta_m \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1.8.4)$$

Výhodou tohoto modelu je potřeba kalibrace termistoru pouze na jednom místě, a to (S_0 a T_0). Nicméně tento výchozí stav je podmiňován předem známou hodnotou β_m . Při absenci této hodnoty se β_m vypočítá jako:

$$\beta_m = \frac{\ln \left(\frac{R_1}{R_0} \right)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1.8.5)$$

Kde T_0 a R_0 , T_1 a R_1 jsou dvě dvojice odpovídající teplotám dvou kalibračních bodů na křivce popsané rovnicí (1.8.4). Hodnota β_m je považována za nezávislou na teplotě, nicméně její hodnota může kolísat v rámci určitého rozmezí, které obvykle bývá $\pm 1\%$. Teplota termistoru může být vypočtena z jejího naměřeného odporu R jako:

$$T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{\beta_m} \right)^{-1} \quad (1.8.6)$$

Tato rovnice poskytuje chybu aproximace, která je malá v blízkosti teploty, při níž se termistor kalibruje, ale výrazně zvyšuje pracovní rozsah, při kterém termistor pracuje. Beta určuje v tomto grafu zakřivení termistorové charakteristiky, avšak přímo neurčuje citlivost, která je v tomto případě dána negativním teplotním koeficientem α . Tento teplotní koeficient se poté vypočítá jako derivace rovnice (1.8.4):

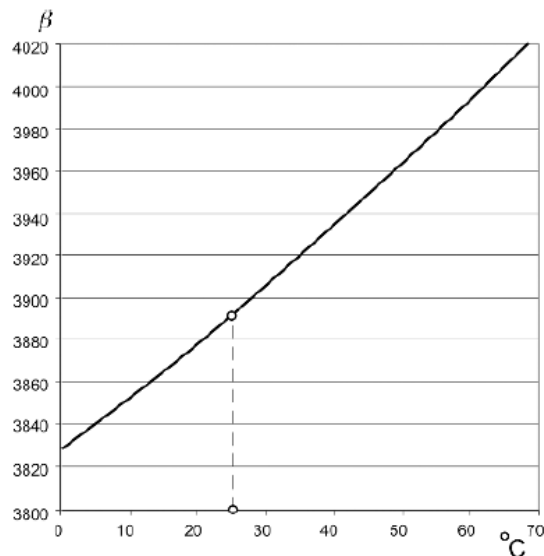
$$\alpha_r = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{\beta}{T^2} \quad (1.8.7)$$

Z této rovnice vyplývá, že citlivost závisí jednak na β , ale také na teplotě. Dále je zde patrné, že termistor je mnohem citlivější při nižších teplotách a jeho citlivost klesá se zvyšující se teplotou. [5]

1.8.4 Frádenův model

V roce 1998 navrhuje Fraden další zlepšení „Prostého modelu“. Toto zlepšení je založeno na experimentálních pokusech, kde teplotní charakteristika β není konstantní, ale spíše funkcí teploty, viz graf „Hodnota β mění se s teplotou“. V závislosti na výrobci a jednotlivých typech termistoru zde mohou být funkce, které mají buď stoupající, nebo klesající charakter, kde se v ideálním případě β nemění s teplotou. V ojedinělých případech, kdy tomu tak není, poskytuje Prostý model velmi přesný základ pro výpočet teploty. Z rovnic (1.8.3) a (1.8.4), aproximujeme β jako:

$$\beta = A_1 + BT + \frac{A_2}{T} + \frac{A_3}{T^2} \quad (1.8.8)$$

Obr. 2.5: Hodnota β měnící se s teplotou, převzato z [5]

kde A a B jsou konstanty. Při pohledu na tuto rovnici můžeme vidět, že při porovnání s prvním a druhým vyjde třetí a čtvrtý sčítanec velmi malý, a proto z praktického hlediska můžeme tyto dva sčítance odstranit. Po tomto odstranění můžeme následující zkrácenou rovnici zapsat jako:

$$\beta = A_1 + BT \quad (1.8.9)$$

S ohledem na β , jakožto lineární funkci teploty, může být Prostý model díky tomu zdokonalen a zpřesněn. Vzhledem k tomu, že z praktických důvodů již není β konstantou, měla by být její lineární funkce definována pomocí alespoň jednoho pevného bodu v určité teplotě T_b a sklonu γ . Po definování tohoto bodu lze poté přepsat rovnici (1.6.9) jako:

$$\beta = \beta_b [1 + \gamma(T - T_b)] \quad (1.8.10)$$

kdy β_b je přidělena teplota T_b a koeficient γ je normalizovaná změna β na jeden stupeň Celsia:

$$\gamma = \left(\frac{\beta_x}{\beta_y} - 1 \right) \frac{1}{T_c - T_a} \quad (1.8.11)$$

kde β_x a β_y jsou teplotní charakteristiky materiálů na dvou charakteristických teplotách, a sice T_a a T_c . Pro stanovení γ , je potřeba tří bodů v charakteristice (T_a , T_c a T_b), avšak hodnota

γ nemusí být charakterizována pro každý termistor. Protože tato hodnota závisí na daném typu materiálu termistoru a výrobním procesu, může být považována více či méně za konstantu pro sériovou výrobu konkrétního typu termistoru. Metoda pro toto zjednodušení spočívá v nalezení vhodné gamy pro výrobní typ termistoru. Díky tomuto kroku se vyvarujeme hledání vhodné gamy pro jednotlivé typy čidel. Poté, co dosadíme rovnici (1.8.9) do rovnice (1.8.2), dospějeme k modelu termistoru:

$$\ln R \cong A + \frac{\beta_m [1 - \gamma(T_b - T)]}{T} \quad (1.8.12)$$

Po vyřešení této rovnice pro výpočet odporu \mathbf{R} , získáme rovnici, z které vyplývá, že odpor termistoru je funkcí jeho teploty:

$$R = R_0 e^{\beta_m [1 + \gamma(T - T_0)] \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1.8.13)$$

Kde \mathbf{S}_0 je odpor a při kalibraci teploty \mathbf{T}_0 a β_m je charakteristická teplota stanovena pro teploty \mathbf{T}_0 a \mathbf{T}_1 z rovnice (1.8.5). Tento model je velmi podobný Prostému modelu, který vycházel z rovnice (1.8.4). Poté, co do této rovnice (1.8.4) je zavedena konstanta gama, vyžaduje model pro její určení tři body (\mathbf{T}_a , \mathbf{T}_c a \mathbf{T}_b). Dále je potřeba kalibrace na dvou místech pro jednotlivé typy termistoru. Tento Fradenův model je vysoce využíván zejména u takzvané “low-cost” elektroniky, kde je požadována vysoká přesnost. [6]

1.8.5 Steinhart-Hartův model

Roku 1968 byl navržen tento model, který původně sloužil jako model pro oceánografické účely a měl rozmezí od -3 °C do 30 °C. Ve skutečnosti má tento model daleko rozsáhlejší využití, než bylo původně plánováno. Tento model vychází z rovnice (1.8.2), ze které může být vypočtena teplota jako:

$$T = [A + B \ln R + C (\ln R)^2 + D (\ln R)^3]^{-1} \quad (1.8.13)$$

Steinhart-Hart poukázal na to, že může být ze vztahu 1.6.13 vypuštěn kvadratický člen, aniž by došlo ke ztrátě na přesnosti. To znamená, že se konečná rovnice jeví jako:

$$T = [A + B \ln R + D(\ln R)^3]^{-1} \quad (1.8.14)$$

Při správném použití této rovnice můžeme dosáhnout přesnosti v řádech tisíce stupňů, a to v rozmezí 0 °C až 70 °C. Díky svým velice úzkým aproximacím se tento model stal průmyslovým standardem při kalibraci termistorů na velmi přesné hodnoty. Tento model se vyznačuje také tím, že ani na široké škále teplot nepřesahuje chyba aproximace nejistotu měření. [5,6,9]

1.8.6 Zhodnocení matematických modelů

Praktická volba vhodného modelu závisí na požadované přesnosti, ale také na omezení v podobě nákladů. Náklady jsou ovlivněny zejména počtem bodů, ve kterých se musí snímač kalibrovat. Tyto bodové kalibrace bývají velmi náročné a zdlouhavé, a proto se také mohou znatelně podepsat na ceně. Matematické výpočty nám obstarají výkonné mikroprocesory, a proto tento čas můžeme zanedbat. Při výběru vhodného modelu musíme zvážit určitá kritéria, kterými jsou například přesnost, cena či teplotní rozsah. Prostý model se jeví jako nejméně finančně náročný a využívá se na místech, kde není nutná vysoká přesnost a teplotní rozsah je velmi úzký ($\pm 5-10$ °C od kalibrační teploty). Fradenův model se naopak liší od Prostého modelu svou vyšší přesností. Model Steinhart-Hartův se využívá na místech, kde je požadována nejvyšší přesnost a cena není hlavním limitujícím faktorem.

Chceme-li použít Prostý model, musíme znát hodnotu β_m , odpor termistoru R_0 a kalibrační teplotu T_0 . Chceme-li použít Fradenův model, je třeba znát hodnotu γ , která není přímo vyhrazena pro jednotlivé termistory, ale pouze pro určité typy. Při použití posledního modelu Steinhart-Harta je nezbytné znát tři odpory při třech kalibračních teplotách. U všech tří modelů je nutné provést sérii výpočtů, pokud jsou rovnice počítány přímo. Avšak v praxi se setkáváme spíše s možností substituováním těchto rovnic, které se dají vyhledat většinou v tabulkách. [6]

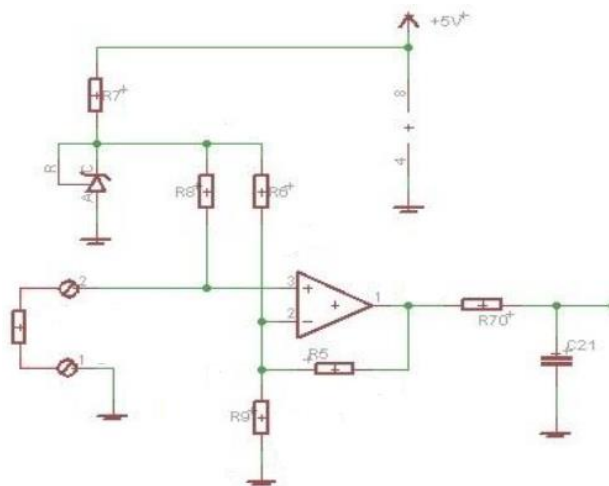
1.9 Metody měření

Při samotném zapojení termistoru do obvodu musíme dbát na několik požadavků, které bychom měli dodržet, aby byla měření přesná. Největší důraz je samozřejmě kladen na co nejmenší klidový proud, který protéká termistorem. Je-li klidový proud příliš velký, termistor by se mohl začít sám ohřívat, a tím celé měření znehodnocovat. Velikost dovoleného

klidového proudu je u každého typu senzoru odlišná a záleží hlavně na jmenovitém klidovém odporu senzoru. Při velké hodnotě odporu je logické, že klidový proud bude nižší. Dalším důležitým požadavkem je velikost odporu přívodních vodičů, která musí být co nejmenší. V případě použití velmi krátkých přívodních vodičů s dostatečným průřezem můžeme tento odpor zanedbat. Chceme-li táhnout vodiče na největší vzdálenost, musíme odpor přívodních vodičů změřit a následně ho odečíst od celkového odporu.

1.9.1 Měření pomocí Wheastnoeova můstku

Při použití této metody je vhodné zapojit Wheastnoeonův můstek s operačním zesilovačem. Aby tímto můstkem tekla malý klidový proud, musí být vyvážen vhodnou volbou okolních rezistorů k termistoru. Nicméně tato metoda je spíše zastaralá a dnes se již téměř neměří termistory na HW úrovni. [14]



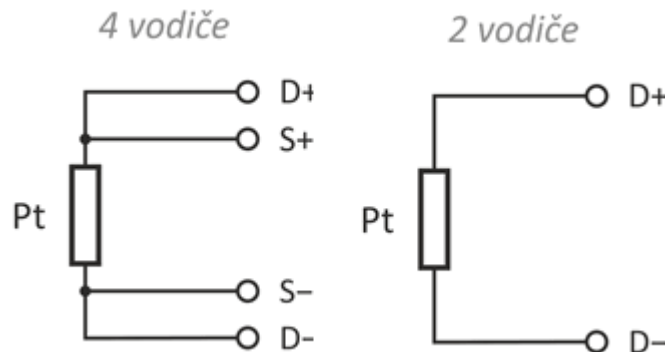
Obr. 2.6: Zapojení termistoru do Wheatsonova můstku převzato z [14]

1.9.2 Měření pomocí digitálního multimetru

Zde dochází k přímé metodě měření odporu, která spočívá pouze v odečtení dané hodnoty z obrazovky digitálního multimetru. Existují dva typy zapojení, a sice 2-vodičové a 4-vodičové.

Mezi 2-vodičovým a 4-vodičovým zapojením existuje hlavní rozdíl. Zatímco u 2-vodičového zapojení je napájení a přenos signálu veden po stejném sadě vodičů, u 4-vodičového zapojení je vedena samostatná sada vodičů pro napájení a samostatná sada vodičů pro přenos signálu. Výhodou dvouvodičového zapojení je polovina drátového vedení, avšak nevýhodou je poměrně nízká impedanční schopnost vedení, která může omezovat počty

připojených zařízení. Výhodou čtyřvodičové zapojení je vyšší impedance na straně signálu a samotný fakt, že jsou odděleny svorky pro napájení a přenos signálu. To má za následek menší zkreslení výsledku, avšak nevýhodou je skutečnost, že je nutné využít více vodičů. [23]



Obr. 2.7: Příklad 4 vodičového a 2 vodičového připojení senzoru Pt převzato z [24]

1.9.3 Měření a určení klíčových parametrů termistorů

Měření $R(T)$ charakteristiky NTC termistoru

Při konstrukci $R(T)$ a měření charakteristiky NTC termistoru se postupuje následujícím způsobem. V prvním kroku je zapotřebí změřit 3 hodnoty odporu při třech různých teplotách. Pro dosažení nejpřesnější charakteristiky je zapotřebí určit dva body blízké se k extrému v provozním rozsahu. Třetí bod by se měl nacházet v blízkosti středu. V druhém kroku je zapotřebí určit tři konstanty z Steinhartova modelu (A, B, C), které se získají výpočtem rovnice, do které jsou zaneseny předchozí body z měření. Následně je potřeba vypočítat β (materiálová konstanta), která je počítána při jmenovité hodnotě odporu R_{25} a využívá vstupní data dvou bodů, které se blíží extrému v provozním rozsahu. [35]

Měření $R(T)$ charakteristiky PTC termistoru

$R(T)$ charakteristika se skládá ze dvou částí. V první části je měřen odpor termistoru za podmínky nulového zaohřívání, kde je následně potřeba změřit i Curiova teplota (T_c), při které se odpor termistoru začne rychle zvyšovat. To se provádí zvětováním napětí na termistoru, při které se začíná zvyšovat i teplota samoohřevu na termistoru. Po přiblížení a následném překonání Curiovy teploty začne proud termistorem rapidně klesat a hodnota odporu začne zřetelně stoupat. V další části je poté možné změřit 2 body při dvou různých teplotách a hodnotách odporu a spočítat teplotní citlivost α termistoru. [25,37]

Měření I(t) charakteristiky PTC termistoru

Charakteristika nám ukazuje vztah mezi proudem a časem, za který dojde k rovnovážnému stavu mezi vnitřním oteplením termistoru a jeho následným odvodem tepla. Poté, co je přiloženo napětí na PTC termistor, je oslaben vliv proudu, kde na začátku charakteristiky protéká termistorem poměrně velký proud v řádu ampér. Vlivem stoupajícího napětí začíná proud termistorem klesat až na minimální úroveň, kde poté zůstává konstantní. Využití tohoto jevu nalezneme například v demagnetizačních obvodech barevné televize, spouštěcích motorů nebo u teplotních spínačů, které chrání překročení mezních teplot. [37]

Měření I(V) charakteristiky PTC termistoru

Toto měření se provádí při zvyšujícím se napětí na termistoru, kde se stoupajícím napětím stoupá i teplota termistoru. Při dosažení Curiovy teploty nastane negativní charakter proudu (se zvyšujícím se napětím klesá proud). [37]

Určení parametru β [36]

Tento parametr se stanoví pomocí Steinhartovi metody, kde je zapotřebí znát konstanty A, B, C. Tyto parametry jsou většinou dodávány přímo výrobcem termistorů. V případě, že dodány nejsou, je zapotřebí spočítat je ručně a odvodit pomocí tří rovnic:

$$\frac{1}{T_1} = A + B(\ln R_1) + C(\ln R_1)^3 \quad (1.9.15)$$

$$\frac{1}{T_2} = A + B(\ln R_2) + C(\ln R_2)^3 \quad (1.9.16)$$

$$\frac{1}{T_3} = A + B(\ln R_3) + C(\ln R_3)^3 \quad (1.9.17)$$

Po výpočtu těchto konstant můžeme vypočítat parametr β , který je definován jako:

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{B}{3C}\right)^3 + \left(\frac{\alpha^2}{4}\right)} \quad (1.9.18)$$

Určení teplotní citlivosti α , odporu R a teploty T u termistoru NTC [36,43]

Odpor a teplota NTC termistoru se poté vypočítá ze Steinhartovy rovnice jako:

$$R(T) = e^{[(\beta - \frac{\alpha}{2})^2 - (\beta + \frac{\alpha}{2})^3]} [\Omega] \quad (1.9.19)$$

Kde alfu lze vyjádřit jako:

$$\alpha = (A - \frac{1}{C}) \quad (1.9.20)$$

A poté lze odpor vypočítat jako:

$$T = [A + B \ln R + D (\ln R)^3]^{-1} \quad (1.9.11)$$

2 Tištěné flexibilní elektronika

Tato druhá část diplomové práce shrnuje konvenční flexibilní elektroniku, která je založena na polyamidové bázi. Dále progresivnější flexibilní elektroniku, která používá ke své tvorbě například depoziční, tenkovrstvé a tlustovrstvé technologie nebo také nízkoteplotní organické substráty. V další části této kapitoly jsou základní informace o tištěné elektronice a jejím provedení.

2.1 Konvenční flexibilní elektronika

V pojmu konvenční flexibilní elektronika je ukryto široké spektrum aplikací, ale také samotná technologie výroby (reprezentovanou zejména flexibilními deskami plošných spojů na bázi polyimidu). Příkladem flexibilní elektroniky jsou flexibilní dipleje, flexibilní solární panely, či tištěné RFID. Samotná technologie spočívá v montáži elektronických obvodů při výrobě elektronických přístrojů, které jsou umístěny na pružné plastové substrát. Těmito substráty mohou být různé směsi polyamidů nebo transparentních vodivých polyesterových filmů. [15,16]

2.1.1 Aplikace konvenční flexibilní elektroniky

Jak již bylo zmíněno, konvenční flexibilní elektronika je založena spíše na bázi polyamidů. Polyamid je výhodný materiál pro aplikace, které vyžadují vysoký stupeň rozměrové a teplotní stability (až do 300 °C). Kromě této skutečnosti je také vysoce odolný proti

chemikáliím, dále je pružný a lehký. Díky všem těmto vlastnostem je polyamid převážně využíván u konvenční flexibilní elektroniky, která je zprostředkovávána převážně sítotiskem.

Aplikaci flexibilní elektroniky nalezneme například v počítačové klávesnici, kde se využívá ohebných obvodů při spínání matice. Dále se flexibilní elektronika využívá například v LCD výrobě, kde samotné sklo může sloužit jako tenký flexibilní substrát. Další využití flexibilní elektroniky můžeme nalézt například v pasivních kabelážových strukturách, kde se samotné flexibilní obvody využívají k propojení elektronických součástí, kterými mohou být například integrované obvody, odpory nebo kondenzátory. Dalším odvětvím, kde nalezneme uplatnění, je automobilový průmysl, kde jsou flexibilní obvody využívány v přístrojových deskách nebo ovládacích prvcích jako je například ABS. V neposlední řadě stojí za zmínku využití flexibilní elektroniky například v průmyslu, lékařství, mobilních telefonech či v zapisovací hlavě diskové jednotky. [15,21]

2.2 Progresivní flexibilní elektronika

Na rozdíl od konvenčního způsobu výroby u flexibilní elektroniky, jsou pro progresivnější odvětví flexibilní elektroniky vyžadovány složitější technologie výroby a je upuštěno od klasických materiálů typu polyamid. U progresivnější flexibilní elektroniky se převážně využívá amorfního křemíku, který je využit například v OLED televizorech nebo se také využívá polykrystalický křemík, který nalezneme například v tenkovrstvých tranzistorech (TFT). Dále se využívají směsi polymerů jako například PC (polycarbon), nebo PET (polyetylentereftalát) v nízkoteplotních organických substrátech, kde se teplota pohybuje okolo 40 °C až 70 °C. Také se pracuje s tenkými vrstvami oxidů (SiO_2 , SnO_2 , V_2O_5), které se nanášejí právě na tyto nízkoteplotní organické substráty. [22,26]

2.2.1 Tenkovrstvá technologie

Tato technologie spočívá v napařování (vakuové) odporové vrstvy na keramický základ. To poté vytvoří kovové filmy (většinou se jedná o slitiny niklu a chromu) o velikosti 0,1 mikrometrů. Tato technologie umožňuje vyrábět různé tloušťky jednotlivých vrstev, a přizpůsobit se tak tím rozsahům hodnot jednotlivých odporů. Pro kalibraci nebo zvýšení odporové cesty se využívá u této technologie například fotoleptání nebo laserové řezání. Substrát u tenkovrstvé technologie bývá obvykle na bázi oxidu hlinitého (keramika), křemíku nebo skla. Samotná tenká vrstva je poté ve formě fólie, nebo se také vyrábí jako čip či smd

odpor. Typické využití této technologie nalezneme například ve zdravotnických nebo audio zařízeních. [27]

2.3 Tištěná elektronika

Jedná se o zhotovení obvodu pomocí inkoustů, které mohou být vodivé, polovodičové, rezistivní, dielektrické nebo elektroizolační za použití široké škály tiskařských technik. Tyto inkousty jsou komponenty, které jsou obvykle ve formě nanočástic v nosiči, který je přizpůsoben formě tisku. [17]

2.3.1 Provedení tištěné elektroniky

Tištěná elektronika je sada tiskařských metod a dalších technologických postupů, které dohromady slouží k realizaci elektronických prvků. K tištění elektroniky se obvykle používají běžná tisková zařízení, která slouží k definování a tvorbě samotného vzoru. Příkladem může být sítotisk, flexotisk, hlubokotisk, ofsetová litografie nebo také inkoustové tiskárny, jejichž pomocí jsou nanášeny funkční, elektrické nebo optické inkousty. Ty jsou následně deponovány na substrát, přičemž se vytváří na daném substrátu aktivní nebo také pasivní zařízení (tenkovrstvé tranzistory, cívky, odpory).

Pojem tištěná elektronika je často spojován s organickou elektronikou, ve které je jedna či více složek inkoustu založena na bázi uhlíku (organické polovodiče, nanočástice, nanotrubičky). [18]

Nejdůležitějším přínosem tisku je nízkonákladová objemová výroba. Nižší ceny nám umožňují využít například RFID systém, který slouží k bezkontaktní identifikaci, například v obchodech či dopravě. Dále může být zhotoven tisk na pružný podklad, čehož se dá využít například u solárních článků na střeše vozidla. [18,19]

2.4 Tištěné termistory

Tato kapitola pojednává o technologiích deponic tenkých a tlustých vrstev tištěných termistorů. Nejprve je zde vysvětlen sítotisk (tato technologie je využita i při výrobě tištěných termistorů k mé práci). Následně je zde představena a popsána technologie deponice tlustých vrstev, které se využívají u tištěných senzorů na flexibilních substrátech. Předposlední kapitola obsahuje tištěné termistory na keramické substráty. Tato část byla získána z

patentových listin výrobců. Poslední část práce se zabývá problematikou tištěných teplotních senzorů na křemíkové bázi, jejichž substrát je tvořen flexibilním materiálem.

2.4.1 Sítotisk

Depozice u těchto typů termistorů je realizována technologií zvanou sítotisk. Tento typ depozice tlustovrstvých past je nejrozšířenějším typem depozic v oblasti nanášení tlustých vrstev na substrát. Princip samotného sítotisku spočívá v protlačení viskózní pasty přes síto, na kterém je fotoprocесem vytvořen požadovaný motiv vrstvy. Síta jsou napnuta v kovovém rámečku a umístěna v určité vzdálenosti od substrátu. Vzdálenost síta od substrátu je možné měnit pomocí nastavitelného držáku. Tuto vzdálenost nazýváme odtrh. Velikost tohoto odtrhu se pohybuje od 0,25mm – 1 mm. Výška samotné natištěné vrstvy je poté dána tloušťkou síta spolu s velikostí apertur, tzn. objemem natištěného materiálu a jeho viskozitou, která dále v kombinaci s povrchovým napětím a porozitou substrátu ovlivňuje roztékavost.

Poté, co je síto upevněno a je nastavena základna se substrátem, přichází na řadu nanášení pasty. Pasta je pomocí stěrky protlačována skrz oka sítky na daný substrát, kde po přesunu stěrky z místa tlaku dochází k opětovnému návratu síťoviny do původní odskokové vzdálenosti. [38]

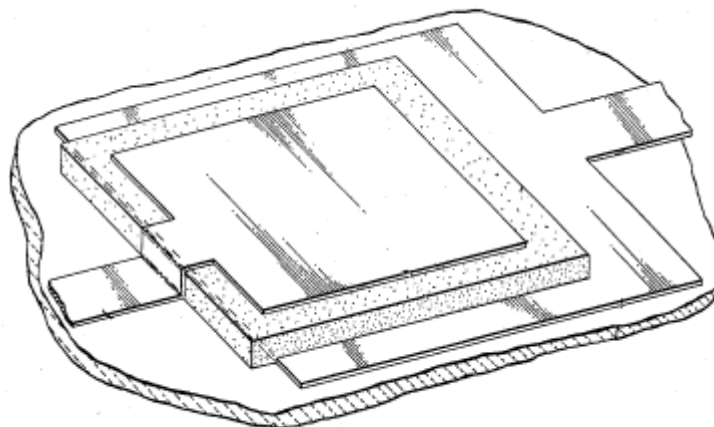
Síta pro tuto depozici jsou vyrobena z nerezové oceli nebo polyesterové síťoviny. Výhoda nerezové oceli oproti polyesterové síťovině je nejen v její rozměrové stabilitě, ale také ve větší světlosti (lepší průchod pasty). Naopak mezi výhody polyesterové síťoviny oproti oceli patří její větší odolost a menší náchylnost k poškození. Aby depozice proběhla úspěšně a podle představ, je zapotřebí splnit kritéria z hlediska tištění motivu a výběru síta, kterými jsou například:

1. Velikost oka – tato velikost by měla být třikrát větší než velikost částice použité v pastě,
2. Tloušťka vytisknutého motivu – tloušťka tohoto motivu by se měla přibližně rovnat tloušťce oka vynásobeného procentuální světlostí síta,
3. Průměr vlákna – průměr vlákna v sítu by neměl být větší než 1/3 šířky nejužšího tištěného obrazu,
4. Šířka vytisknutých vodičů – šířka vytištěných vodičů a rozměry vytisknutých součástek musí souhlasit s motivem. [39]

2.4.2 Tištěné termistory na keramický substrát

Tyto termistory se provádí tištěním vodivé pasty. Většinou jde o směsi paládium-stříbro (zlato, platina) na substrát složený z oxidu hlinitého. Tento film má potom velikost od 15 μ do 20 μ . Tato vodivá fólie se poté vysuší a vypálí při teplotě okolo 760 °C. Do těchto druhů termistorů se také přidává sklo, a to buď ve formě rozdrčeného prášku nebo komerčně dostupných skleněných past. Sklo v termistoru má funkci jakéhosi spojovače materiálu a také nám přispívá k dostatečné odolnosti proti otěrům. Důležitá je však koncentrace skla v termistoru, kde koncentrace nižší než 20% hmotnosti termistoru nespokytuje dostatečnou pevnost spoje a odolost proti otěrům. Naopak koncentrace vyšší než 60% přispívá ke křehnutí samotného termistoru. Takto vysoká koncentrace může způsobovat vznik trhlin nebo popraskání (v praxi se využívá borokřemičitá skleněná pasta). Jako pojivo se v tomto typu tištěného termistoru používá ethyl celulózy. Rozpouštědla a nosiče jsou zastoupeny diethylenglykolem monobutyletherem.

Sestava celého termistoru se tedy skládá z izolačního substrátu, který obsahuje první vodivý film, který má vývody pro připojení na elektrický obvod. Druhá vodivá vrstva je taktéž tištěna na izolační substrát a je izolována od prvního vodivého filmu. Tento film se skládá z oxidů dvou nebo více kovů, kterými jsou oxidy manganické, železité, oxidy chromu nebo kobaltu, kde má podstatně menší velikost a do značné míry ovlivňuje celkový odpor termistoru. Následně dochází k vysušení nanesených vrstev, a v poslední fázi dochází k již zmíněnému výpalu při teplotách okolo 760 °C. [40]



Obr. 2.8 : Tištěný termistor na keramický substrát

2.4.3 Tištěné termistory na flexibilní substrát

Zhotovení celého tištěného termistoru probíhá v šesti krocích. Nejprve dochází k depozici vodivých kontaktů na substrát, kde následně probíhá jejich popouštění (kontakty mohou být vyrobeny například ze stříbra). Následně dochází k tištění termistorové směsi na kontakty a její následné vypálení. Poté dochází k natištění vrchní části kontaktů, a v posledním kroku dochází k zapouzdření celé termistorové struktury.

Materiál, který se využívá u tištěných termistorů na flexibilní substráty, je například oxid vanadičný ve formě prášku, který se dále rozemele, aby přibližná velikost částic byla 1 až 10 mikronů. Dále je potřeba tisknutelná pájka ve formě pájecího inkoustu, která se skládá z eutektické směsi inda a cínu v kombinaci s pojivem, jako je například kalafuna. Tato se směs se smíchá s oxidem vanadičným (V_2O_5) v poměru 2:1 InSn: V_2O_5 . Dále je potřeba přidání limonenu (cyklický terpen). Ten se přidává z důvodu snížení vizkozity inkoustu. Směs je poté nanášena pomocí sítotisku na fólii o tloušťce 100μ , kde jsou již vytvořené stříbrné kontakty. Substrát se stříbrnými vývody a směsí je poté zahříván na $150\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 10-15 minut, aby došlo k vysušení a vyžihání tištěného termistorového inkoustu. Substrát je poté zapouzdřen například laminováním pomocí flexibilní kovové fólie nad a kolem termistoru. Takto zhotovené tištěné termistory se nechávají 2 týdny při pokojové teplotě stárnout a měří se jejich odpory, zda nedochází ke kolísání. Výsledkem jsou termistory, které jsou schopny pracovat s vysokou přeností i po nepřetržitém provozu. Také mohou být vyráběny levně ve velkých objemech za použití právě tiskových technologií. [42]

3 Charakterizace tištěných termistorů

V praktické části nalezneme stěžejními body této diplomové práce. Je zde nejprve **popsána technologie výroby tištěných termistorů pro samotné měření, konstrukce termistorů a použité materiály**. Další část se zabývá metodikou, jež byla použita pro charakterizaci tištěných termistorů. Dále tato část se zabývá měřicí metodou, která zde byla použita a následně je vysvětlen samotný postup měření včetně statistické charakterizace vzorků, kde tato část byla rozdělena na analýzu hysteréze a analytické vyjádření teplotní závislosti. Závěr práce je věnován diskuzi k metodě kalibrace senzorů pro výrobu a celkovému výsledku celého měření.

3.1 Materiály a technologie výroby tištěných termistorů v poloprovozních podmínkách

Výroba tištěných termistorů v poloprovozních podmínkách byla realizována v rámci kooperativního projektu ve spolupráci Katedry polygrafie a fotofyziky na Univerzitě Pardubice (KPF UPce) a polygrafického výrobního podniku OTK Group. Tištěné termistory se sestávaly z interdigitálního elektrodového (IDE) systému, který byl tištěn na produkčním tiskovém stroji Gallus EM 430 S (společnost OTK Group) za pomoci tiskové formulace na bázi Ag kompozitní pasty. Jako tiskový substrát byla použita flexibilní PET fólie o tloušťce 175 μm . Tisk probíhal kontinuálně při tiskové rychlosti 20 m/min. Celkem bylo natištěno několik tisíc tiskových motivů s IDE systémy. Potištěná role byla následně dělena na individuální archy s velikostí 457,2 x 310 mm. Archy byly následně umístěny do horkovzdušné sušárny Memmert na dobu 60 minut teplotě při 90 °C, aby došlo ke slinutí (sintrování) stříbrných částic a stabilizaci elektrických vlastností elektrodových struktur. Nedefektní IDE systémy vybrané na základě vizuální kontroly kvality byly potištěny tepelně citlivou vrstvou s NTC odporovou charakteristikou na tiskovém stroji EKRA E1 pomocí tiskové formulace s kódovým označením UPCE_2017_03_12_2.

Tištěné termistorové elementy byly připraveny ve třech konfiguracích s cílem ověřit vliv dvou typů ochranných krycích vrstev na výsledné senzoričké charakteristiky. První skupinu představovaly senzory bez krycí ochranné vrstvy s označením TERM_030, TERM_031, TERM_044 a TERM_045. Další skupina senzorů TERM_36, TERM_37, TERM_38, TERM_40 a TERM_44 byla na sítotiskovém stroji Ekra E1 přetištěna krycí sítotiskovou formulací s hydrofobním charakterem (UPCE_2017_03_12_3). Tisk tohoto ochranného laku byl realizován přes síťovinu s hustotou 120 vláken/cm a následné sušení bylo provedeno při teplotě 120 °C po dobu 15 minut. Třetí skupina senzorů TERM_51 byla přetištěna krycí sítotiskovou formulací, která oproti druhé skupině byla modifikována stříbrným pigmentem (UPCE_2017_03_12_3). Tento materiál opět vykazoval hydrofobní charakter. Tisk ochranného laku byl stejně jako v předchozím případě realizován přes síťovinu s hustotou 120 vláken/cm a sušení bylo provedeno při 120 °C po dobu 15 minut.

Tabulka 1 : Poskytnuté sady termistorů pro měření

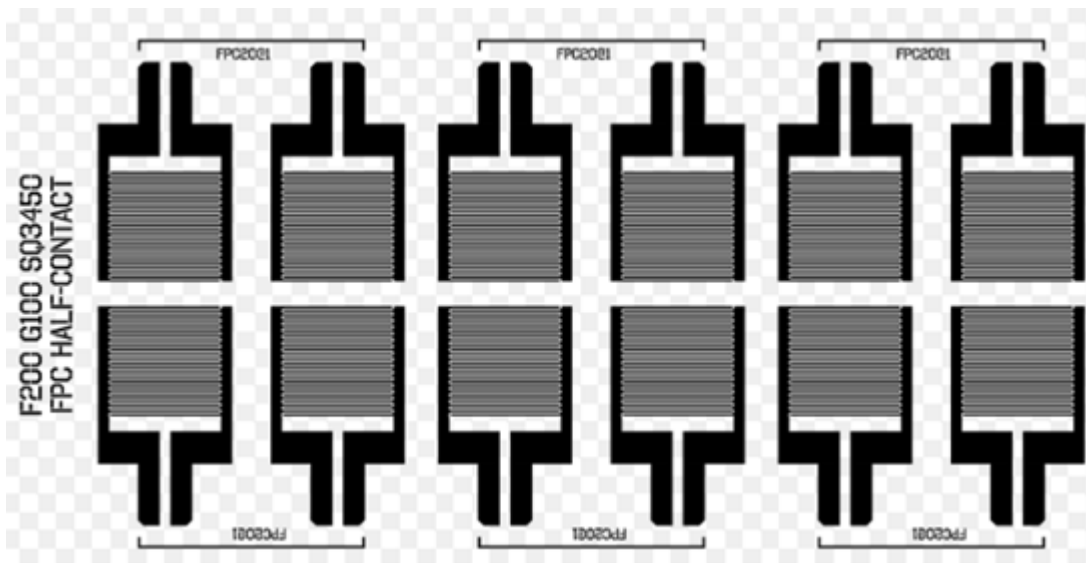
Název sady	Počet čtverců	Tloušťka fólie	Typ sady	Počet vzorků	Krycí vrstva
TERM_030	3450	175 um	A,B	10	Žádná
TERM_031	3450	175 um	A,B	12	Žádná
TERM_44	3450	175 um	A,B	16	Žádná
TERM_45	3450	175 um	A,B	8	Žádná
TERM_36	3450	175 um	A,B	12	Transparentní lak
TERM_37	3450	175 um	A,B	16	Transparentní lak
TERM_38	3450	175 um	A,B	16	Transparentní lak
TERM_40	3450	175 um	A,B	12	Transparentní lak
TERM_41	3450	175 um	A,B	12	Transparentní lak
TERM_51	3450	175 um	A,B	8	Transparentní lak s příměsí Ag pigmentu

Příprava senzorických a ochranných vrstev byla realizována na KPF UPce. K tisku byly použity speciální tiskové formulace vyvinuté na tomto pracovišti, jejichž složení s ohledem na následnou průmyslovou realizaci není možné zveřejnit.

3.2 Metodika charakterizace tištěných termistorů

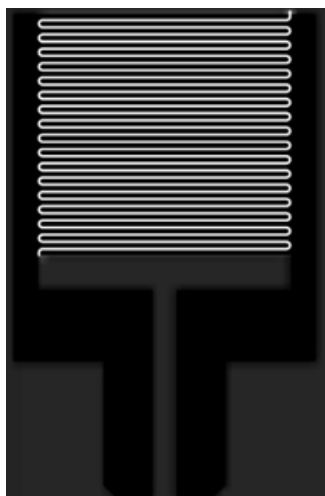
Metodika spočívá v rozdělení tištěných vzorků do tří základních sad (viz výše) dle konfigurace. Tyto tři základní skupiny byly následně děleny na dvě podsady a sice skupiny A a B, jejichž konstrukce se lišila pouze ve vodivosti přívodních elektrod, jejíž vliv je v tomto měření minoritní. Počet vytištěných čtverců byl 3450 viz tabulka 1 (jedná se o poměr efektivní šířky izolační mezery v IDE strukturře (W) vůči délce mezery (L)). Zjednodušeně řečeno tento geometrický poměr označujeme jako počet čtverců v kanálu IDE. Elektrický

odpor senzoru je nepřímo úměrný tomuto poměru, tzn. s rostoucím počtem čtverců vzrůstá elektrický odpor.



Obr. 2.9: Tištěné flexibilní termistory rozdělené podle počtu tištěných čtverců

Zde na obrázku 3.0 je již detailní struktura termistoru pro 3450 čtverců A a B.



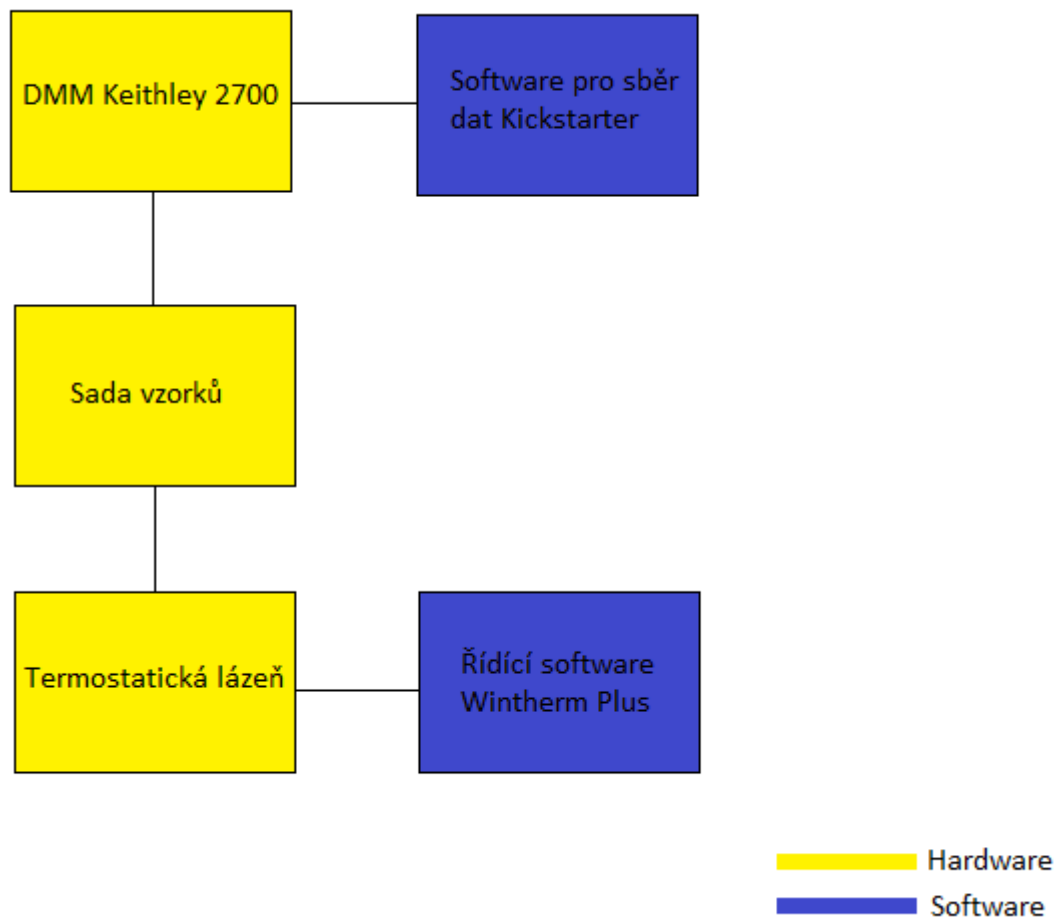
Obr. 3.0: Detailní vnitřní struktura tištěného termistoru

Na obrázku 3.1 je již reálná podoba tištěných vzorků samotných termistorů.



Obr 3.1: Vzorek tištěných termistorů

Poté, co proběhlo prvotní rozřazení vzorků, je nyní zapotřebí zhotovit funkční zapojení pro charakterizaci termistorů. To se skládá z několika hlavních částí. První částí je termostatická lázeň, která je řízena řízená vnějším notebookem s příslušným softwarem. Další částí jsou samotné termistory, které jsou připojeny pomocí dvou multiplexových karet do digitálního multimetru a poslední částí je notebooku se softwarem pro sběr dat viz níže.



Obr. 3.2: Blokové schéma systému sloužícího k charakterizaci termistorů

Poté, co je celé schéma zapojeno, je zapotřebí nastříhat samotné vzorky, které jsou navrhovány tak, aby vždy v jednom FPC kontaktu byly právě dva termistory. Celý testovací přípravek byl tvořen celkem čtyřmi deskami osazenými vždy dvojicí FPC konektorů. Topologie tištěných termistorů byla navržena tak, aby do každého FPC konektoru bylo možné připojit vždy dvojici termistorů. Tím byl dán maximální počet termistorů (tzn. 16), které bylo možné měřit paralelně během jednoho testu v termostatické lázni. Jelikož jsou k dispozici dvě

multiplexové karty, měření probíhá pro 16 vzorků termistorů, které byly připojeny pomocí 4 desek plošných spojů s 8-mi FPC konektory, jak můžete vidět z obrázku 3.3

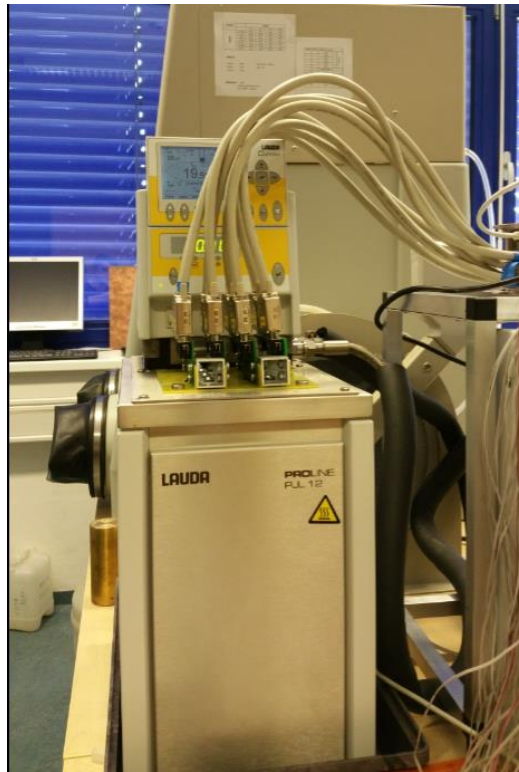


Obr. 3.3: Zapojení termistorů pomocí FPC kontaktů

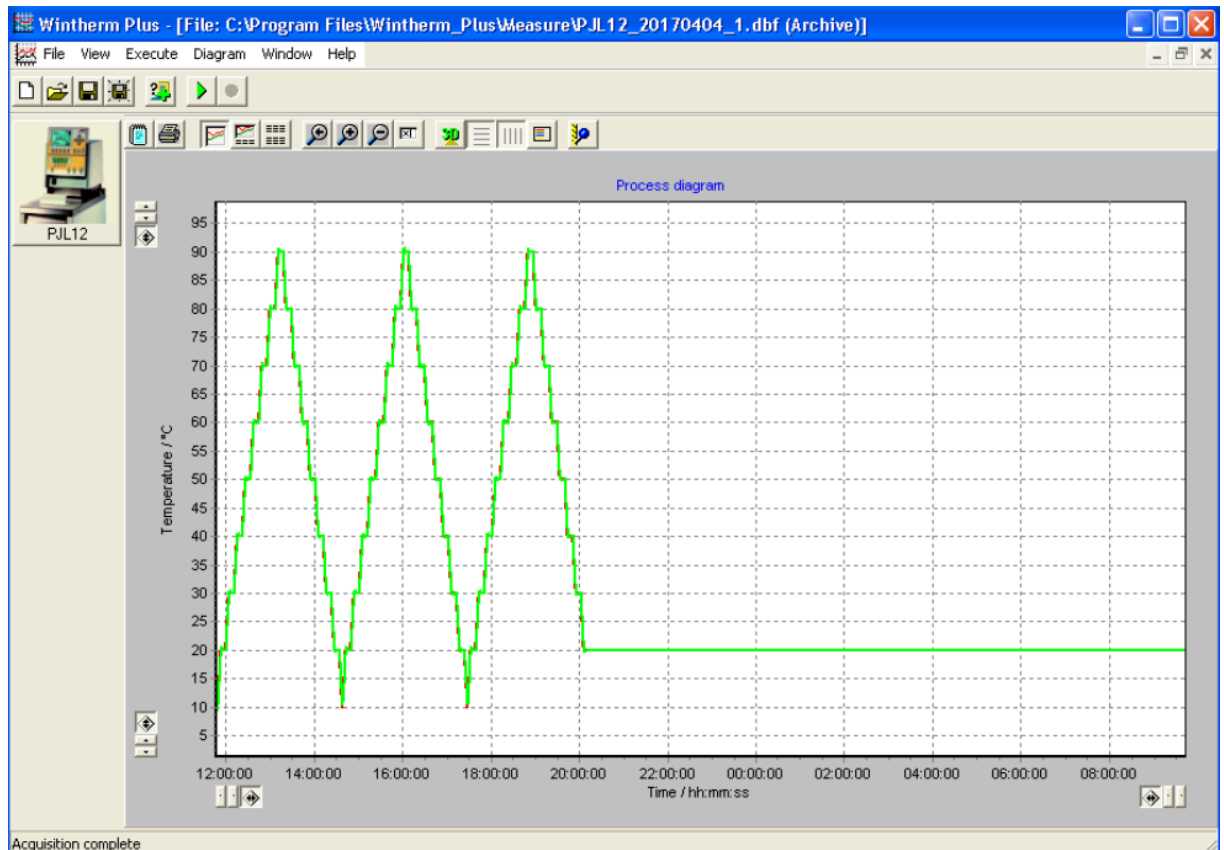
Tento přípravek je poté připojen přes tyto dvě multiplexové karty do digitálního multimetru, který měří odpor jednotlivých termistorů. Výsledky celé sady se objevují v časosběrném programu (Kickstarter), který je kompatibilní s digitálním multimetrem, a zobrazuje odpory termistoru v daném čase. Bylo měřeno vždy max. 16 termistorů zapojených po dvojicích do 8 FPC konektorů, které byly opět po dvojicích osazeny na celkem 4 propojovacích DPS. Všechny jednotlivé termistory byly připojeny vždy 4-bodově.

Celý tento přípravek s tištěnými termistoru je následně ponořen do termostatické lázně viz obrázek 3.4. Následuje ruční naprogramování teplotního profilu celé termostatické lázně (k regulaci lázně slouží program Wintherm Plus, který komunikuje s termistostatickou lázní pomocí sériové sběrnice RS-232). Tento teplotní model je naprogramován s 10 °C schodem, přičemž na daných teplotách zůstává 7 minut. Tyto teplotní schody jsou vzestupné do 90 °C, kde následně klesají opět k 10 °C, aby bylo možné vyhodnotit hysterezi teplotní odezvy měřených termistorů. Celý tento cyklus je nastaven tak, aby se třikrát opakoval. Na obrázku 3.5 je poté vidět celý teplotní profil, který byl nastaven právě v programu Wintherm Plus (v

programu nelze naprogramovat vypnutí, proto se teplotní profil po třech cyklech nastavuje na 20 °C a zůstává na této teplotě, než je ručně vypnut).



Obr. 3.4: Termostatická lázeň s ponořenými termistory



Obr. 3.5: Teplotní profil termistostatické lázně

Poté, co je nastaven teplotní profil, je nutné aktivovat celou lázeň včetně sběru dat o jednotlivých teplotách v reálném čase. Dále proběhly tři dané cykly v termistostatické lázni, po kterých došlo k exportu změřených dat do Microsoft Excel, a dále docházelo k analyzování dat opět v Microsoft Excel.

3.2.1 Použité přístroje

<i>Digitální multimetr Keithley 2700</i>
<i>2x Multiplexová karta Keithley 7708</i>
<i>4x Konektorová karta</i>
<i>termistostatická lázeň Lauda ProLine PJI12C</i>

3.3 Měřicí metoda

Metoda, která je zde použita, se nazývá 4-bodová měřicí metoda. Tato metoda se vyznačuje měřením pomocí 4 vývodů, které jsou připojeny na daný prvek. Vnější svorky slouží pro přivedení proudu na vzorek a vnitřní pro měření napětí na daném prvku. Komunikace mezi DMM a počítačem probíhala přes ethernetové rozhraní pomocí TCP/IP protokolu VXI-11.

3.4 Statistická charakterizace

Statistická charakterizace vzorků probíhá na čtyřech úrovních. Zde je popsána postupná statistická charakterizace jedné celé sady obsahující podsadu TERM_31 viz Tabulka 1. Tato sada neobsahuje žádný transparentní lak ani příměsí štříbrného pigmenty.

Nejprve probíhá statistická charakterizace na té nejnižší úrovni. V tomto případě se jedná pouze o jeden samotný termistor v celé sadě, kde je nejdříve nutné porovnat čas ustálené teploty lázně, jejíž soubor dostaneme z program Wintherm Plus viz obrázek 3.6

INDEX	TIMESTAMP	DATE	TIME	SETPOINT	BATHTEMP	P
117	42837,518196967	12.4.2017	12:26:12	30,000	29,532	6
118	42837,518312708	12.4.2017	12:26:22	30,000	29,614	6
119	42837,518428449	12.4.2017	12:26:32	30,000	30,119	6
120	42837,518544190	12.4.2017	12:26:42	30,000	30,265	6
121	42837,518659930	12.4.2017	12:26:52	30,000	30,331	6
122	42837,518775671	12.4.2017	12:27:02	30,000	30,412	6
123	42837,518891412	12.4.2017	12:27:12	30,000	30,524	6
124	42837,519007153	12.4.2017	12:27:22	30,000	30,473	6
125	42837,519122893	12.4.2017	12:27:32	30,000	30,451	6
126	42837,519238634	12.4.2017	12:27:42	30,000	30,395	6
127	42837,519354375	12.4.2017	12:27:52	30,000	30,305	6
128	42837,519470115	12.4.2017	12:28:02	30,000	30,242	6
129	42837,519585856	12.4.2017	12:28:12	30,000	30,183	6
130	42837,519701597	12.4.2017	12:28:22	30,000	30,099	6
131	42837,519817338	12.4.2017	12:28:32	30,000	30,031	6
132	42837,519933078	12.4.2017	12:28:42	30,000	29,973	6
133	42837,520048819	12.4.2017	12:28:52	30,000	29,961	6
134	42837,520164560	12.4.2017	12:29:02	30,000	29,933	6
135	42837,520280301	12.4.2017	12:29:12	30,000	29,933	6
136	42837,520396041	12.4.2017	12:29:22	30,000	29,929	6
137	42837,520511782	12.4.2017	12:29:32	30,000	29,955	6
138	42837,520627523	12.4.2017	12:29:42	30,000	29,961	6
139	42837,520743264	12.4.2017	12:29:52	30,000	29,949	6
140	42837,520859004	12.4.2017	12:30:02	30,000	29,942	6
141	42837,520974745	12.4.2017	12:30:12	30,000	29,968	6
142	42837,521090486	12.4.2017	12:30:22	30,000	29,993	6
143	42837,521206227	12.4.2017	12:30:32	30,000	29,989	6
144	42837,521321967	12.4.2017	12:30:42	30,000	30,033	6

Obr. 3.6: Screen tabulky termostatické lázně softwarem Wintherm Plus

a čas spínání jednotlivých termistorů, které jsou obdrženy z programu Kickstarter při ustálených teplotách.

CH115_ggg_Ohms(1)(1)	CH115_Time_SEC(1)(1)
122130,438	1129,300925
122219,055	1137,892932
122279,953	1146,484922
122327,117	1155,076923
122334,961	1163,668933
122310,367	1172,259927
122319,43	1180,851933
122312,086	1189,443928
122283,234	1198,03593
122242,43	1206,627923
122257,992	1215,219928
122249,828	1223,811924
122204,602	1232,403926
122175,203	1240,995926
122170,734	1249,587929
122163,352	1258,178927
122142,516	1266,770923
122159,992	1275,362929
122206,883	1283,954929
122210,727	1292,545925
122213,508	1301,137926
122210,266	1309,729926
122169,695	1318,321927
122213,578	1326,913929
122243,742	1335,505928
122259,711	1344,097928
122286,633	1352,689925
122312,734	1361,280932
122321,117	1369,87293
122338,984	1378,46493

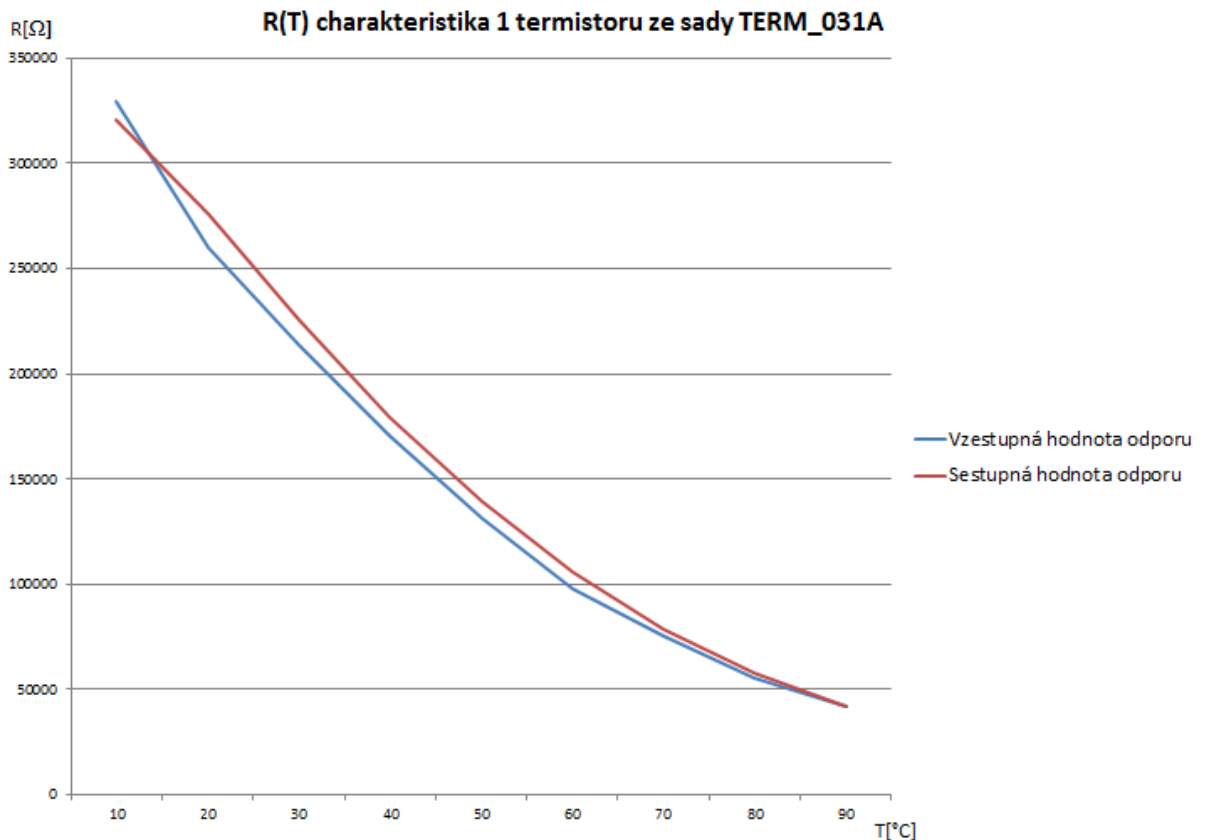
Obr. 3.7: Screen z ustálených teplot poskytnutý programem Kickstarter

Na tomto obrázku je vyznačena ustálená oblast teplotního schodu, z níž je vždy vybrán soubor dat pro další zpracování a sestavení $R(T)$ charakteristiky.

Poté, co jsou sesynchronizovány tyto dva časy, jsou brány jednotlivé ustálené hodnoty termistoru pro teploty od 10 °C do 90 °C (vzestupná hrana) a od 90 °C do 10 °C (sestupná hrana). Tento krok se nazývá první cyklus jeho zpracování. Je popsáno grafem číslo 1.

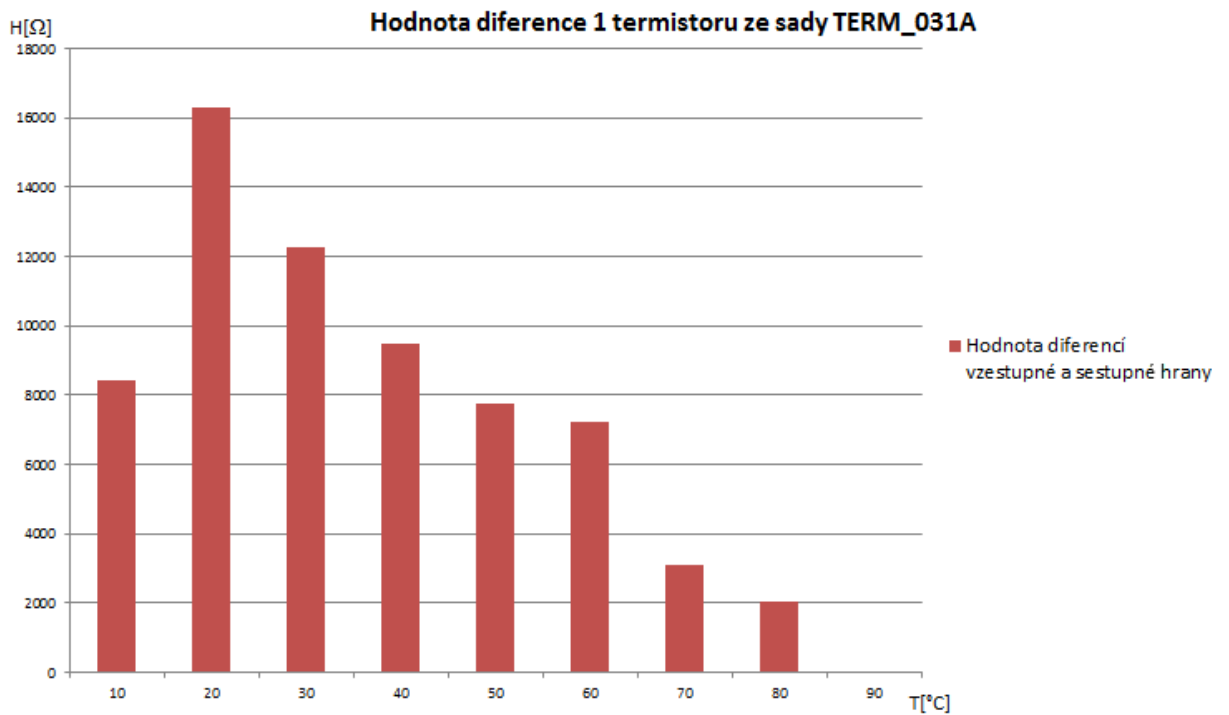
3.4.1 Analýza hysteréze

Tato část práce se zabývala analýzou hysteréze termistorů. Hysteréze zde byla brána jako maximální hodnota průměrů diferencí.



Graf 1: $R(T)$ charakteristika 1 termistoru ze sady TERM_031_A_SQ3450 v 1 cyklu

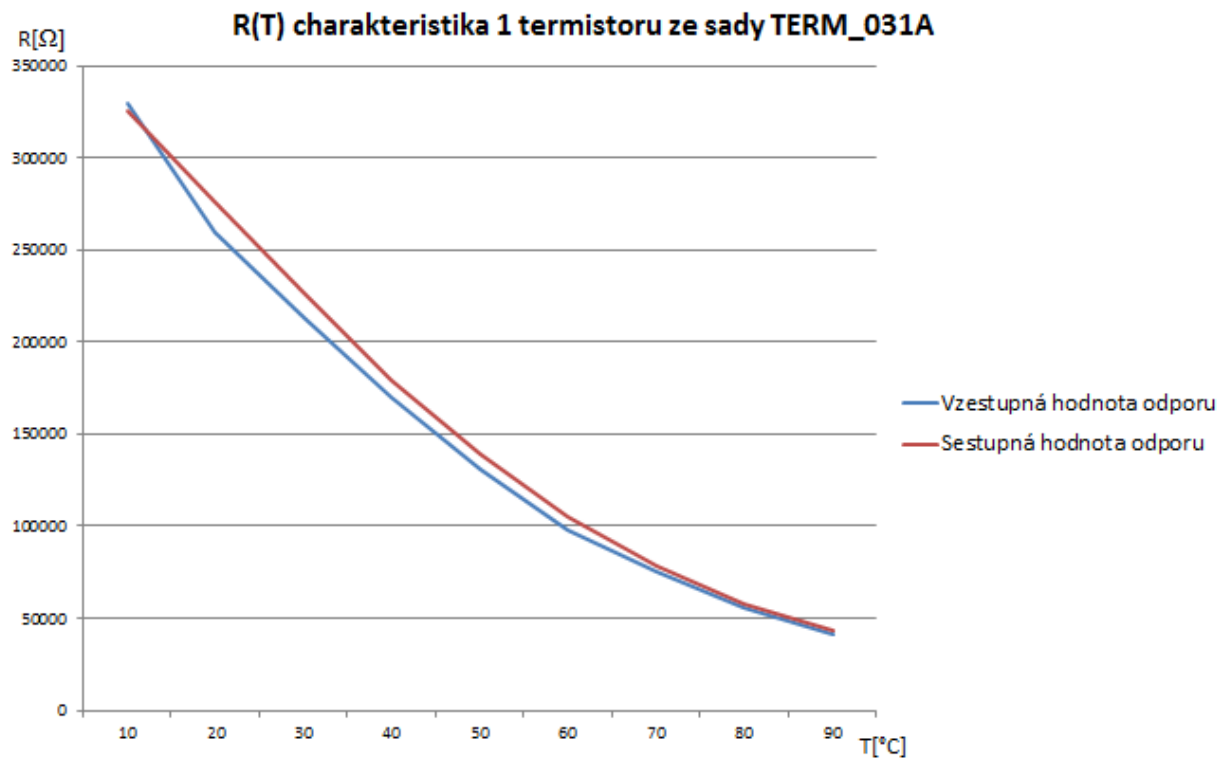
Z této $R(T)$ charakteristiky je následně spočtena absolutní hodnota difference odporů termistoru ve všech bodech teploty.



Tento graf znázorňuje rozdíl hodnot mezi vzestupnou a sestupnou hranou, přičemž hodnoty jsou brány jako rozdíly medianů od 10 °C do 90 °C (medián je hodnota, která se nachází přesně uprostřed všech hodnot seřazených do neklesající posloupnosti) v ustálených hodnotách (značení H má poté charakter difference).

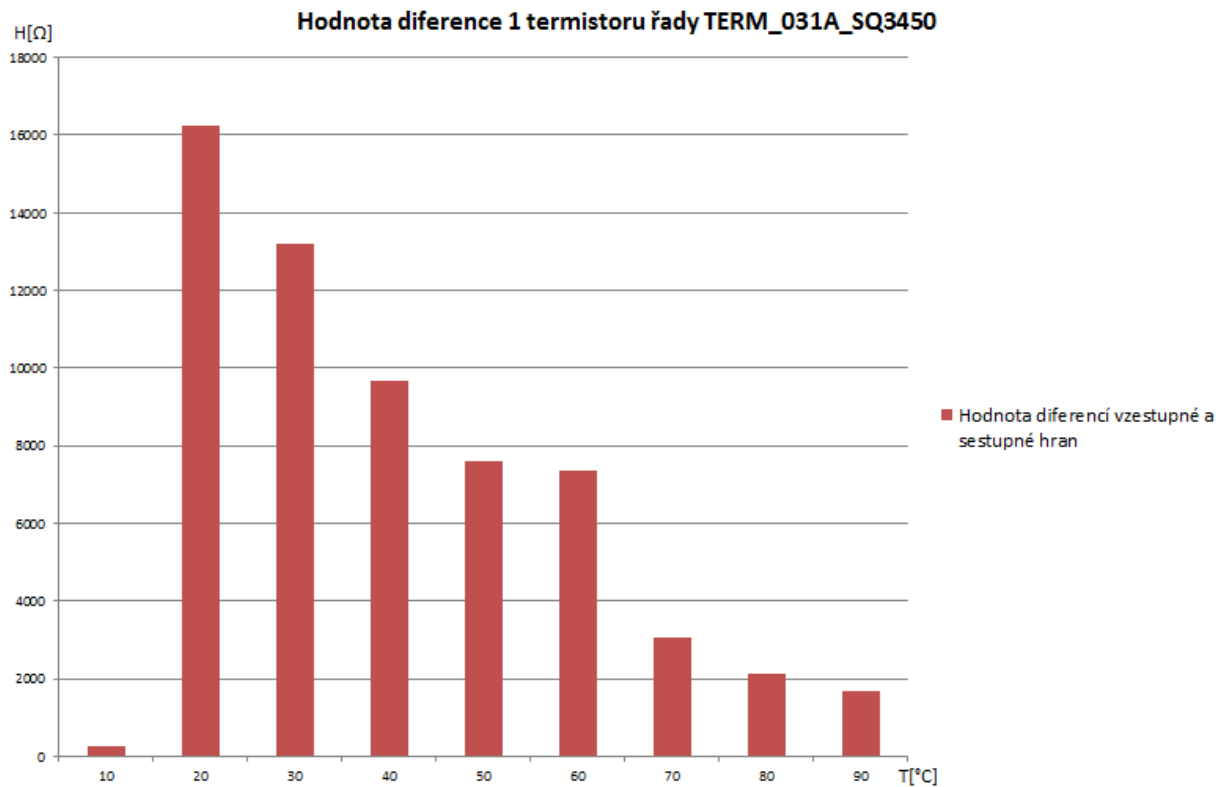
Následuje zpracování dat stejným způsobem pro druhý a třetí teplotní cyklus. Výsledné hysteréze jsou znázorněny v souhrnných grafech.

Tento graf znázorňuje R(T) charakteristiku 1 termistoru ze sady TERM_031A.

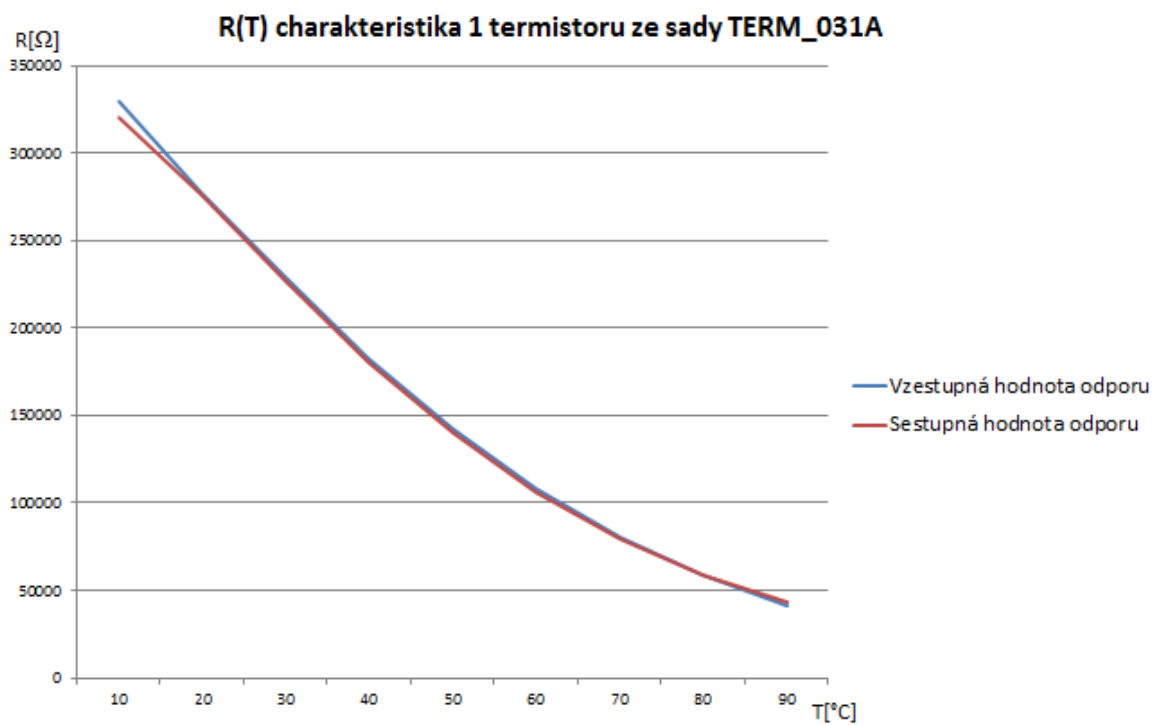


Graf 3: R(T) charakteristika 1 termistoru ze sady TERM_031_A_SQ3450 v 2 cyklu

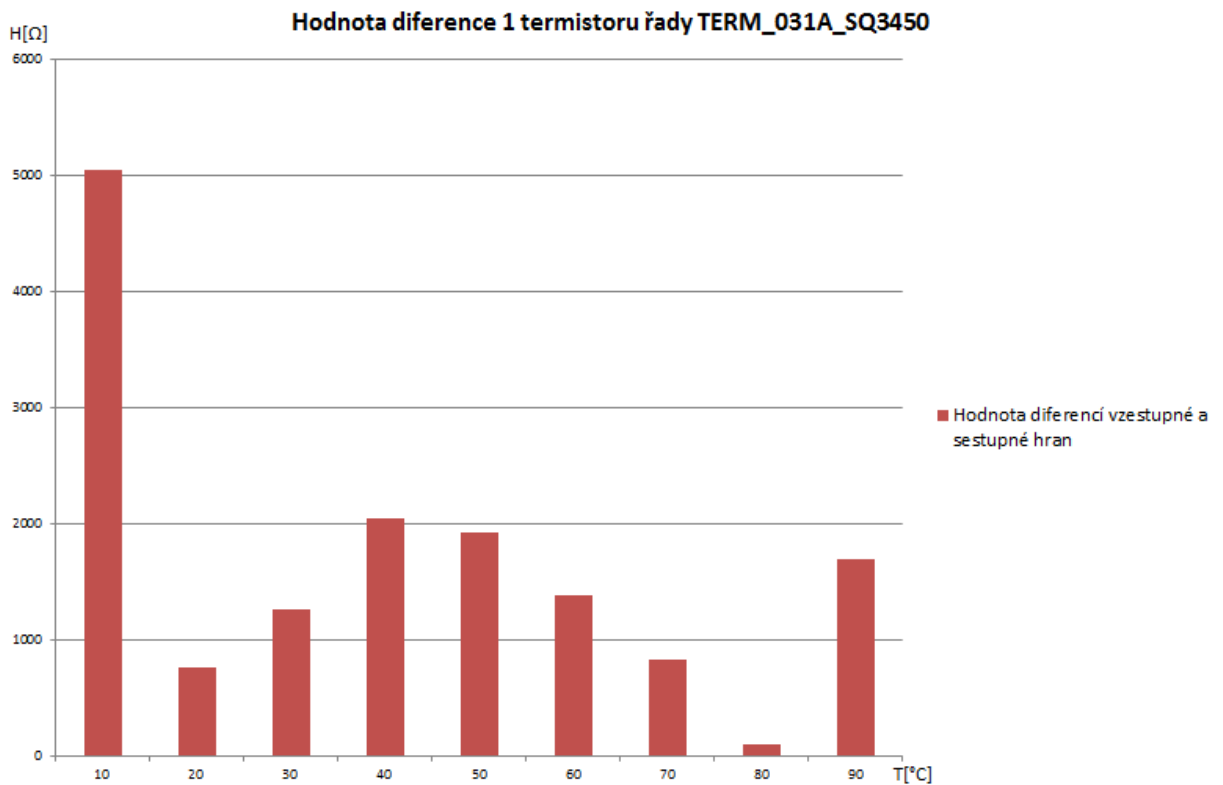
Z takto sestrojeného grafu lze opět vypočítat diferenci odporů v jednotlivých teplotních skocích.



Po takto zhotoveném grafu difference ve druhém cyklu bylo zapotřebí zhotovit třetí graf, který odpovídal třetímu cyklu v termostatické lázni.

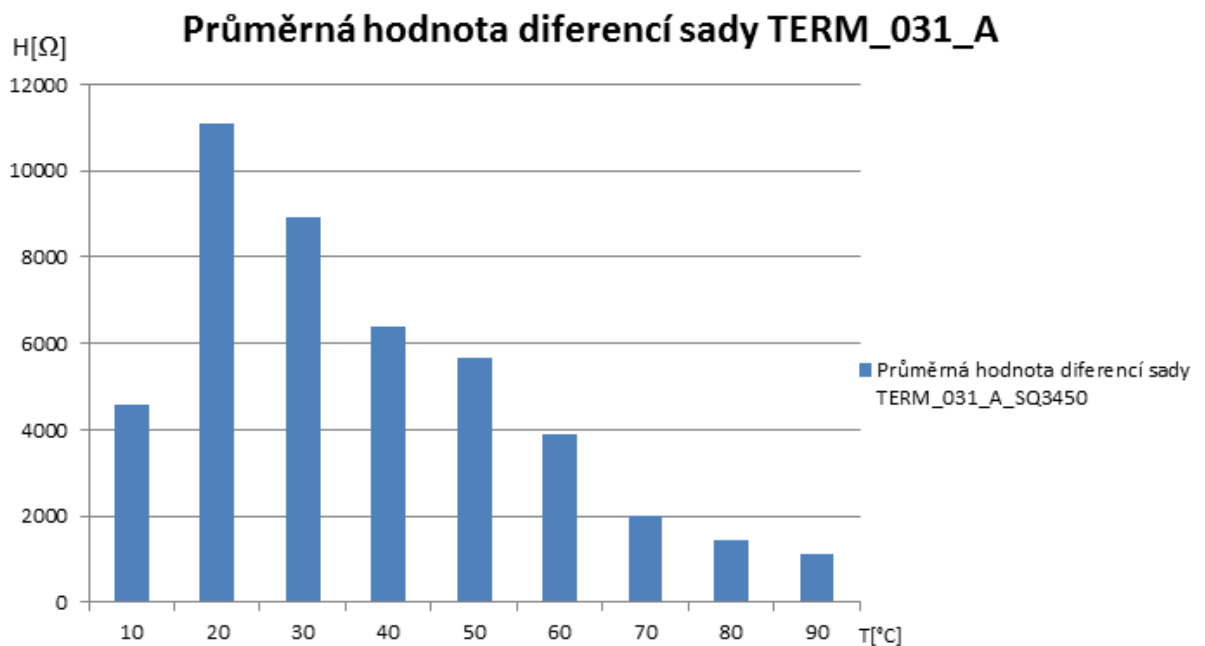


Z tohoto grafu byla následně znovu vypočtena difference odporů ve třetím cyklu termostatické lázně.



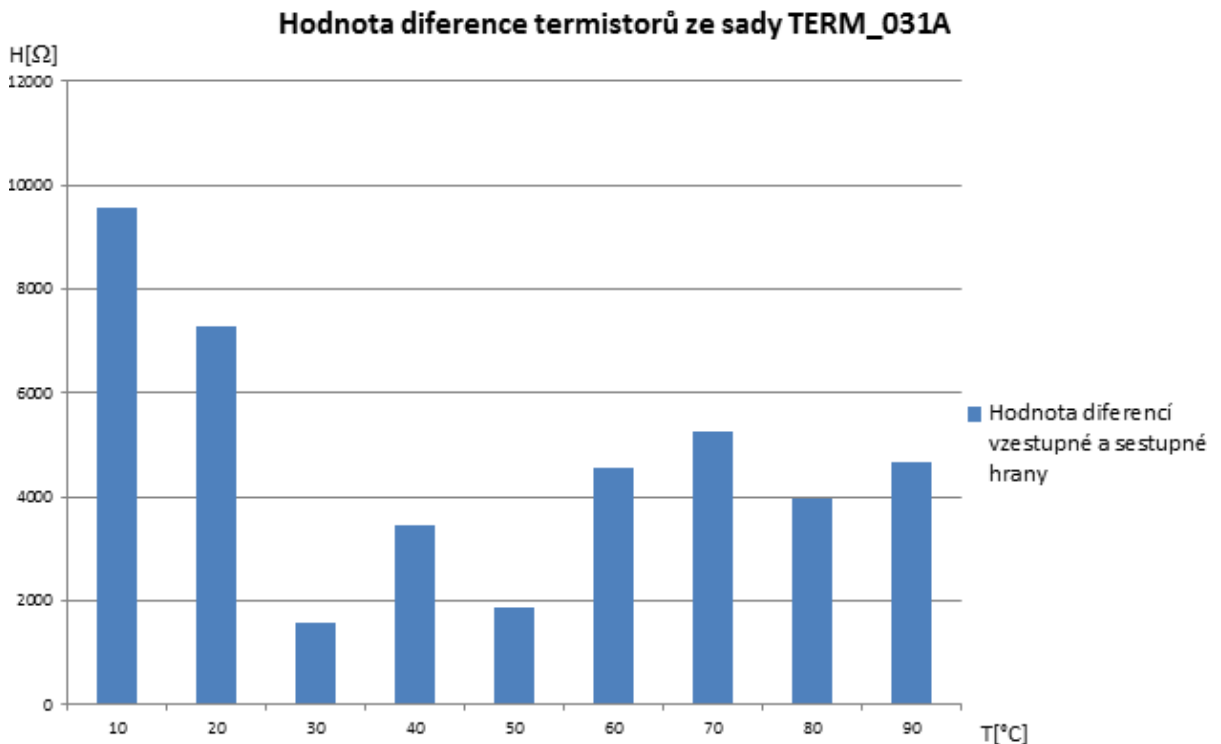
Graf 4 : Difference třetího cyklu

Po takto zhotovených differencech pro každý cyklus bylo zapotřebí udělat souhrnný graf, který vyjadřuje průměrnou hodnotu differencech na každé teplotě pro jeden termistor této řady.



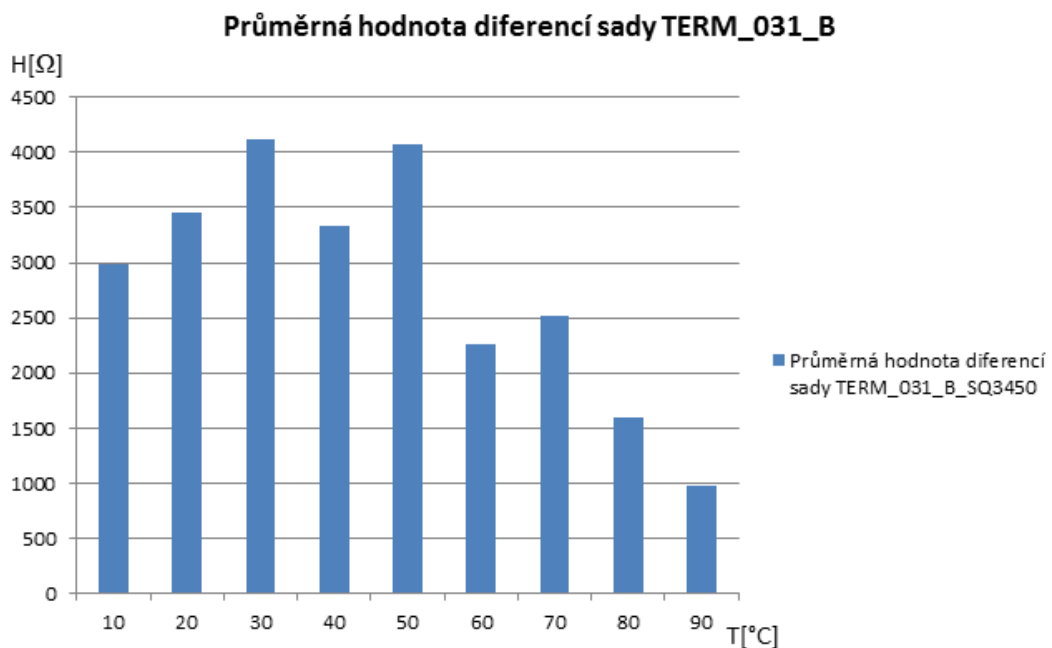
Graf 5: Průměrné hodnoty differencech pro jednotlivé teploty

Tento postup byl následně aplikován na všechny jednotlivé termistory z dané sady a z výsledných dat byl zpracován graf průměrných diferencí na všech teplotách pro všechny termistory ze sady A.

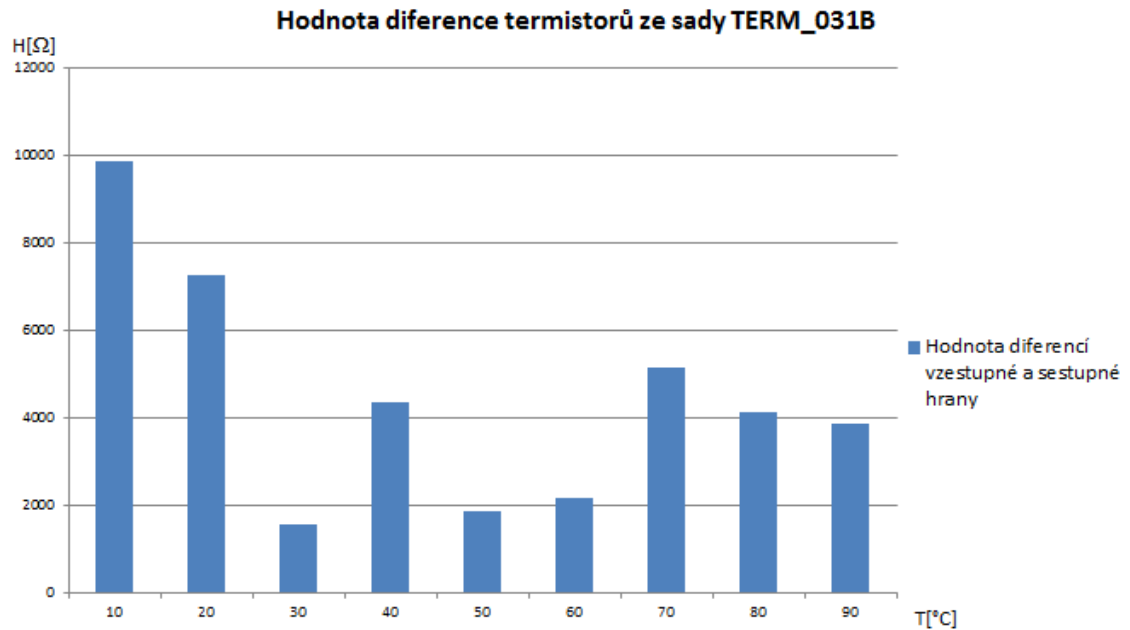


Graf 6: Průměrné hodnoty diferencí pro jednotlivé teploty všech termistorů ze sady A

Tato metodika byla aplikována se stejným postupem i pro termistor typu B. V této práci jsou zobrazeny pouze výsledné difference pro jeden termistor ze sady B a pro všechny termistory ze sady B.



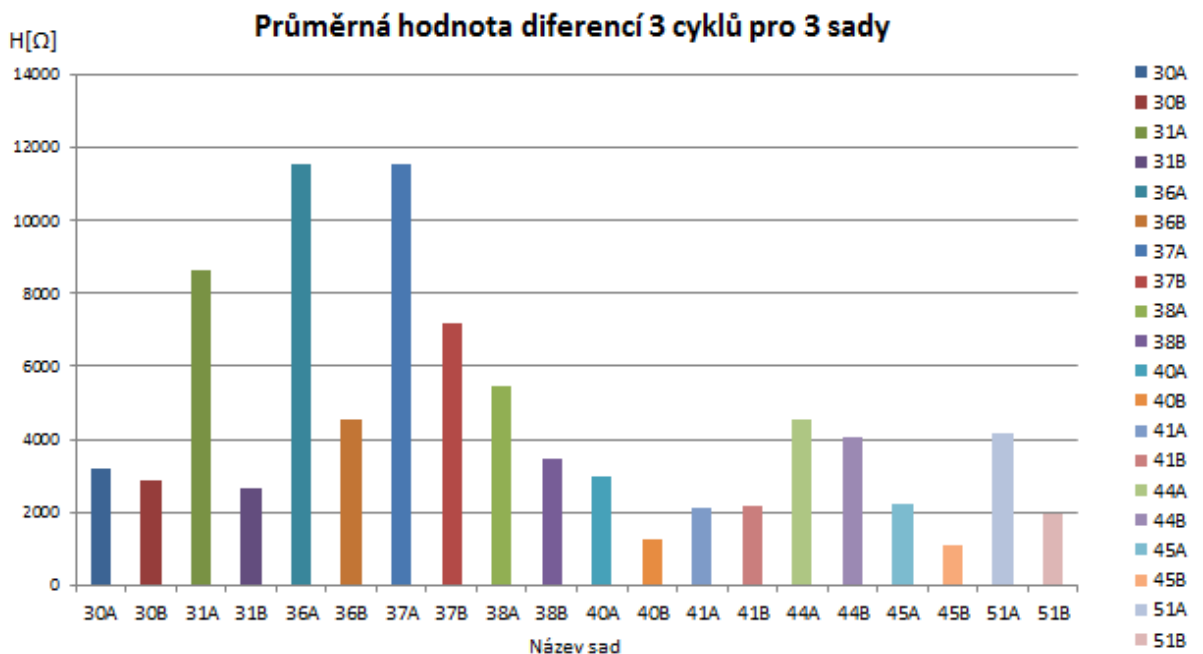
Graf 7 : Průměrné hodnoty diferencí pro jednotlivé teploty 1 termistoru



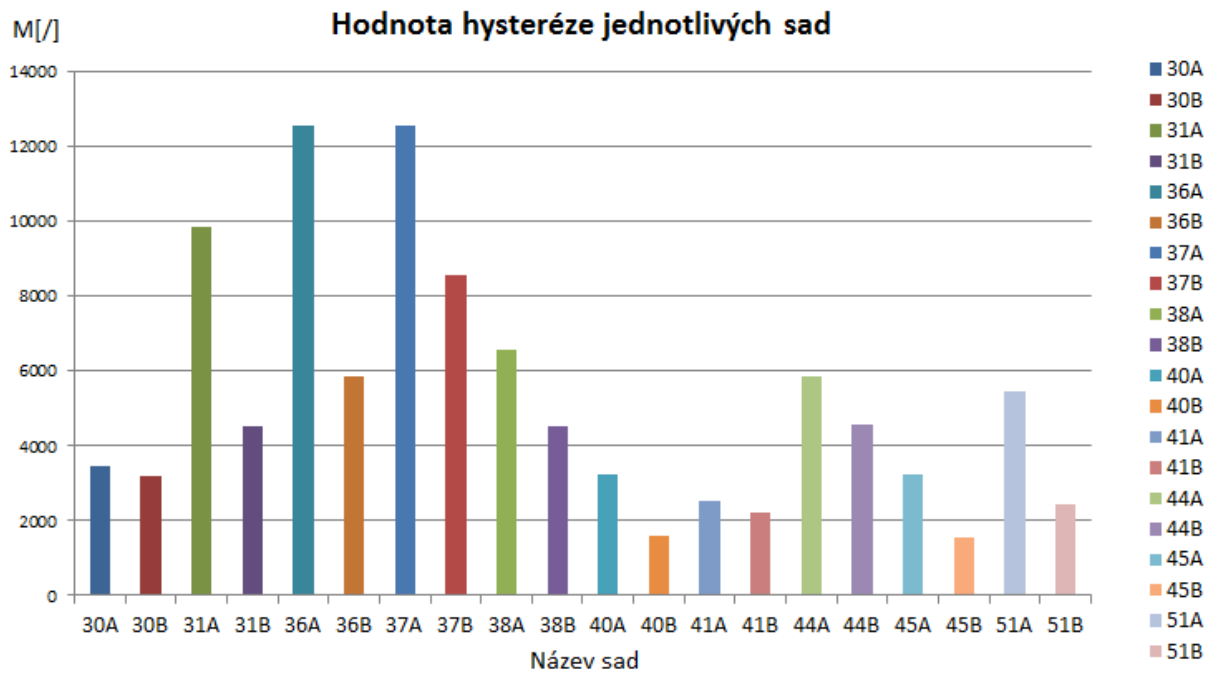
Graf 6 : Průměrné hodnoty diferencí pro jednotlivé teploty všech termistorů ze sady B

Následoval stejný postup pro všechny jednotlivé sady, na grafu 7 je průměrná hodnota jednotlivých diferencí a k nim příslušná hysteréze.

Následoval graf průměrných hodnot diferencí pro všechny sady, avšak zatím pouze pro jeden termistor. Z takto zhotoveného grafu následoval graf hysteréze pro jednotlivé sady.

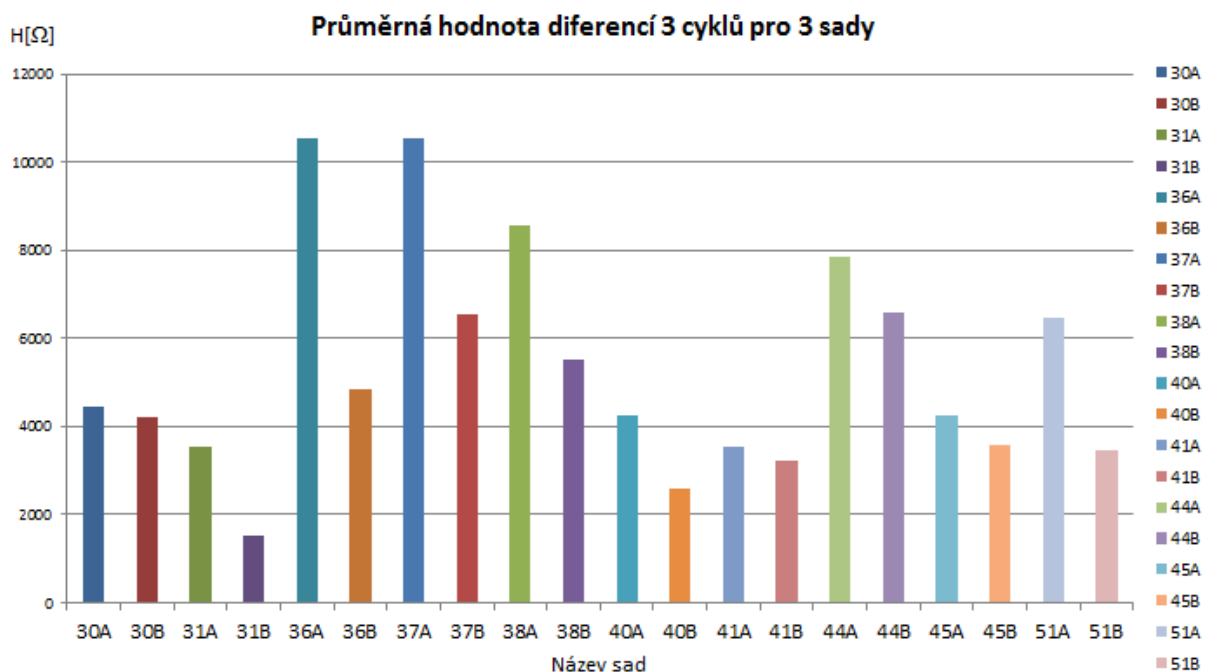


Graf 7: Průměrné hodnoty diferencí pro jednotlivé termistory ze všech sad



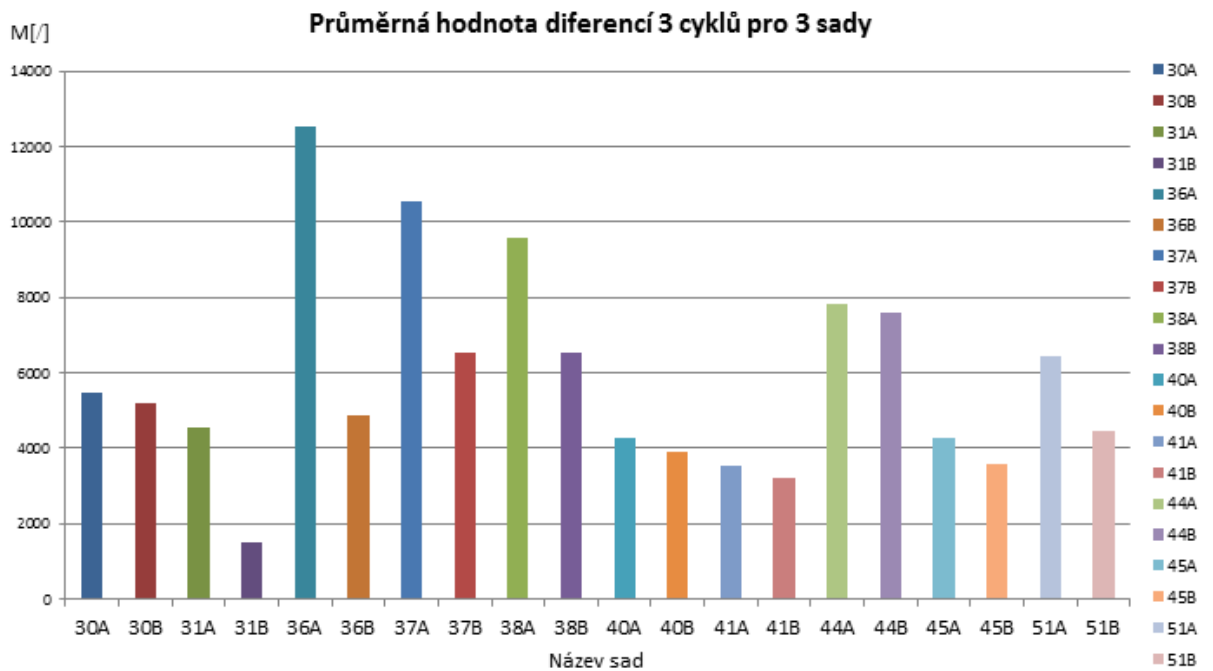
Graf 8: Výsledná hysteréze jednotlivých sad

Nyní bylo zapotřebí postupovat stejnou metodikou určování diferencí a hysteréze, avšak pro všechny termistory ze všech sad.



Graf 9: Diference 3 sad všech termistorů pro 3 cykly

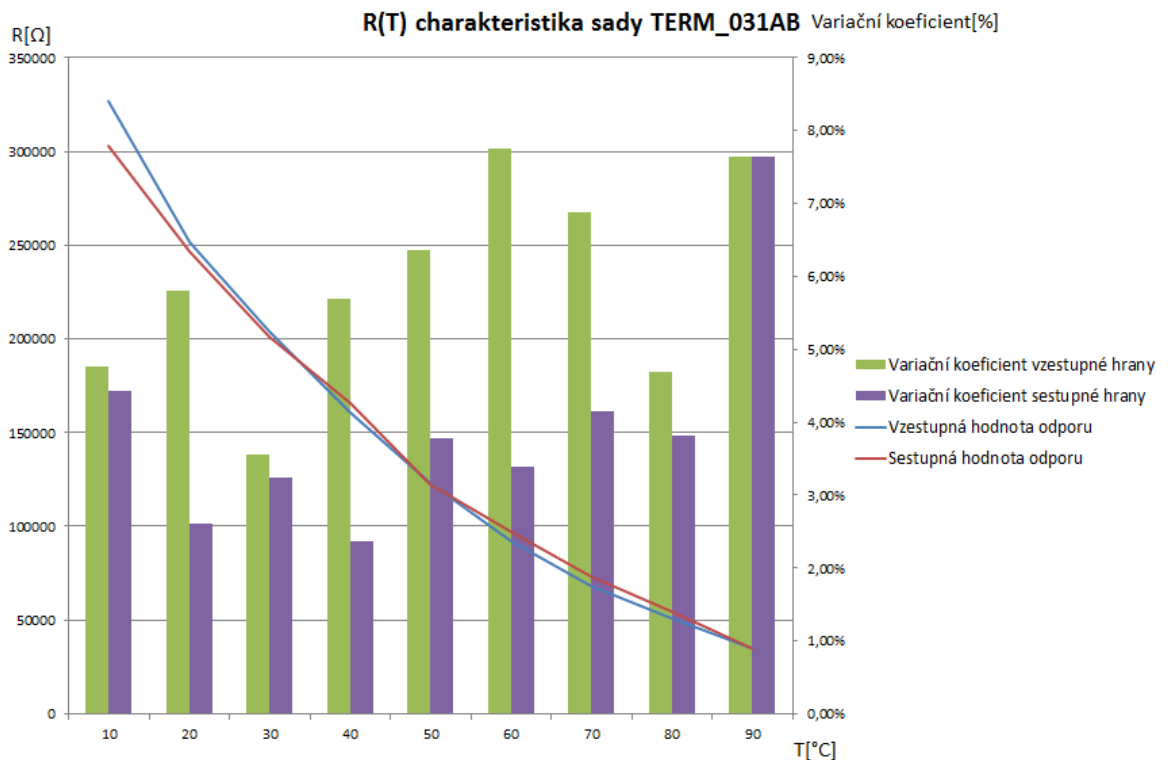
Následně byl zhotoven graf hysteréze pro tuto sadu, který odpovídal maximální hodnotě všech průměrů.



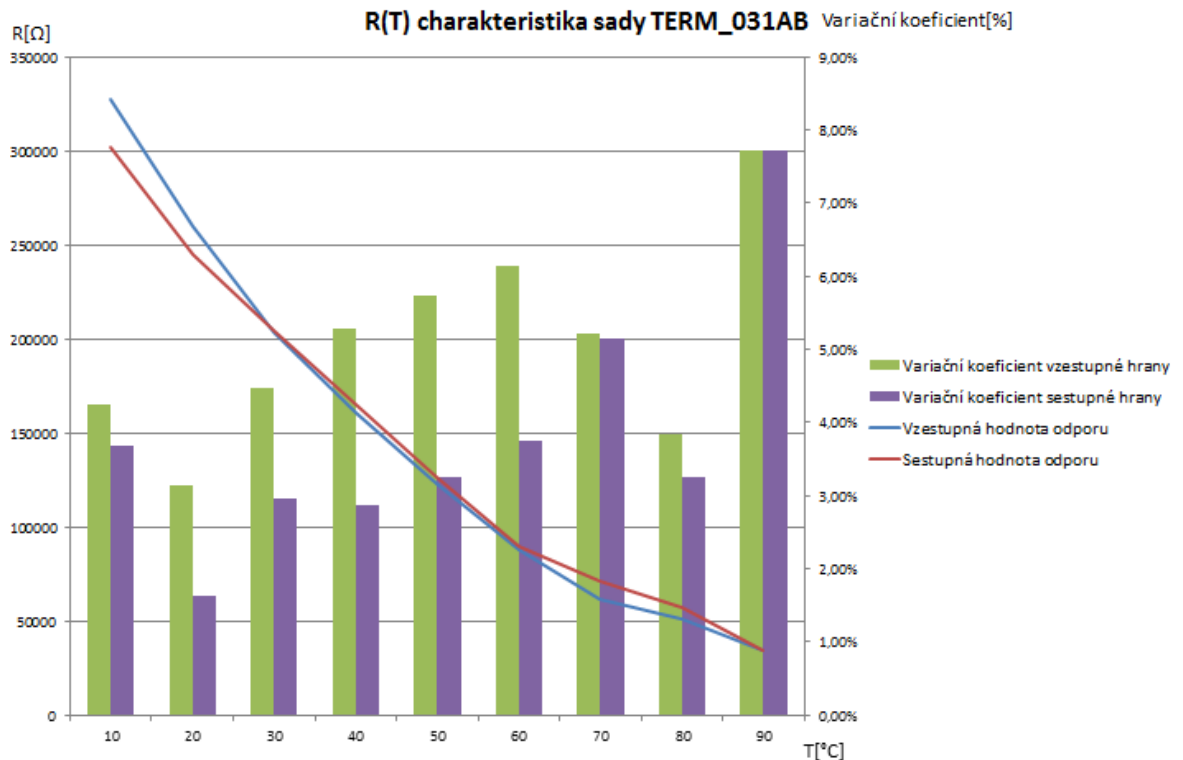
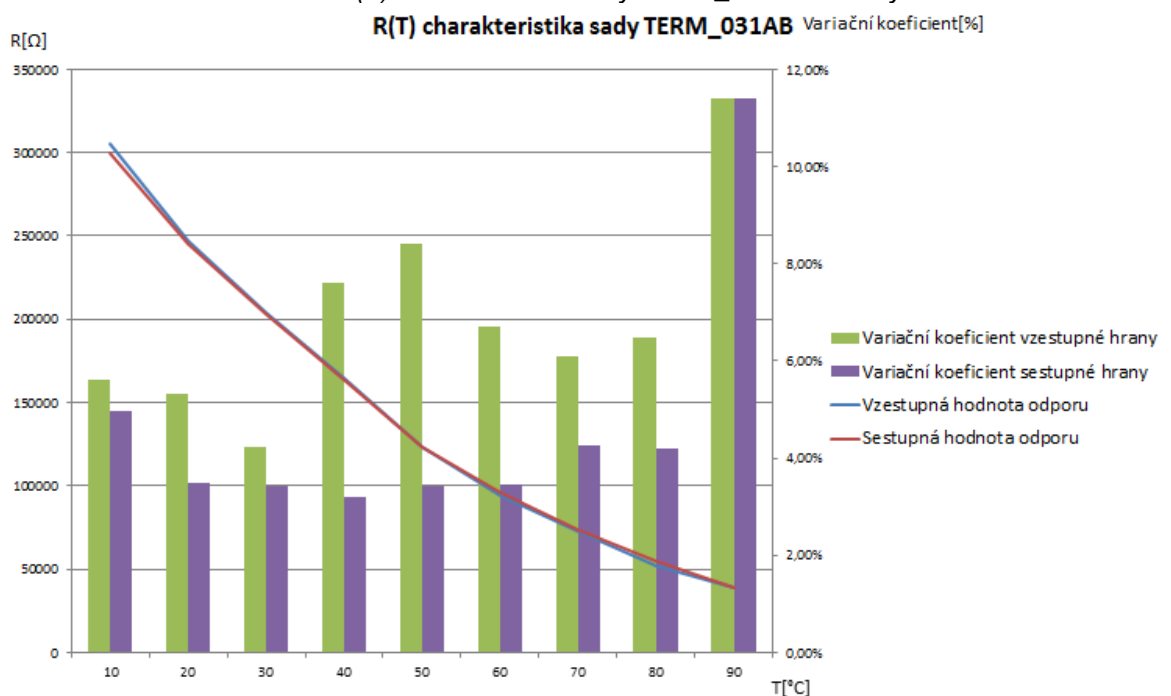
Graf 10: Výsledná hysteréze jednotlivých sad

3.4.2 Analytické vyjádření teplotní závislosti

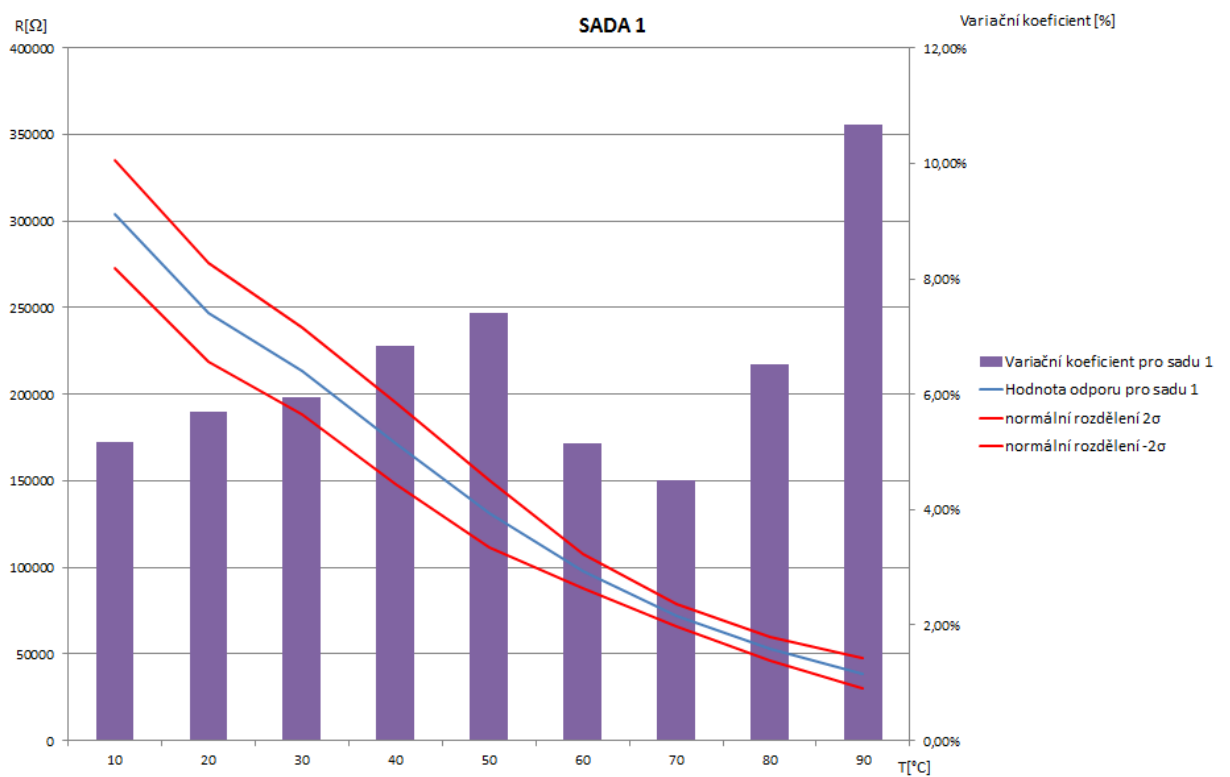
Tato část práce se zabývá vyjádřením $R(T)$ charakteristik z agregovaných dat a jejich aproximace Steinhart-Hartovou rovnicí. Metoda byla popsána na sadě TERM_31AB a tato metodika byla poté aplikována i na zbylé sady.

Graf 11: $R(T)$ charakteristika sady TERM_031AB v 1 cyklu

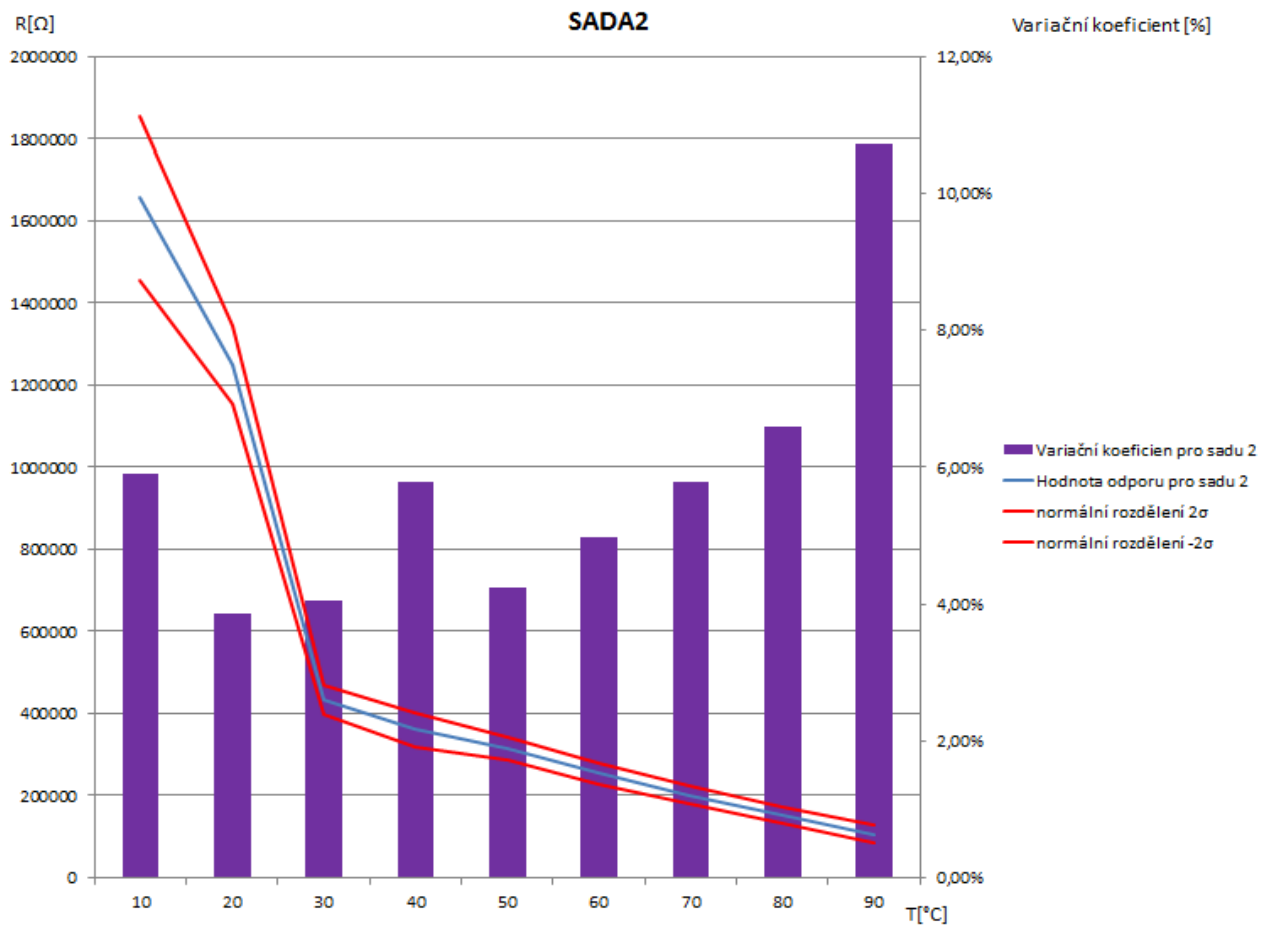
Tento graf zobrazuje zobrazuje $R(T)$ charakteristiku sady TERM_031AB v prvním cyklu, kde vzestupná hodnota odporu značí hodnotu odporu při náběžné hraně. Se zvyšující se teplotou tento odpor klesá. Sestupná hodnota odporu poté značí odpor, který následně stoupá v závilosti na klesající teplotě. Do tohoto grafu byl již zanesen variační koeficient, který značí proměnlivost hodnot v daných cyklech.

Graf 12: $R(T)$ charakteristika sady TERM_031AB ve 2 cykluGraf 13: $R(T)$ charakteristika sady TERM_031AB ve 3 cyklu

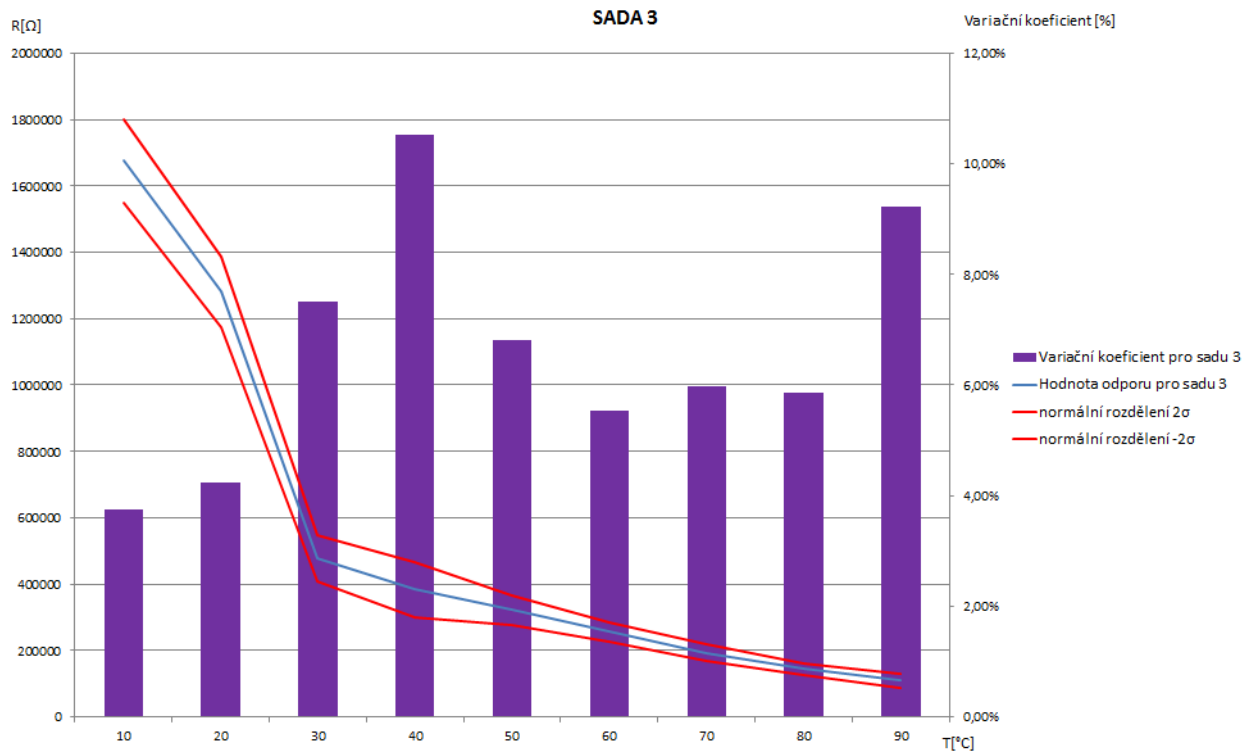
Nyní bylo potřebné zkompletovat tři hlavní sady dohromady. Pomocí ustálených hodnot pro jednotlivé sady (jak pro vzestupnou, tak pro sestupnou hranu) byly vytvořeny kompletní $R(T)$ charakteristiky (tyto $R(T)$ charakteristiky jsou vytvořeny jako průměry medianů pro jednotlivé ustálené hodnoty a to jak vzestupnou tak pro sestupnou hranu). Jejich variační koeficienty jsou vypočteny opět pro všechny ustálené hodnoty v jednotlivých teplotních krocích. Dále byly vytvořeny toleranční meze, které představovalo Gaussovo rozdělení 2σ , které odpovídá 95,5% bodů, které se mohou nacházet na dané teplotě v charakteristice. K těmto charakteristikám byly vytvořeny také difference na jednotlivých cyklech. Nicméně pro celkovou přehlednost jsou uvedeny pouze souhrnné grafy, které obsahují všechny tři cykly dohromady.



Graf 14: Kompletní graf pro 1 sadu s vynesným variačním koeficientem

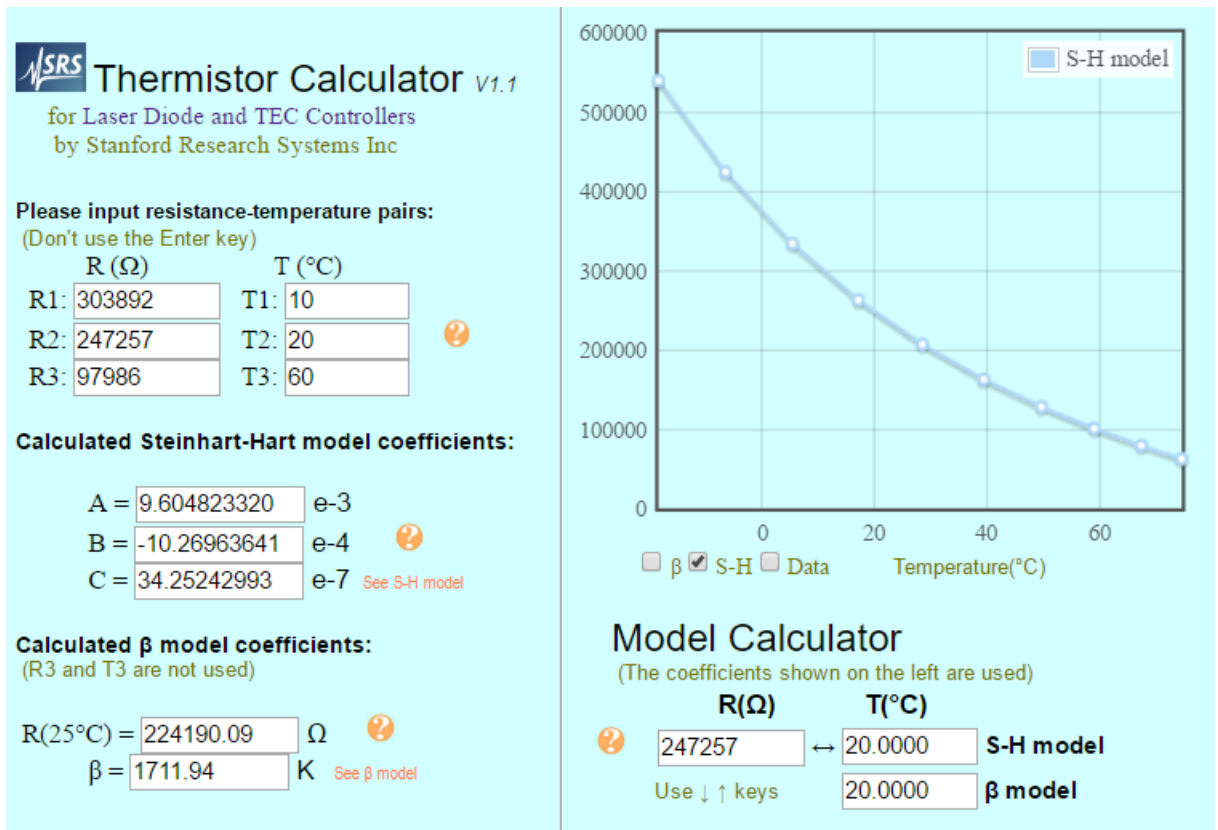


Graf 15: Kompletní graf pro sadu 2 s vynesným variačním koeficientem

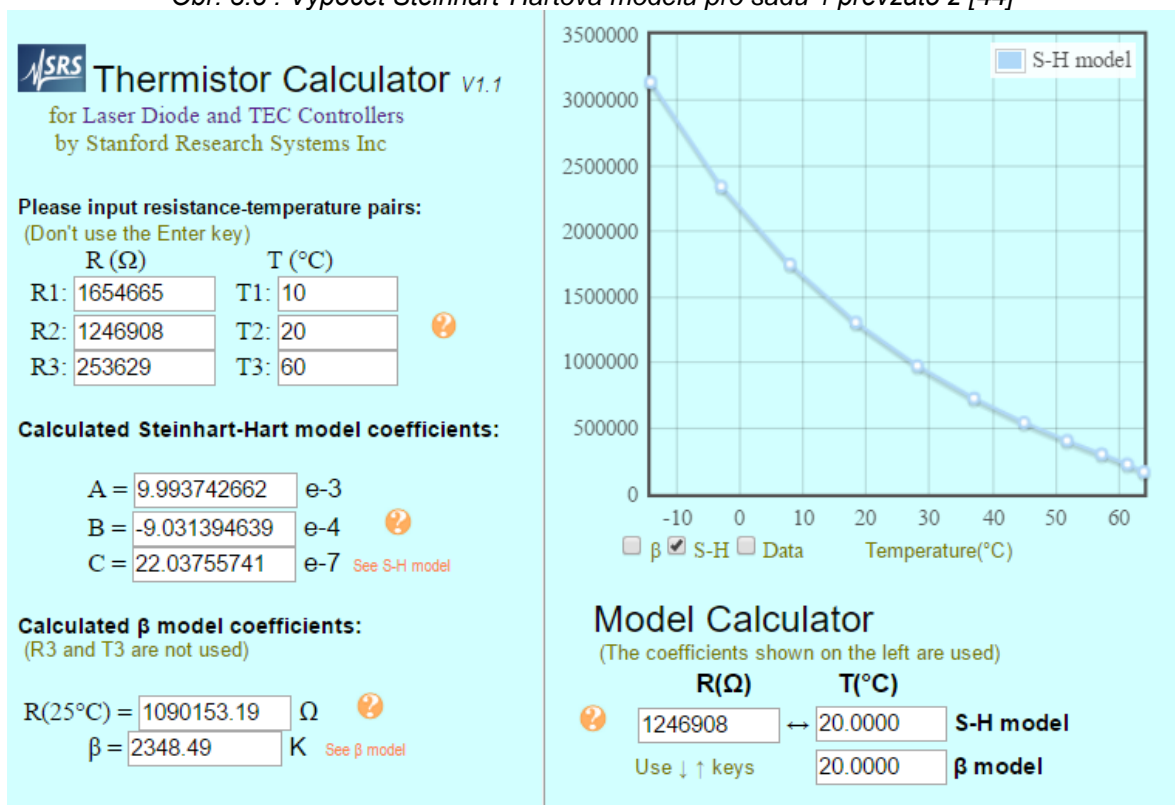


Graf 16: Kompletní graf pro sadu 3 s vynesným variačním koeficientem

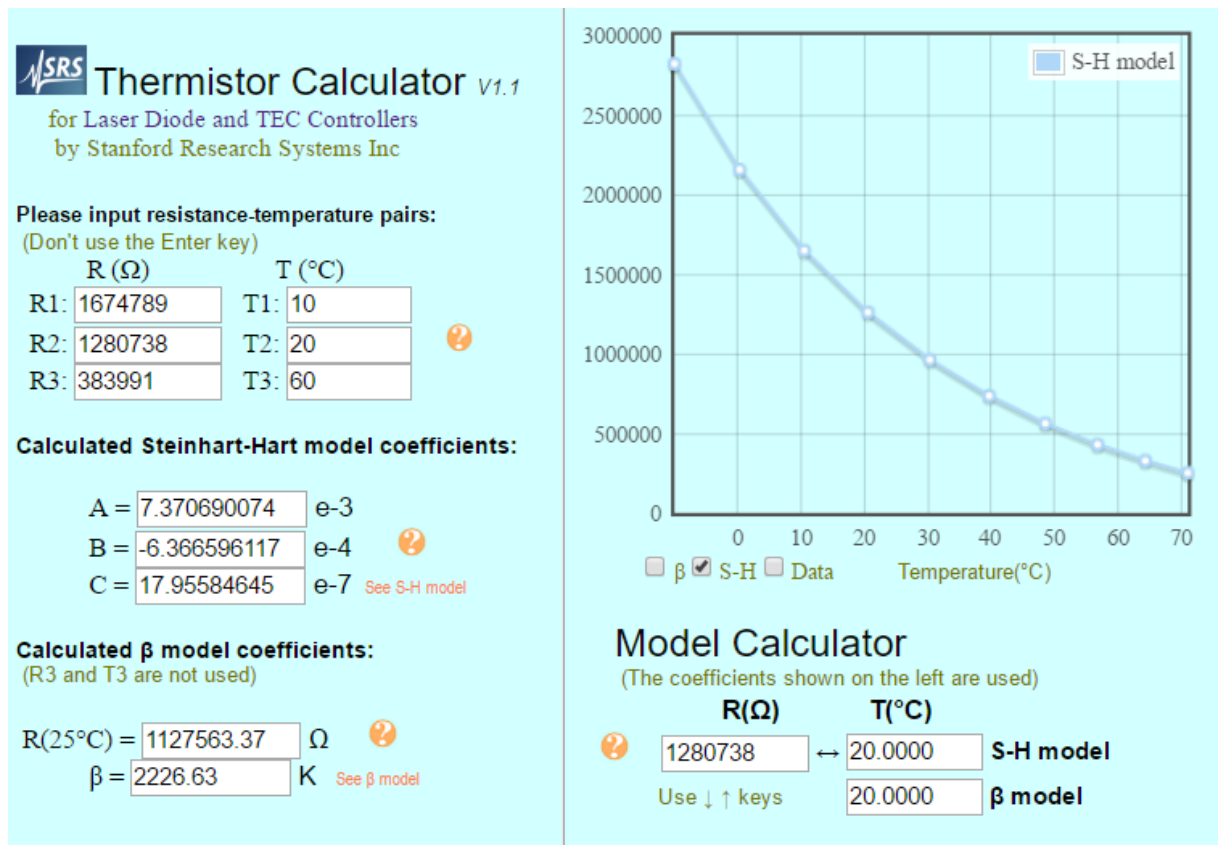
Následovalo aplikování Steinhart-Hartova modelu na jednotlivé tři sady. K tomu byl použit software Thermistor Calculator, díky kterému bylo možné vypočítat konstanty A,B,C a poté aplikovat tento model na jednotlivé sady.



Obr. 3.8 : Výpočet Steinhart-Hartova modelu pro sadu 1 převzato z [44]

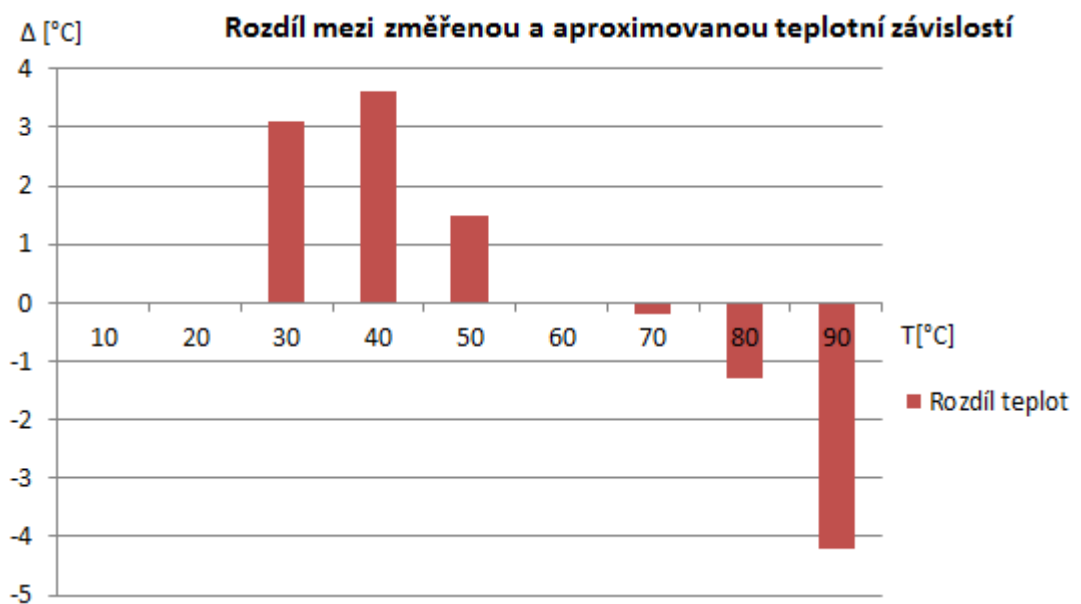


Obr. 3.9: Výpočet Steinhart-Hartova modelu pro sadu 2 převzato z [44]

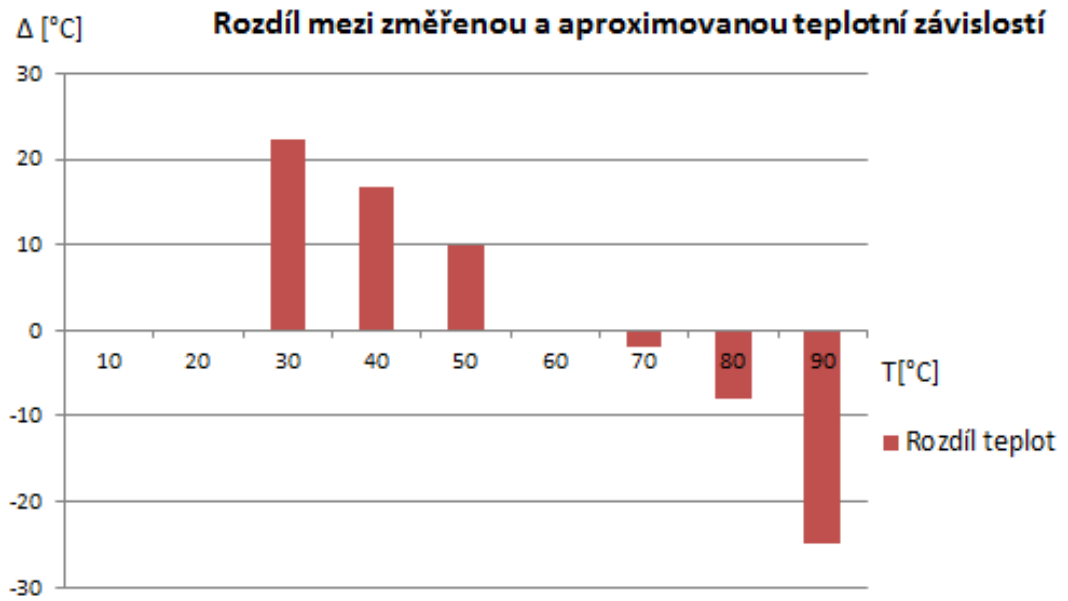


Obr. 4.0 : Výpočet Steinhart-Hartova modelu pro sadu 3 převzato z [44]

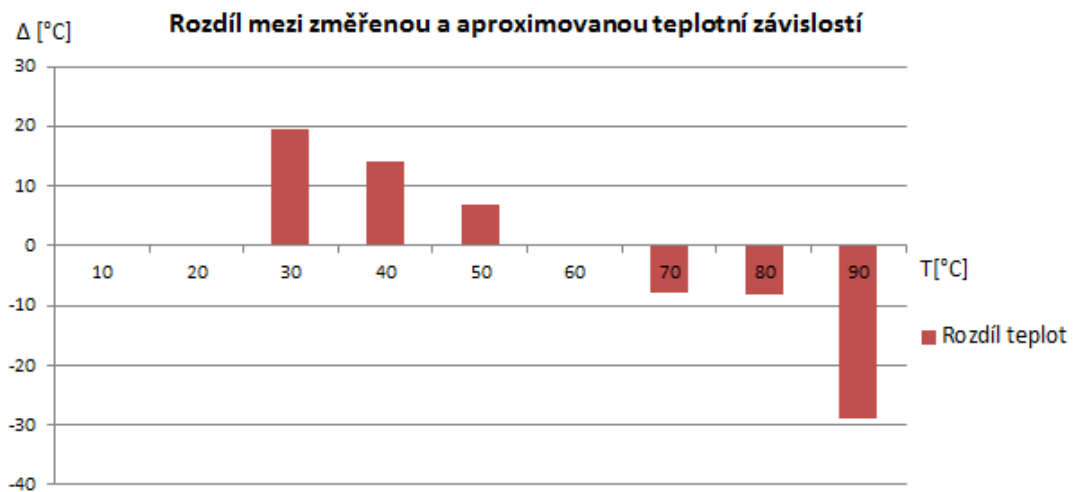
Poté, co byl tento model aplikován na výstupní charakteristiky jednotlivých sad, bylo zapotřebí graficky znázornit odlišnost aproximace podle Steinhart-Hart na výsledné $R(T)$ charakteristiky termistorů pro jednotlivé sady.



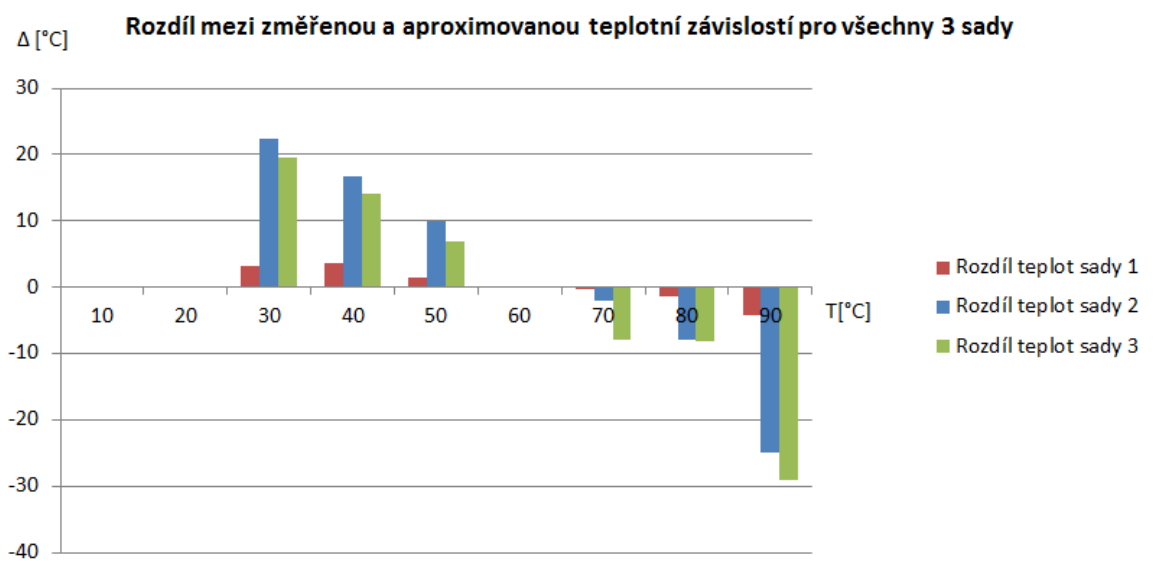
Graf 17: Rozdíl mezi změřenou a aproximovanou teplotní závislostí pro sadu 1



Graf 18: Rozdíl mezi změřenou a aproximovanou teplotní závislostí pro sadu 2



Graf 19: Rozdíl mezi změřenou a aproximovanou teplotní závislostí pro sadu 3



Graf 20: Souhrnný graf rozdílu teplot pro jednotlivé sady

Z těchto grafů je již na první pohled patrné, že tuto aproximaci lze úspěšně aplikovat pouze na první sadu. Zbylé dvě sady podle této aproximace Steinhart-Hartova modelu nelze aplikovat z důvodů značných výkyvů na teplotách. Nicméně tyto výkyvy u sady 2 a 3 jsou především způsobeny $R(T)$ charakteristikou, která neodpovídá teoretickým předpokladům chování NTC termistorů.

3.5 Metoda kalibrace senzorů pro výrobu

Kalibrace jednotlivých senzorů se provádí pomocí referenčního teplotního senzoru, vůči kterému jsou kalibrovány testované sensory.

Každá sonda teplotního termistoru používá ultrastabilní skleněný thermistor, který je uzavřený v tenké stěně z nerezové trubky. Základním polovodičovým prvkem je kulička, která je vyrobena z manganu, niklu a oxidů kobaltu namotaných na platinových drátech (0,1mm). Pro dlouhodobou stabilitu termistory stárnou při různých teplotách po dobu 16 týdnů. Během procesu stárnutí se provádí ověření stability sondy, aby se zajistila výkonnost podle zveřejněných specifikací.

Přesné kalibrace termistoru, které jsou sledovatelné na NIST (National Institute of Standards and Technology), jsou dodávány s každou teplotní sondou. Tabulkou, generovanou počítačem v krocích po 0,01 °C, je vybavena každá kalibrace podle Steinhart-Hartova vzorce pro výpočet odporu.

Konstanty pro vzorec jsou získány z polynomické regrese prováděné na získaných kalibračních datech. V rozmezí od 0 °C do 60 °C se kalibrace termistoru provádí na trojném bodě vody (0,01 °C) a 15 °C, 25 °C, 30 °C, 37 °C, 50 °C a 60 °C. Pro teplotní rozsah 0 °C až 100 °C jsou prováděny stejné postupy kalibrace, nicméně je zde už využita kalibrace pro předchozí rozsah.

Každá sonda teplotního termistoru je individuálně kalibrována a obsahuje kalibrační protokol od výrobce. [45]

3.5.1 Metoda kalibrace senzorů pro toto měření

U sad 2 a 3 je zřejmé, že jednodušší kalibrace nepřipadá příliš v úvahu, jelikož se průběh $R(T)$ charakteristik vymyká konvenčním termistorům a nelze ho adekvátně aproximovat běžnými modely. Je tedy skutečně nutná vícebodová kalibrace. Z praktického hlediska stojí za zamyšlení, jestli by šlo využít i jiný způsob řízeného ohřevu vzorků než v termostatické lázni se silikoniovým olejem, který komplikuje manipulaci a výrazně znečišťuje vzorky. Nabízí se např. využití klimatické komory nebo suché testovací cely se vzduchovou atmosférou. Naopak u sady 1 je zřejmé, že ji lze adekvátně aproximovat například pomocí 1 bodové aproximace. Tato hodnota se měří při teplotě 25 °C a R_{25} viz kapitola 1.6 Základní parametry.

3.6 Diskuze výsledků

První část statistické charakterizace se zabývala analýzou hysteréze. Zde byl jistý trend zmenšující se difference při jednotlivých cyklech. To značí zpřesňování jednotlivých výsledků při každém cyklu. Z této skutečnosti lze vyvodit, že se termistory vyznačují dobrou reprodukovatelností výsledků, kde difference měla klesající tendenci při každém dalším cyklu.

Poté následovalo analytické vyjádření teplotní závislosti. U analýzy možné aproximace $R(T)$ charakteristiky bylo zjištěno, že krycí vrstva významně mění průběh $R(T)$ charakteristik, pro které tedy již neplatí aproximace S-H rovnicí – to vyplývá z analýzy difference měřené a modelované $R(T)$ charakteristiky. Jak již bylo zmíněno, nabízí se tedy otázka, jestli by nebylo možné využít jiný způsob řízení ohřevu vzorků než v termostatické lázni se silikonovým olejem, který komplikuje manipulaci a výrazně znečišťuje vzorky.

Při prvním pohledu na tři výstupní charakteristiky si můžeme všimnout, že pouze termistory ze sady 1 odpovídají teoretickým předpokladům termistorové charakteristiky $R(T)$ kalibrované podle Steinhartovy metody. Odpor termistorů zbylých dvou sad sice klesá v závislosti na teplotě, nicméně jejich průběh spíše připomíná obrácenou charakteristiku PTC termistoru. Možné odchylky mohly nastat také v důsledku neopatrné manipulace, kdy se s jednotlivými vzorky manipulovalo ručně a při neopatrném zacházení mohlo dojít k dotyku prstů s tištěnými plochami. Výsledné měření také mohlo být ovlivněno relativní vlhkostí vzduchu během skladování, kdy potenciálně dochází k absorpci vlhkosti do objemu tištěných vrstev.

Pro celkové zlepšení této metody měření bych doporučoval layouty termistorů předem nastříhané. Například pomocí řezačky na plasty namísto nůžek, kde opakovaně docházelo k neúmyslným dotykům s tištěnou plochou. Dále bych navrhl proměření jednotlivých vzorků, například v klimatické komoře nebo v suché testovací cele se vzduchovou atmosférou. Zde by bylo již evidentní, zda-li bylo na vině testování vzorků v termostatické lázni.

Závěr

Cílem této práce byla charakterizace tří sad tištěných flexibilních termistorů. Charakterizace proběhla úspěšně u všech třech, nicméně teoretickým předpokladům odpovídala pouze sada 1. Zbylé 2 sady neodpovídaly teoretickým předpokladům a jejich charakteristiky měly spíše charakter PTC termistorů. Tyto výkyvy mohly zapříčinit právě transparentní laky, které byly na tyto termistory aplikovány. Přínos této práce spočívá v eliminaci olejové lázně pro charakterizaci pro tyto dvě sady vzorků. Vhodná charakterizace by byla například v klimatické komoře nebo v suché testovací cele se vzduchovou atmosférou.

Tato diplomová práce byla rozdělena do tří samostatných částí, avšak stěžejní body diplomové práce obsahovala část tři.

První část diplomové práce byla zaměřena na konvenční typy termistorů. V úvodu byla věnovaná krátká pasáž historii termistorů. Následně byla popsána oblast využití konvenčních termistorů, jejich rozdělení a fyzikální podstata. Poté bylo popsáno materiálové složení, výroba a konstrukční provedení. Další část první kapitoly se zaměřila na základní parametry vlastnosti a následně byly představeny základní charakteristiky NTC a PTC termistorů. Předposlední část se zabývala obecnou možností kalibrace a její popis matematickými modely. Poslední část první kapitoly byla zaměřena na metody měření a s tím spojené určování klíčových parametrů termistorů.

Druhá část byla zaměřena na tištěnou flexibilní elektroniku. Jelikož tato část nebyla stěžejním výstupem této práce, nebylo jí věnováno tolik prostoru. Nicméně tato část práce popisovala konvenční flexibilní elektroniku, která je na bázi polyamidů a samotnou progresivnější flexibilní elektroniku, která je spíše na bázi polymer. Dále kapitola obsahovala

základní informace o tištěné elektronice a poslední část druhé kapitoly byla zaměřena na samotnou depozici termistorů.

Třetí a poslední část této práce obsahovala stěžejní body mé diplomové práce. První část pojednávala o materiálech a technologii výroby tištěných termistorů v poloprovodních podmínkách. Následně byla popsána a vysvětlena charakterizace tištěných termistorů a měřicí metoda. Dále proběhla statistická charakterizace jednotlivých sad termistorů, a to od nejnižší úrovně pro jeden samotný senzor až po celkové tři sady termistorů, které byly k dispozici. Poslední část se věnovala diskuzi nad výsledky. Podle teoretických předpokladů se chovala pouze sada 1, a to s největší pravděpodobností díky tomu, že tato sada nebyla nijak předem upravována. Sada 2 obsahovala transparentní lak a sada 3 obsahovala stříbrné pigmenty. Po diskuzi byla navržena metoda kalibrace senzorů pro výrobu.

Termistorové snímače detekují teplotu a jsou široce používány v různých technologiích, které se nacházejí v každodenním životě. Příkladem mohou být smartphony, počítače nebo domácí spotřebiče, kterými může být například klimatizace nebo automobil. Běžné termistory pracují v teplotním rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, avšak flexibilní tištěné termistory pracují v rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je patrné, že flexibilní termistory za nějakou dobu vytlačí běžně používané konvenční termistory. Je to právě flexibilita a tenkost snímače, která umožňuje například instalaci termistoru v malých mezerách a zakřivených oblastech mobilních zařízení, kde byla instalace dříve obtížná. Tímto směrem se nyní vydává stále více výrobců, a proto bude dle mého názoru za několik let běžná konvenční elektronika včetně termistorů vytlačena do pozadí běžné elektroniky.

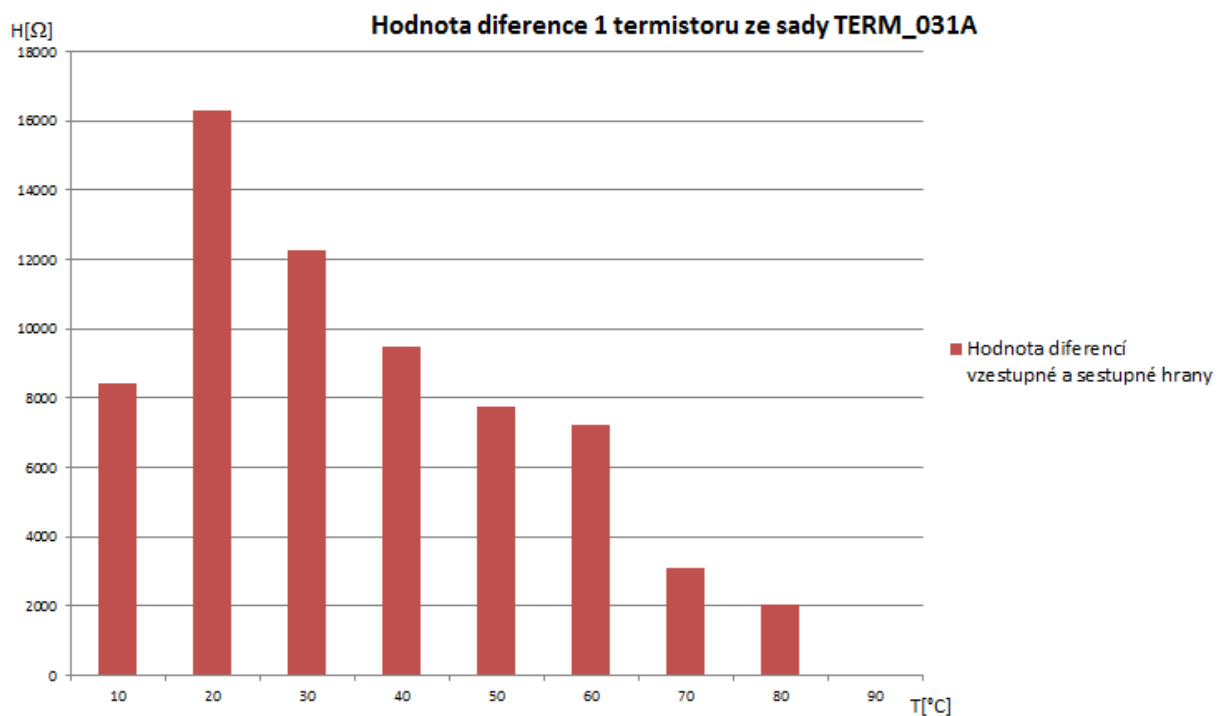
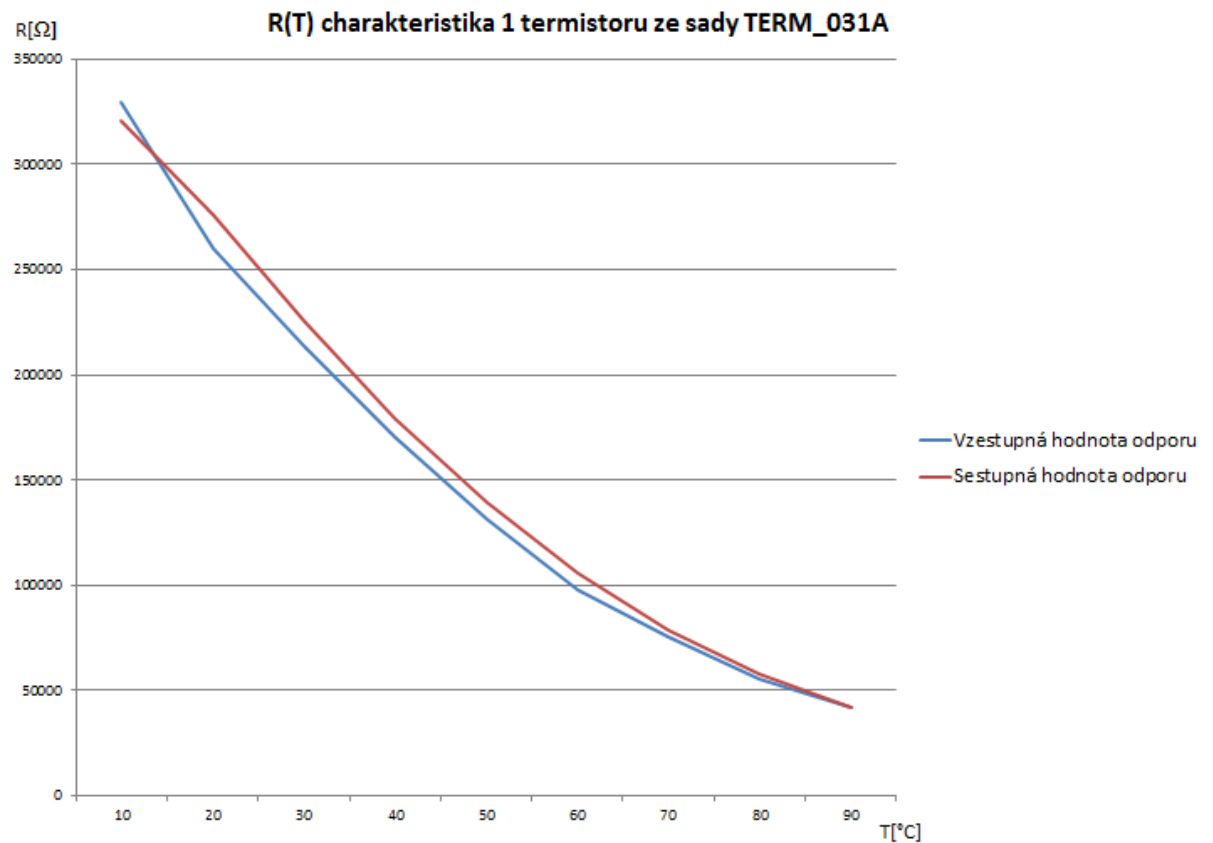
Seznam literatury a informačních zdrojů

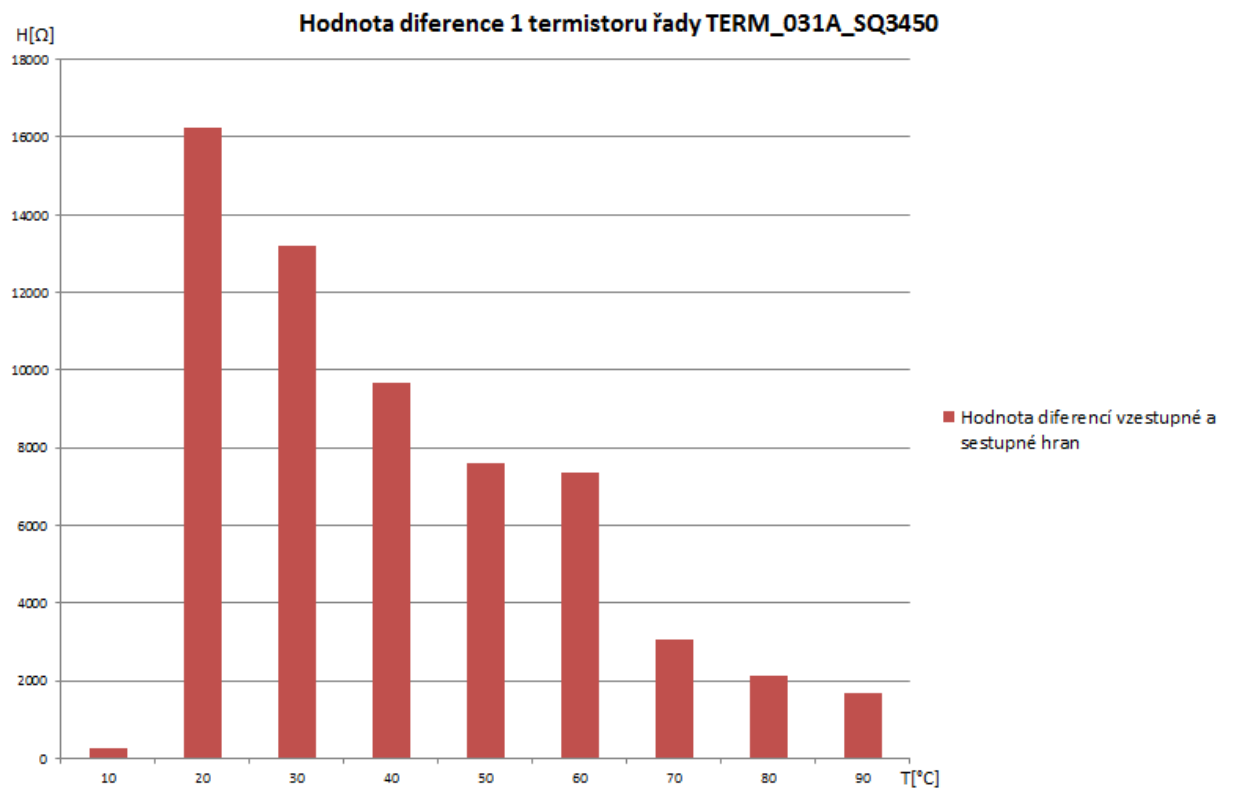
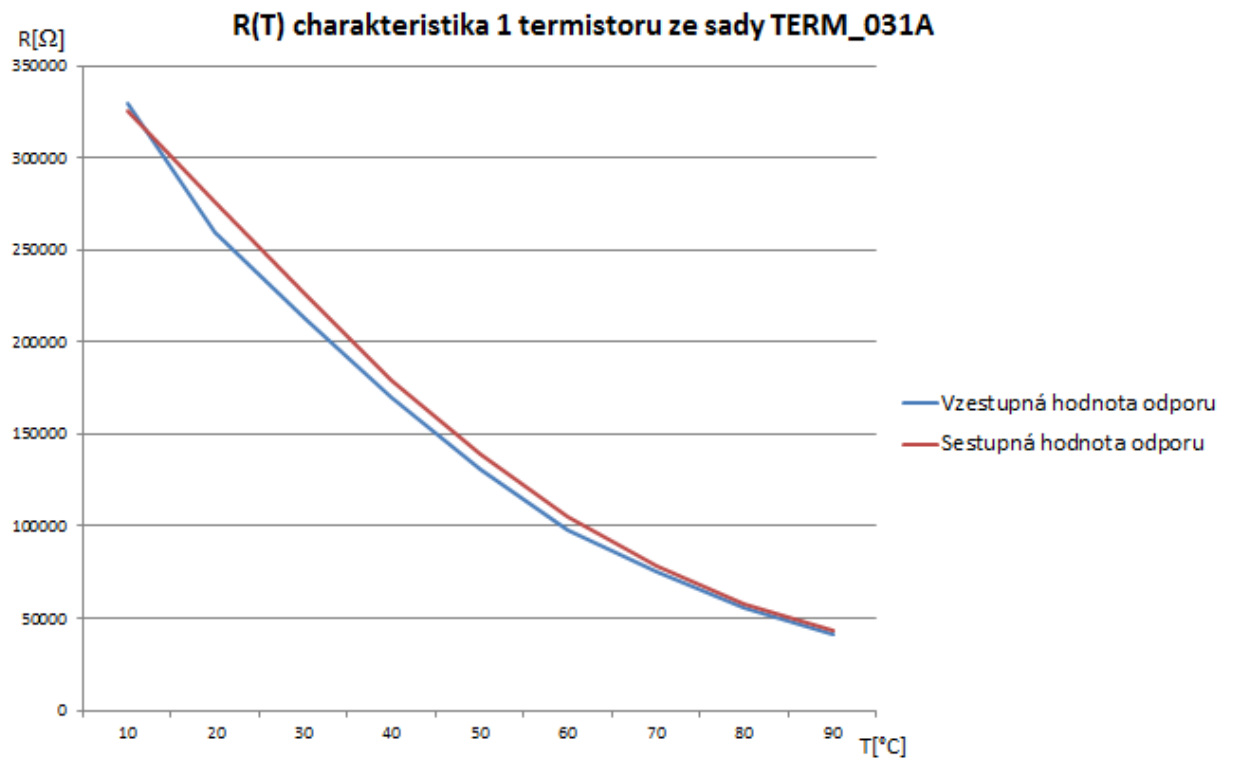
- [1] Thermistor: History. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>
- [2] Termistory: Teoretický úvod. [Http://352lab.vsb.cz](http://352lab.vsb.cz) [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: http://352lab.vsb.cz/serverfinalver/mastWEB/ulohy/4_term.htm
- [3] NTC and PTC Thermistors. [Http://www.vishay.com/](http://www.vishay.com/) [online]. 2007 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/33016/engnote.pdf>
- [4] Polovodiče: Termistory. [Http://www.ferity.cz](http://www.ferity.cz) [online]. Šumperk: S.P.Pramet, 1990 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://www.ferity.cz/termistory/negohm.pdf>
- [5] Thermistors: Advantages and Disadvantages. [Http://automationwiki.com](http://automationwiki.com) [online]. 2010 [cit.2016-11-20]. Dostupné z: <http://automationwiki.com/index.php?title=Thermistors>
- [6] FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 4th ed. New York: Springer, c2010. ISBN 978-144-1964-663.
- [7] Termistor. In: [Https://cs.wikipedia.org](https://cs.wikipedia.org): the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termistor>
- [8] WHAT IS A THERMISTOR?: Termistor. [Http://www.ussensor.com/](http://www.ussensor.com/) [online]. 1832 W. Collins Ave, 2016 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://www.ussensor.com/technical-info/what-is-a-thermistor>
- [9] Thermistor Calibration and the Steinhart-Hart Equation. [Https://assets.newport.com](https://assets.newport.com) [online]. 31950 Frontage Road, 2006 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: https://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/AN04_Thermistor_Calibration_IX.PDF
- [10] REICHEL, Jaroslav a Martin VŠETEČKA. Termistory. *Elektrina a magnetismus: Elektrický proud v polovodičích*. 2012, 2006-12(269), 1.
- [11] Thermistor: Properties of Thermistors. [Http://www.electrical4u.com/](http://www.electrical4u.com/) [online]. [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://www.electrical4u.com/thermistor-definition-properties-construction-characteristics-and-applications/>
- [12] Měření teploty: Polovodičové odporové senzory teploty. [Http://vyvoj.hw.cz/](http://vyvoj.hw.cz/) [online]. HW server, 2004 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [13] I/V graph of Thermistor: Thermistor (Negative Temperature Coefficient Type, NTC). *Mini Physics*. 2012, , 1.
- [14] SUCHÝ, Josef. Měřicí modul pro chladicí orkuh: Měřicí obvod pro termistor. Plzeň, 2011/12.
- [15] Flexible electronics. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_electronics.
- [16] HU, Jupiter. *Overview of Flexible Electronics from ITRI's Viewpoint* [online]. Taiwan, 28.10.210n. 1., (1), 1 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5469608>
- [17] JONES, Steve. *Printed electronics Ltd: What is Printed Electronics* [online]. 2010, , 49 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/microsites/research/iemrc/documents/EventsDocuments/5th%20Annual%20Conference%202010/Presentations/Jones%20Printed%20Electronics.pdf>
- [18] Printed electronics. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA):

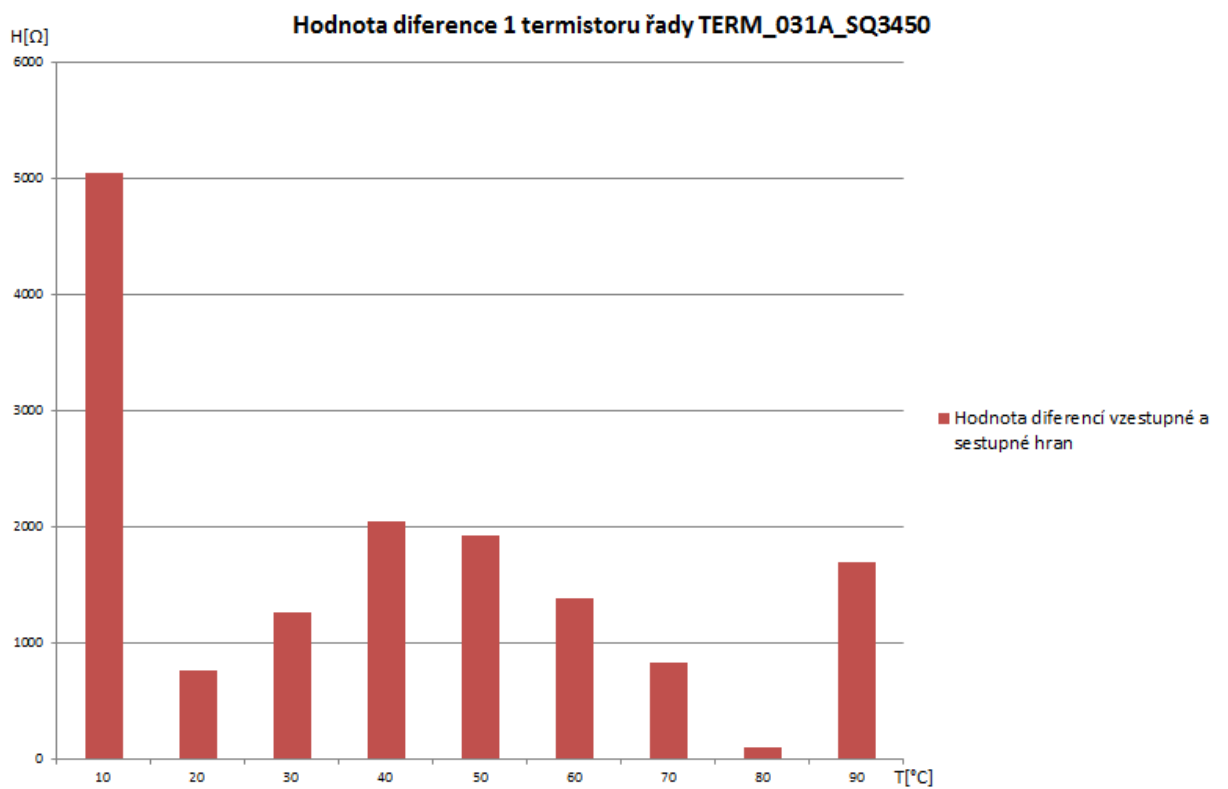
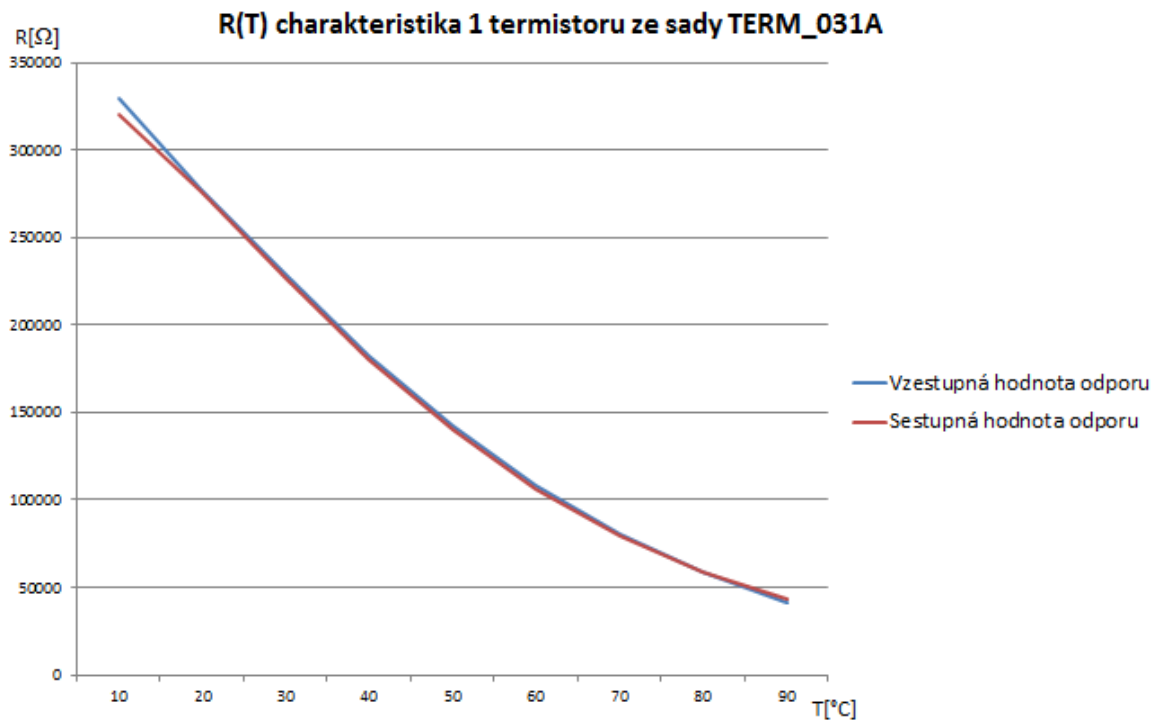
- Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Printed_electronics
- [19] Printed electronics: technologies, challenges and applications. *PARC* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <https://www.parc.com/publication/2566/printed-electronics.html>
- [20] *PTC Thermistor* [online]. 2014 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/thermistor/ptc/r16e.ashx>
- [21] Flexible Substrates for Electronics Applications. *Www.polyonics.com* [online]. [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.polyonics.com/FlexibleSubstrates/>
- [22] AGNIHOTRI, Pratihtha, Monika JAIN a Ruchita BAJPAI. *Flexible Electronics: Revolutionizing the Electronics World* [online]. , 3 [cit. 2017-03-16]. ISSN 2230-7109. Dostupné z :<http://www.iject.org/vol4/spl4/c0134.pdf>
- [23] Two-Wire vs. Four-Wire Resistance Measurements: Which Configuration Makes Sense for Your Application? *Http://www.tek.com* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/document/resources/2Wire_4Wire%20Resistance%20Article.pdf
- [24] *Připojení senzoru Pt100 k Papagu* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.papouch.com/cz/shop/product/pt100-kov-90-250/>
- [25] Voltage dependence of resistance. *Https://www.epcos.co* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.epcos.co.jp/download/539056/d78540dfe0589d2bd90cabef477c90b9/pdf-general-technical-information.pdf>
- [26] *Thin Solid Films: Low-temperature synthesis of anatase thin films on glass and organic substrates by direct deposition from aqueous solutions* [online]. [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssc.200778895/abstract>
- [26] *Continuous roll-process technology for transferring and packaging flexible LSI*. *Https://phys.org* [online]. 2016 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2016-08-roll-process-technology-packaging-flexible-lsi.html>
- [27] Thin and thick film: Thin Film Technology. *Http://www.resistorguide.com/thin-and-thick-film/* [online]. [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.resistorguide.com/thin-and-thick-film/>
- [28] GT Series –Glass Sealed NTC Thermistor. *Http://www.exsense.cn* [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://www.exsense.cn/productshow_21.htm/
- [29] NTC Thermistors, SMD 0402, 0603, 0805, 1206 Chip. *Http://www.vishay.com* [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/33008/nths.pdf>
- [30] Leadless NTC Thermistor Die Suitable for Wire Bonding. *Http://www.vishay.com* [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/29153/ntccx00e4.pdf>
- [31] THERMISTOR CONDUCTION MODEL. *Http://www.idc-online.com* [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Thermistor_Conduction_Model.pdf
- [32] NTC Thermistors, Steel Capped Sensors. *Http://www.vishay.com* [online]. [cit. 2017-3-23]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/29066/ntcaimme.pdf>
- [33] T040 Series. *Https://www.thermistor.com* [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <https://www.thermistor.com/sites/default/files/T040.pdf>
- [34] NTC sensor elements: Temperature measurement up to 650

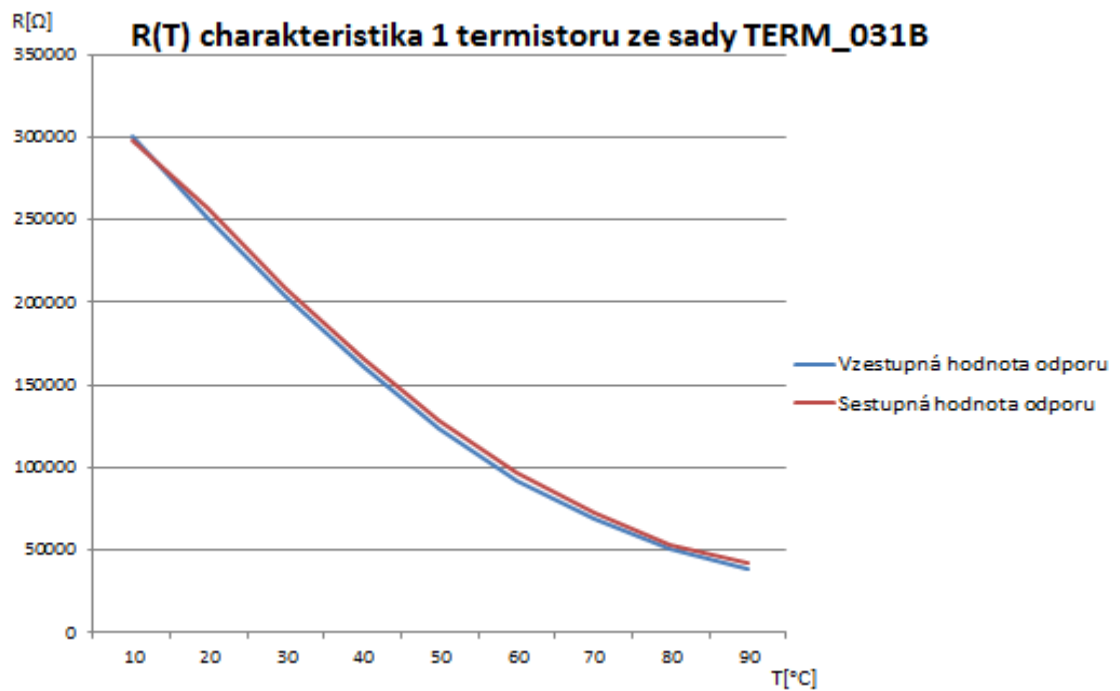
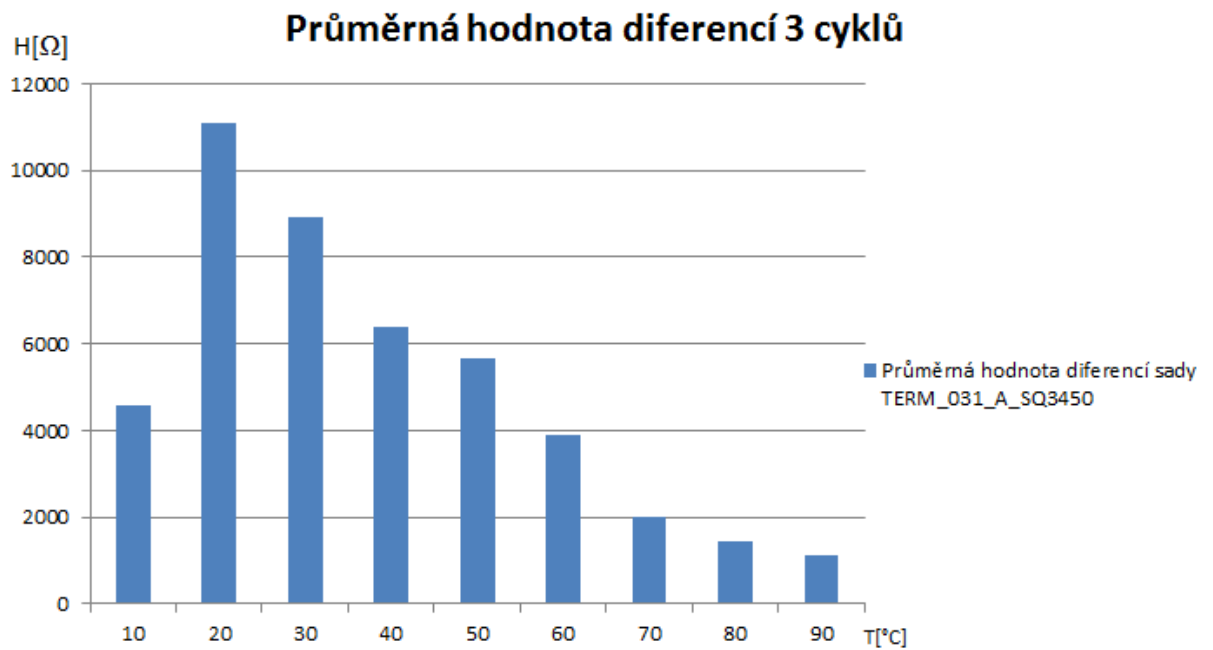
- °C. <https://en.tdk.eu> [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <https://en.tdk.eu/373388/company/press-center/press-releases/press-releases/ntc-sensor-elements--temperature-measurement-up-to-650--c-/1317632>
- [35] Thermistor Calculator. <http://www.thinksrs.com> [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.thinksrs.com/downloads/programs/Therm%20Calc/NTCCalibrator/NTCcalculator.htm>
- [36] NTC parameter calculator. <http://www.giangrandi.ch> [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.giangrandi.ch/electronics/ntc/ntcparam.html>
- [37] Typical characteristics of PTC Thermistors. <http://maocc.com> [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://maocc.com/pdf/hdk/e022100.pdf>
- [38] ADÁMEK, Martin, Edita HEJÁTKOVÁ, Marek NOVOTNÝ, Jan PRÁŠEK a Cyril VAŠKO. Moderní technologie elektronických obvodů a systémů: Laboratorní cvičení. Brno, 2011
- [39] TARR, Martin. Thick film technology. *The University of Bolton* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0255_tft/
- [40] KEITH E, Ewing a Herbst DARWYN. *Thermistor construction*. US3477055 A. Zapsáno 22. prosinec 1967.
- [41] AHMED, Moinuddin, Murali M. CHITTEBOYINA, Donald P. BUTLER a Zeynep CELIK-BUTLER. Temperature Sensor in a Flexible Substrate. *IEEE SENSORS JOURNAL*. 2012, (12), 6.
- [42] UHLAND, Scott, Jurgen DANIEL a Gregory WHITING. *Low temperature thermistor manufacturing process*. EP2506269 A1. Zapsáno 21. březen 2012.
- [43] NTC Thermistors Steinhart and Hart Equation. www.ametherm.com [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.ametherm.com/thermistor/ntc-thermistors-steinhart-and-hart-equation>
- [44] *SRS Thermistor Calculator* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.thinksrs.com/downloads/programs/Therm%20Calc/NTCCalibrator/NTCCalculator.htm>
- [45] 5640 Series Thermistor Standards Probes. <http://eu.flukecal.com> [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://eu.flukecal.com/products/temperature-calibration/probes-sensors/thermistors/5640-series-thermistor-standards-probes?quicktabs_product_details=1

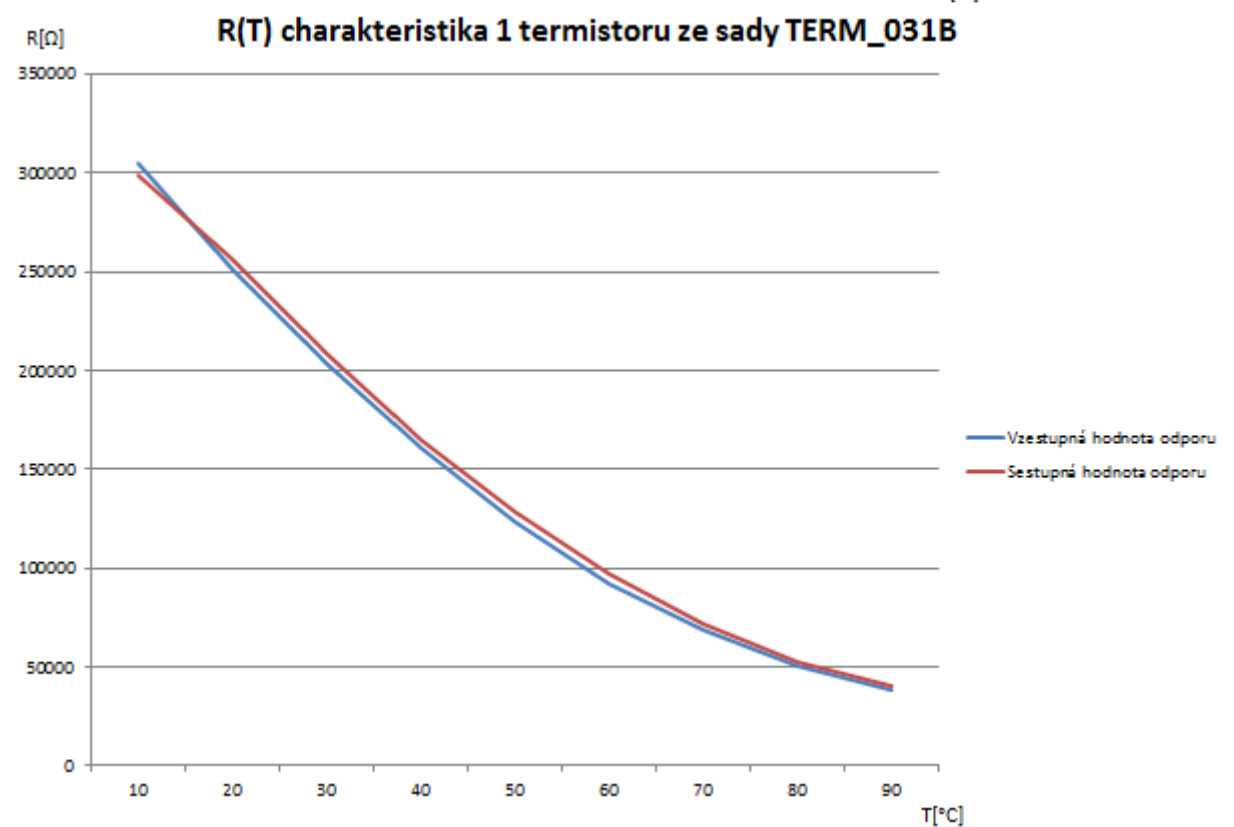
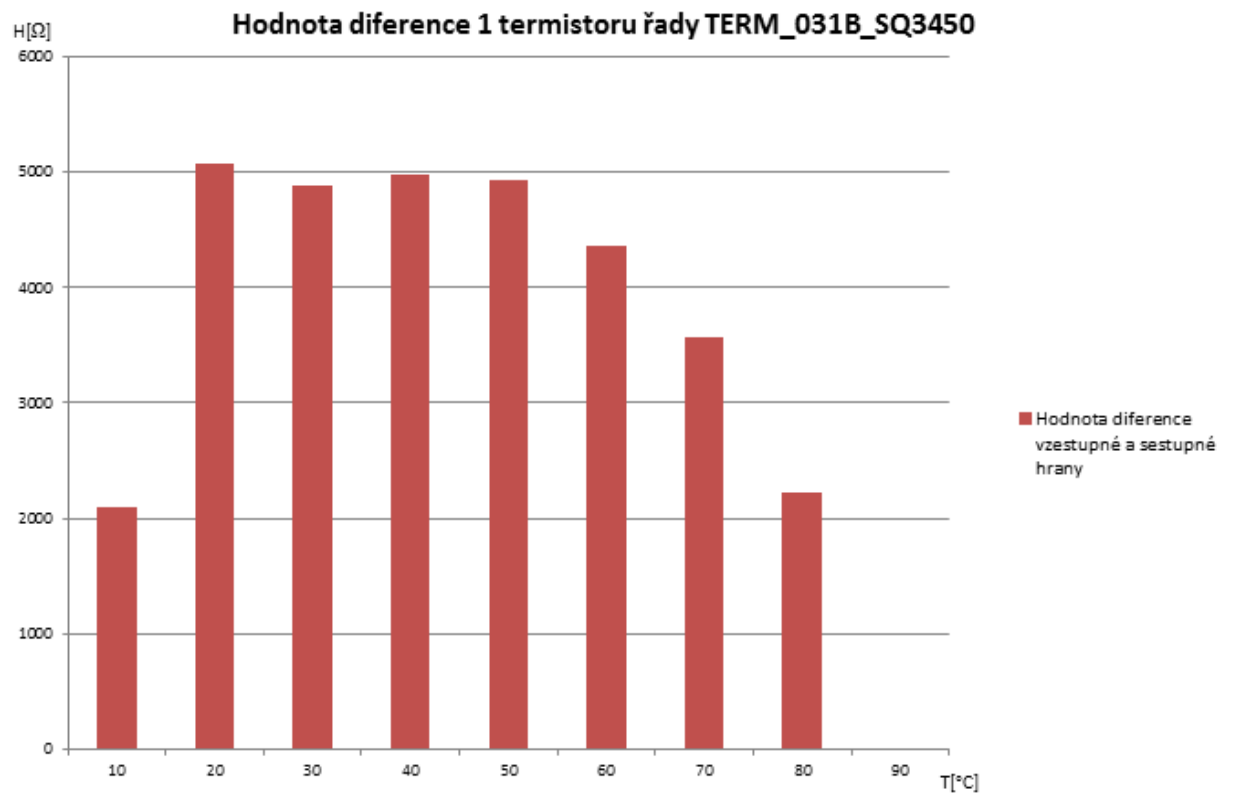
Přílohy

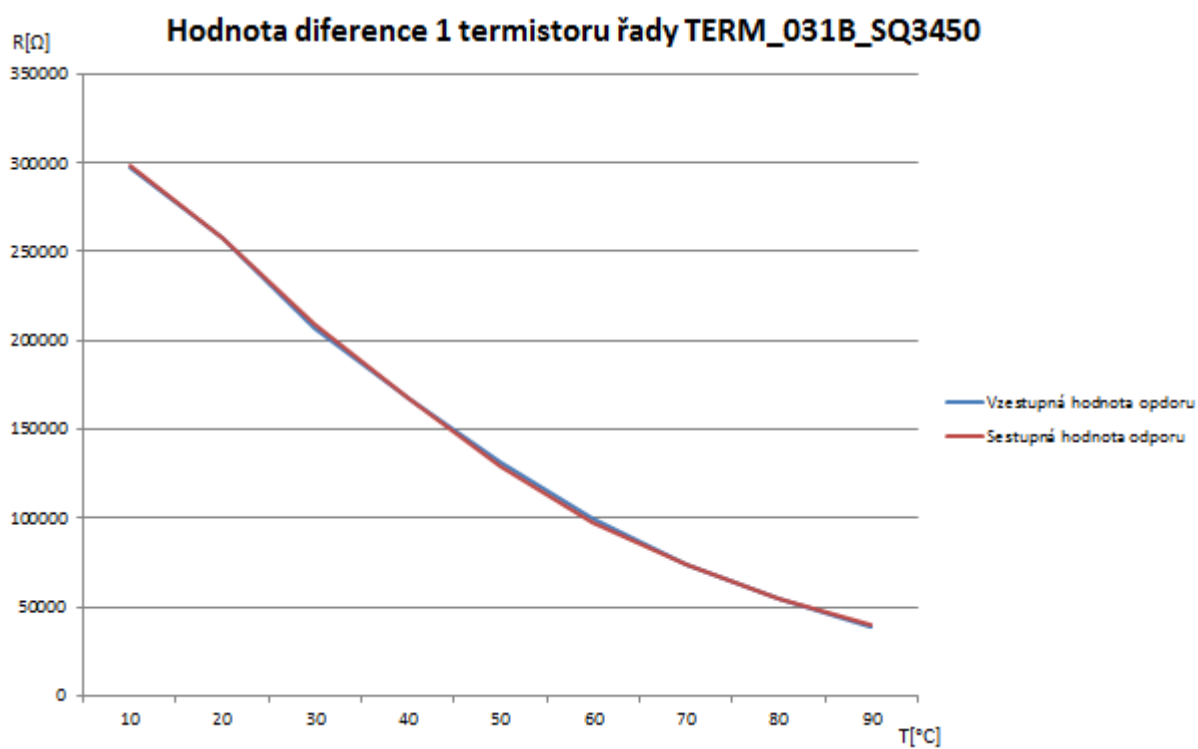
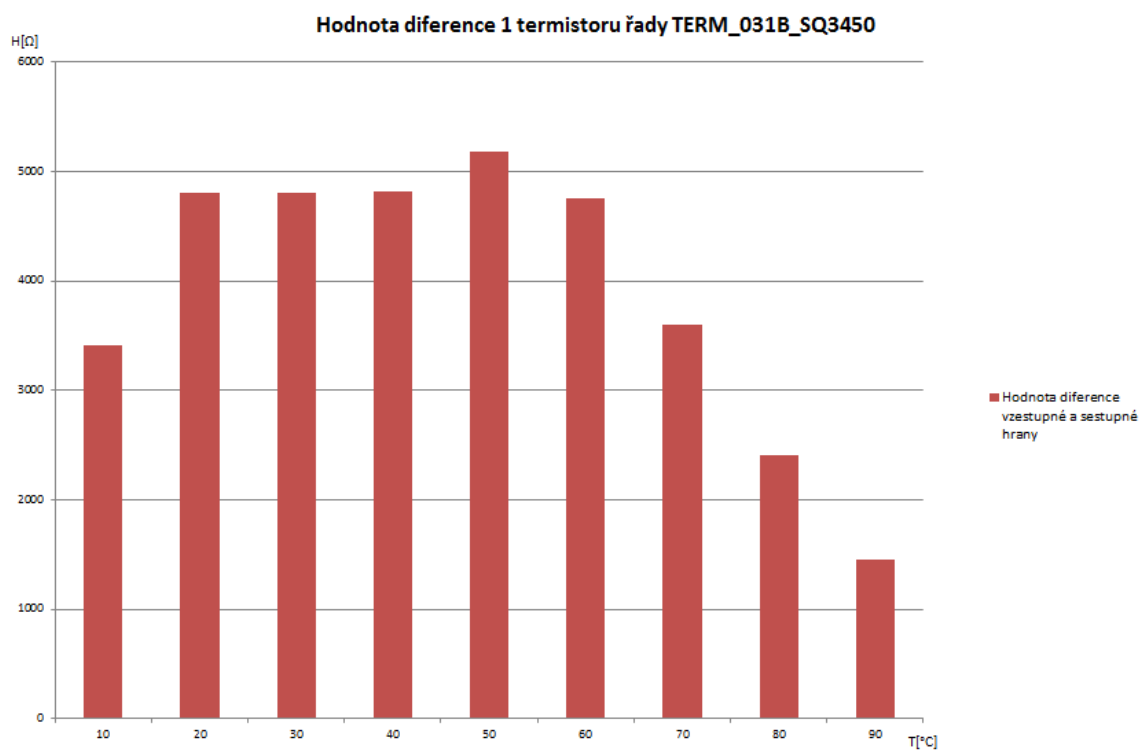




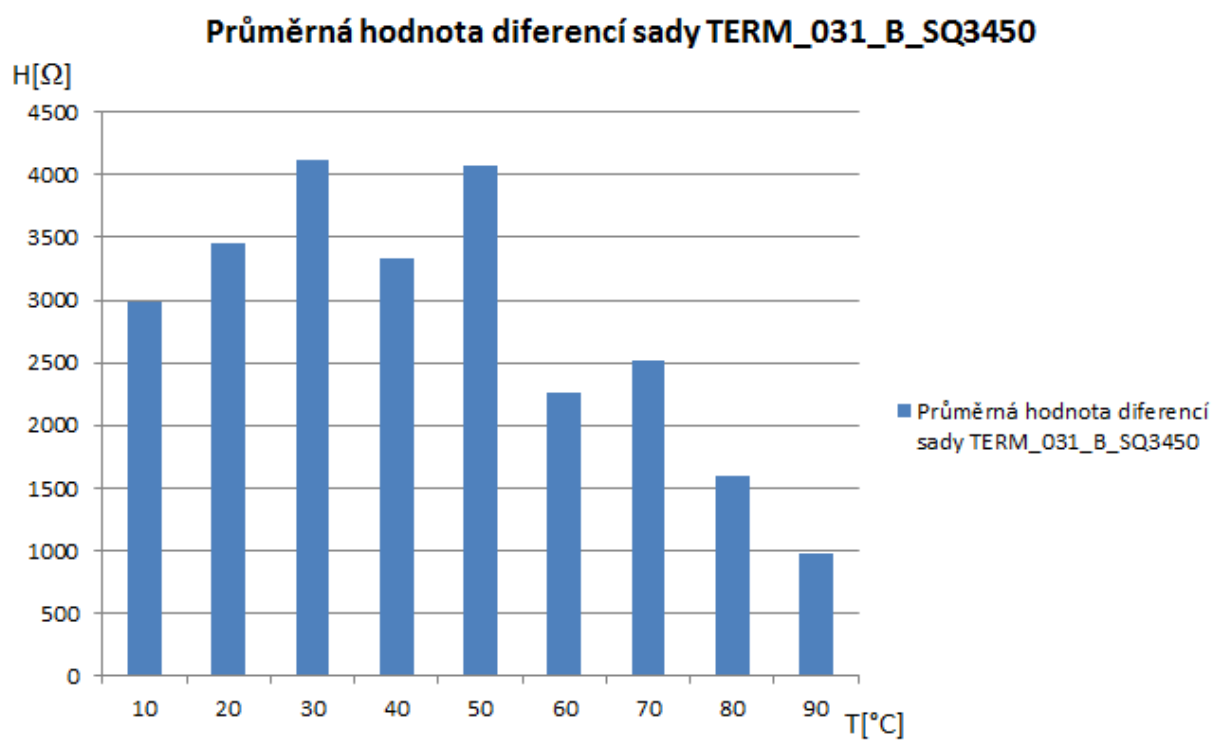
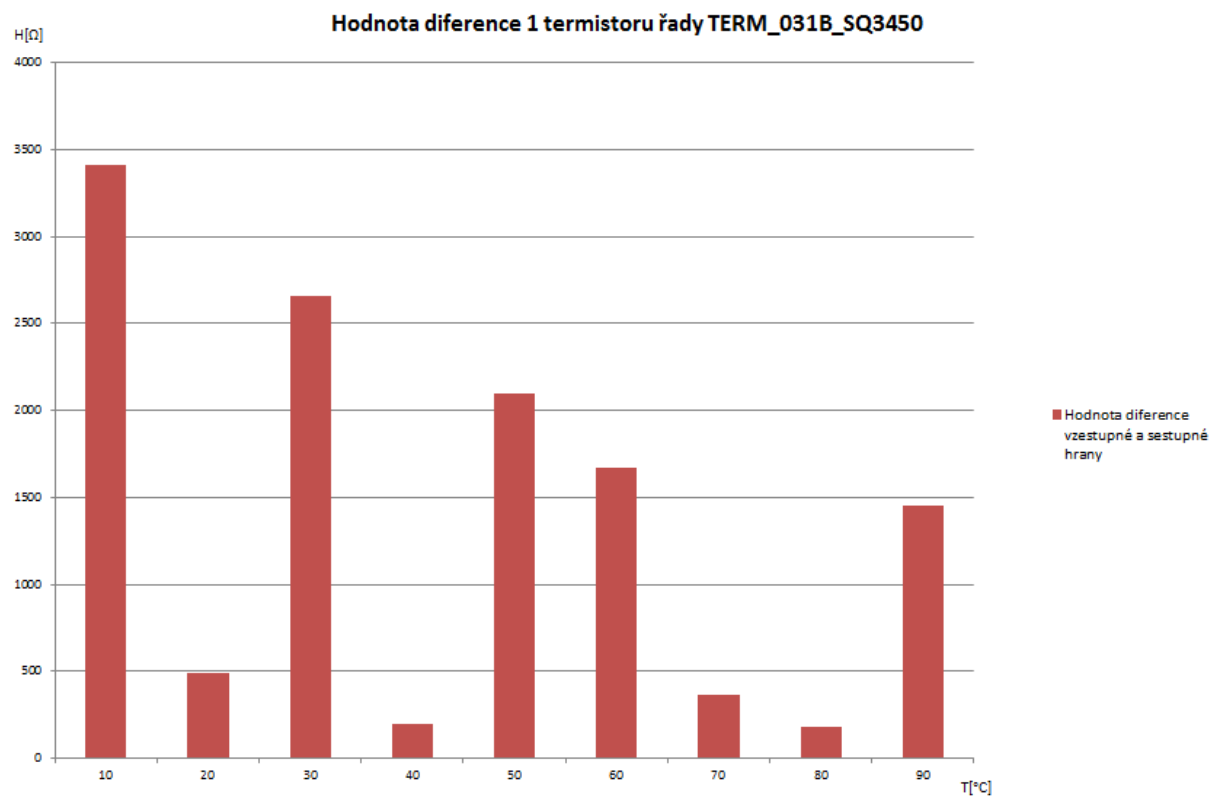


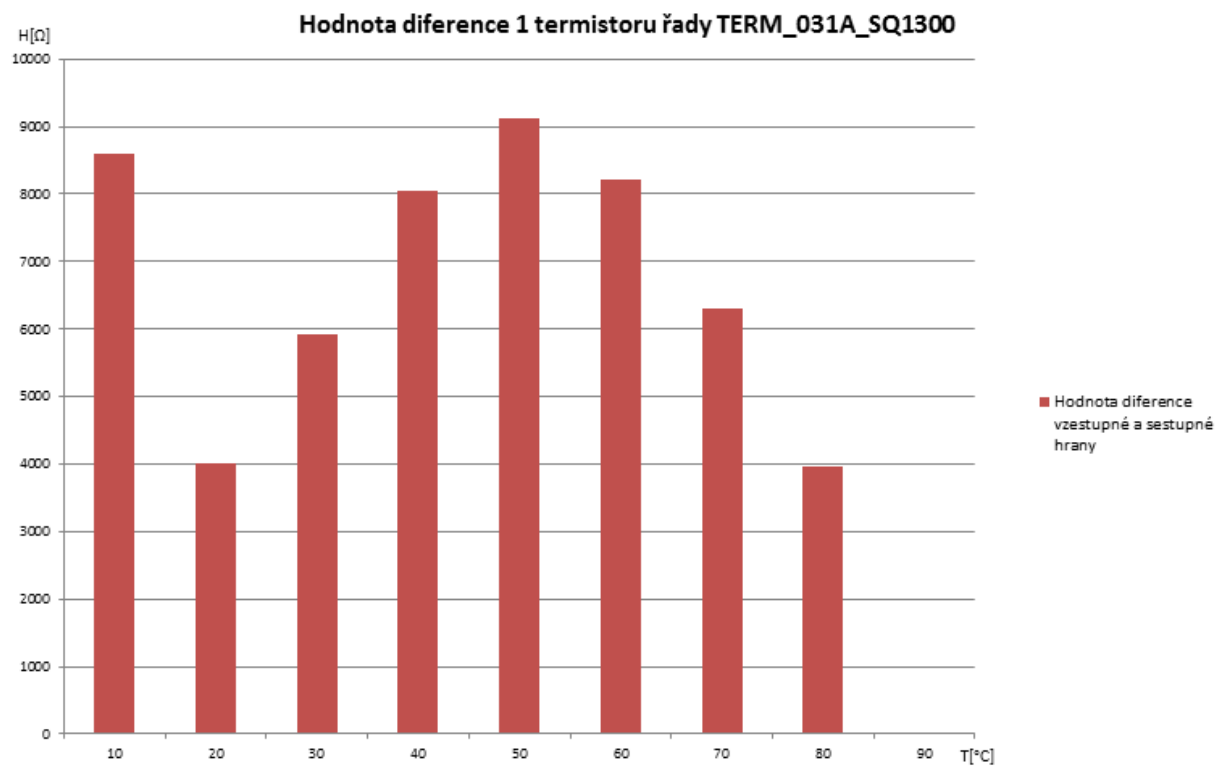
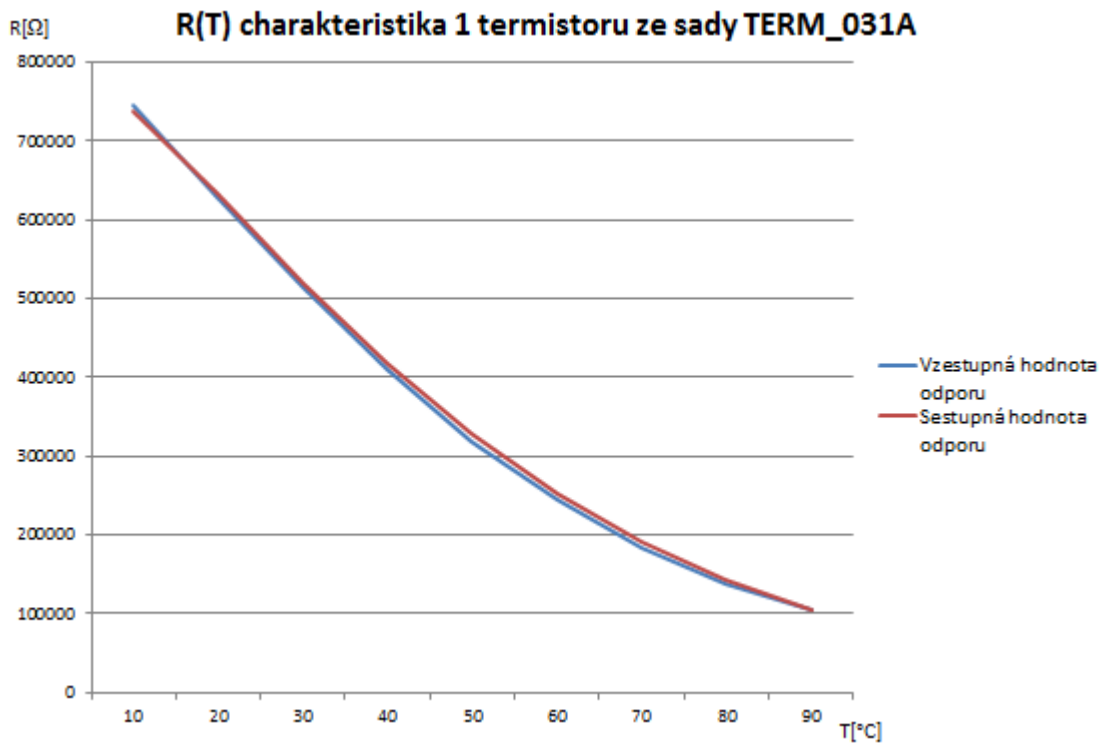


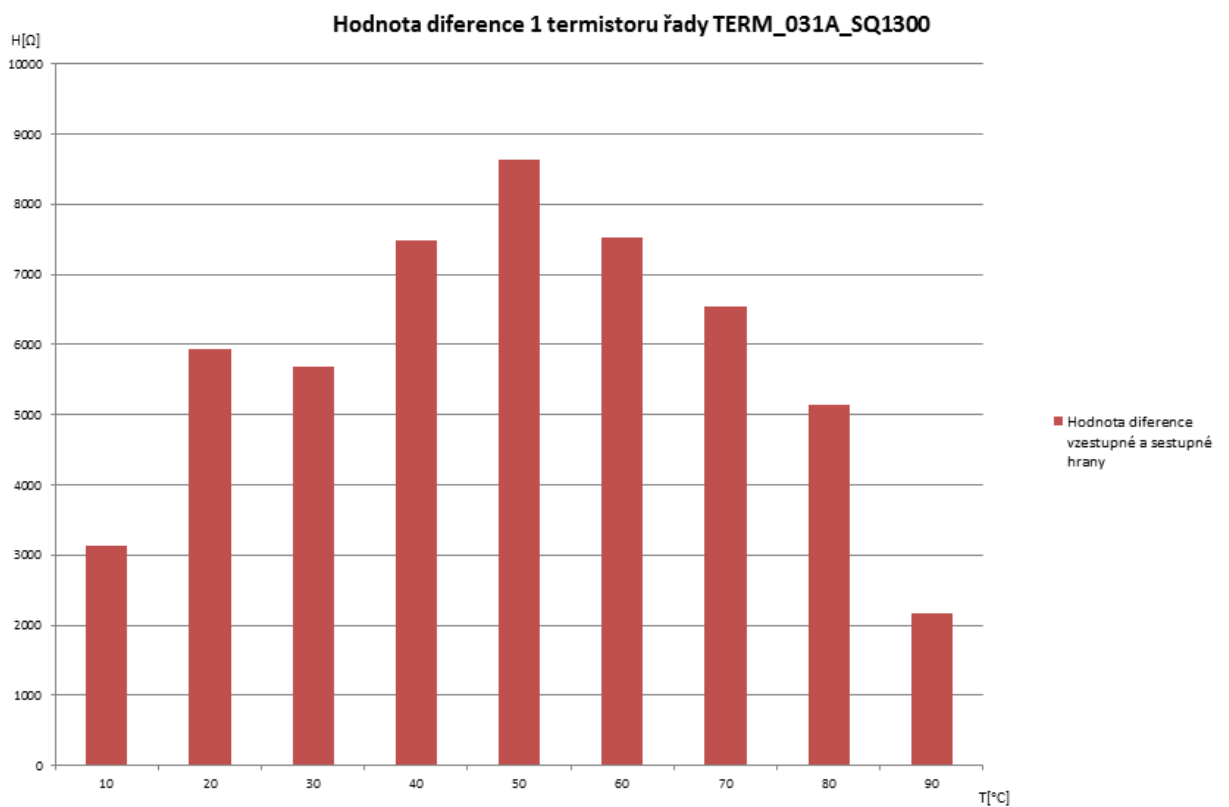
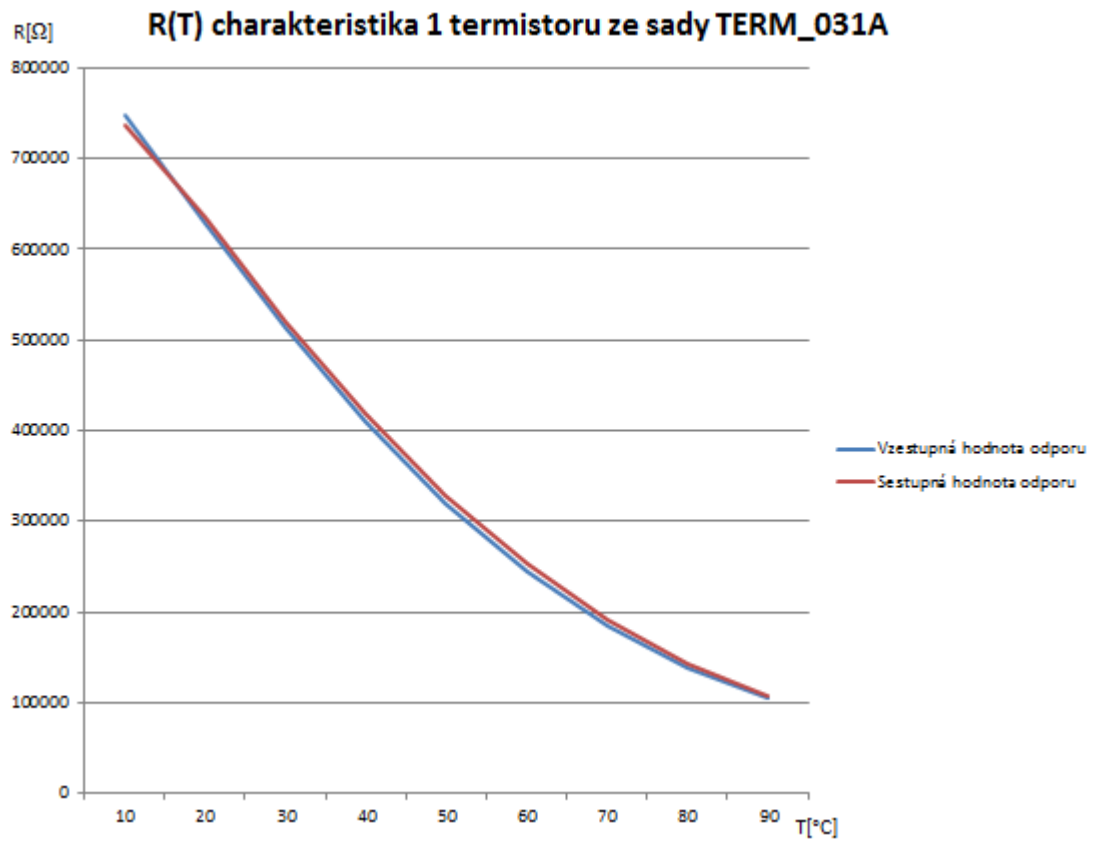


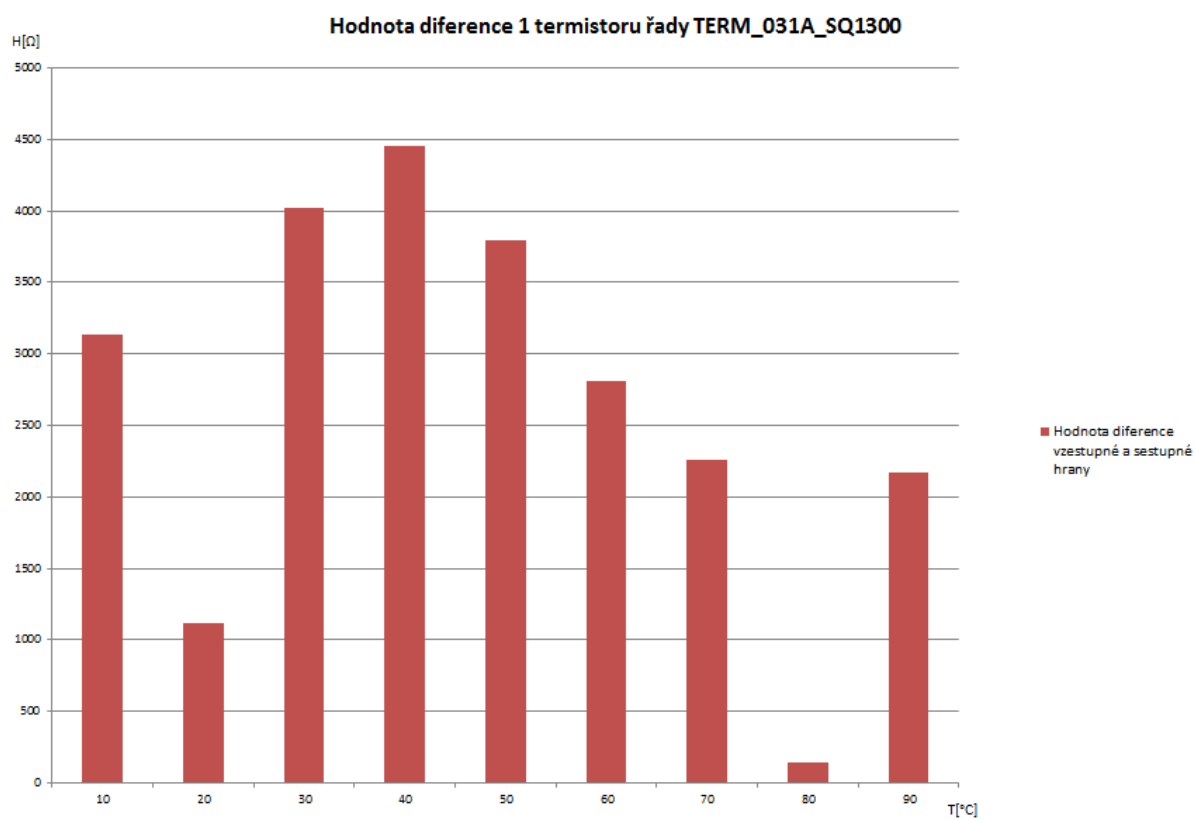
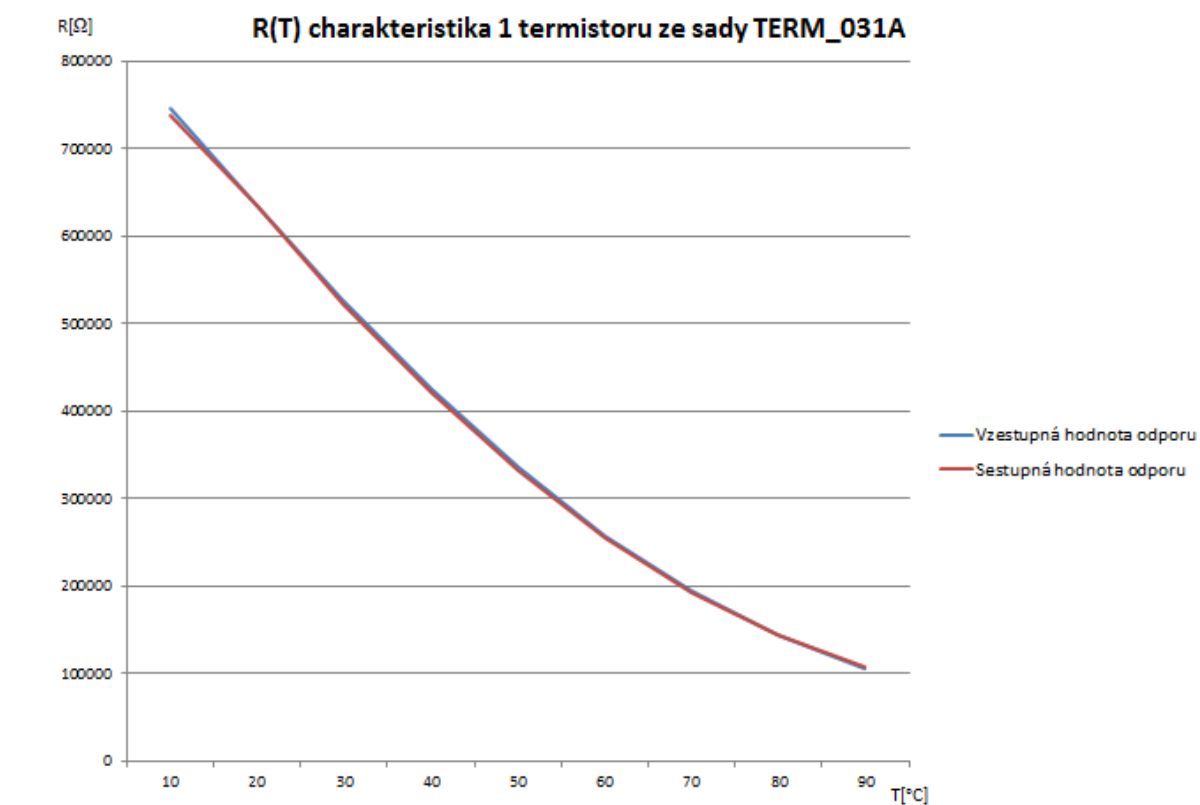


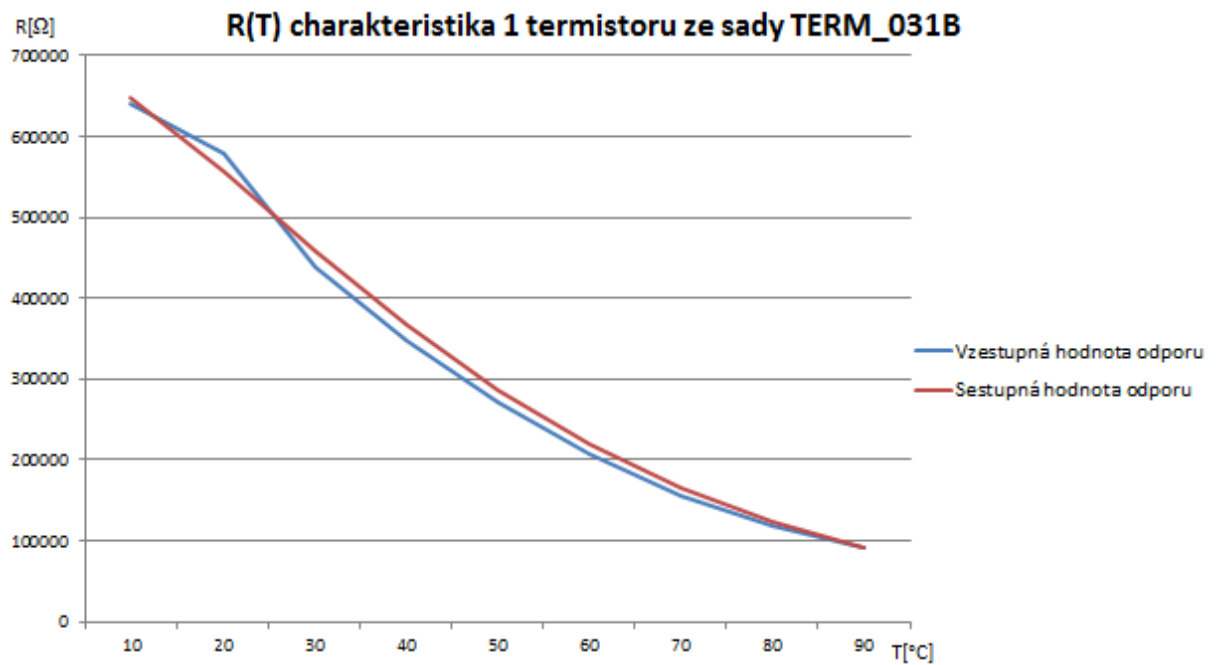
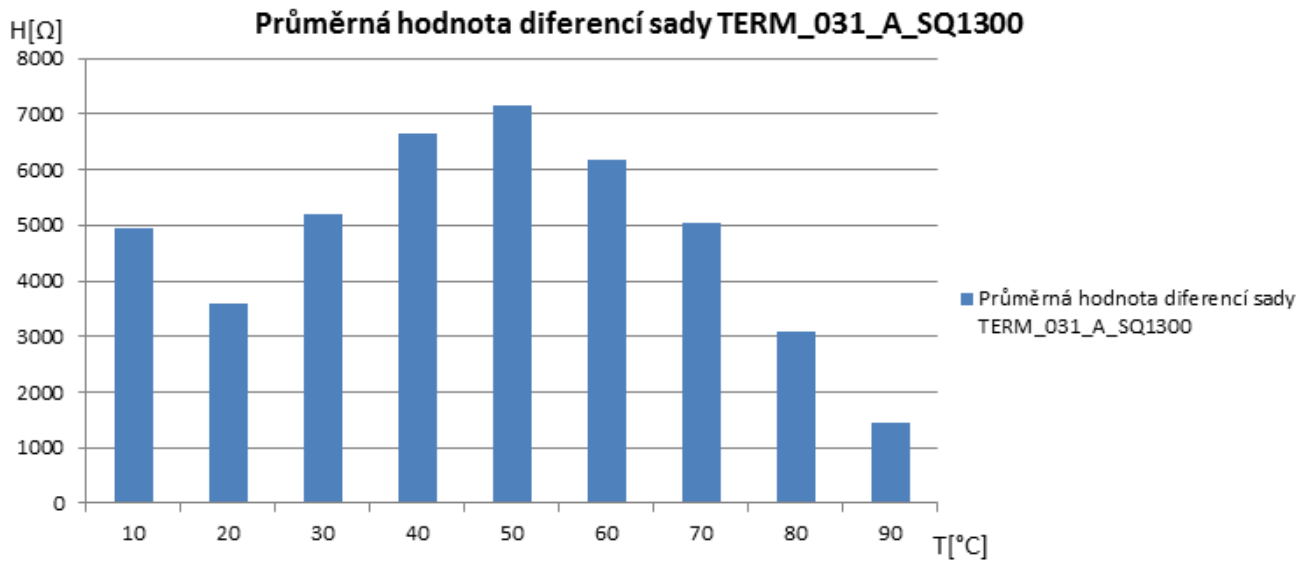
3450

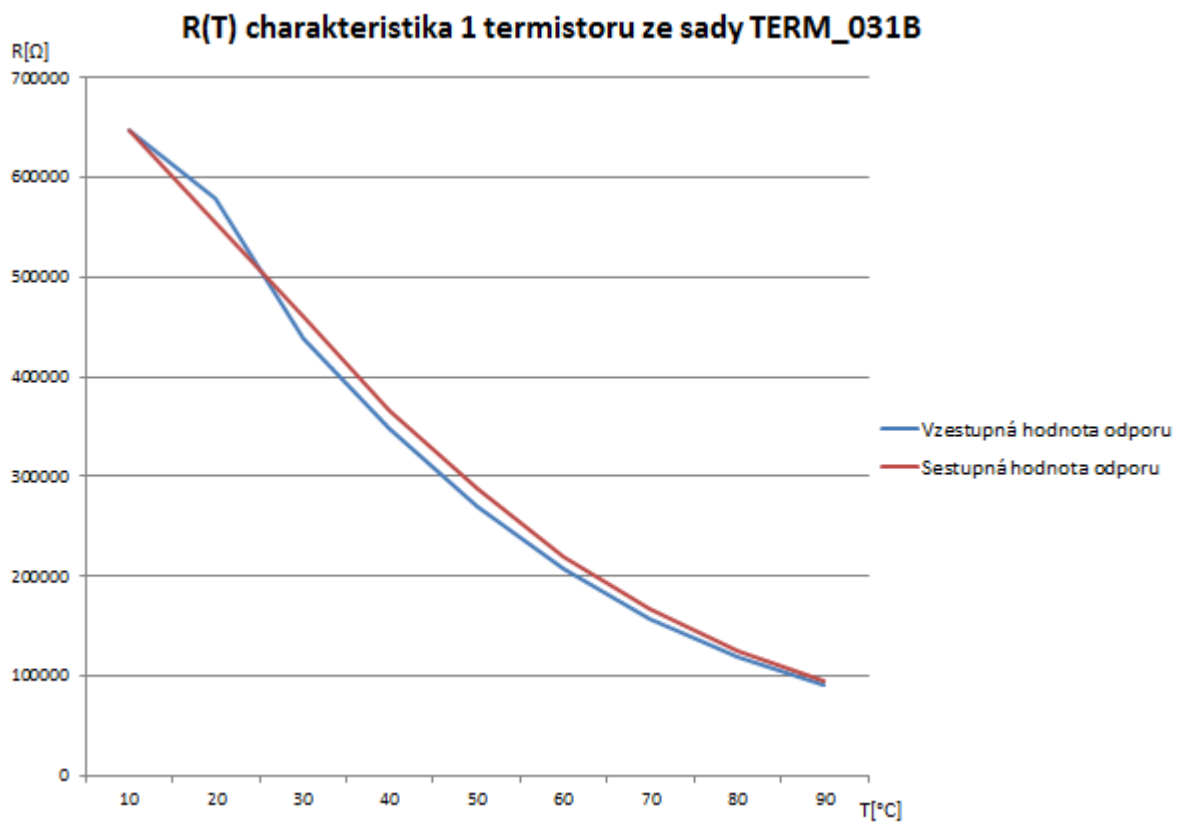
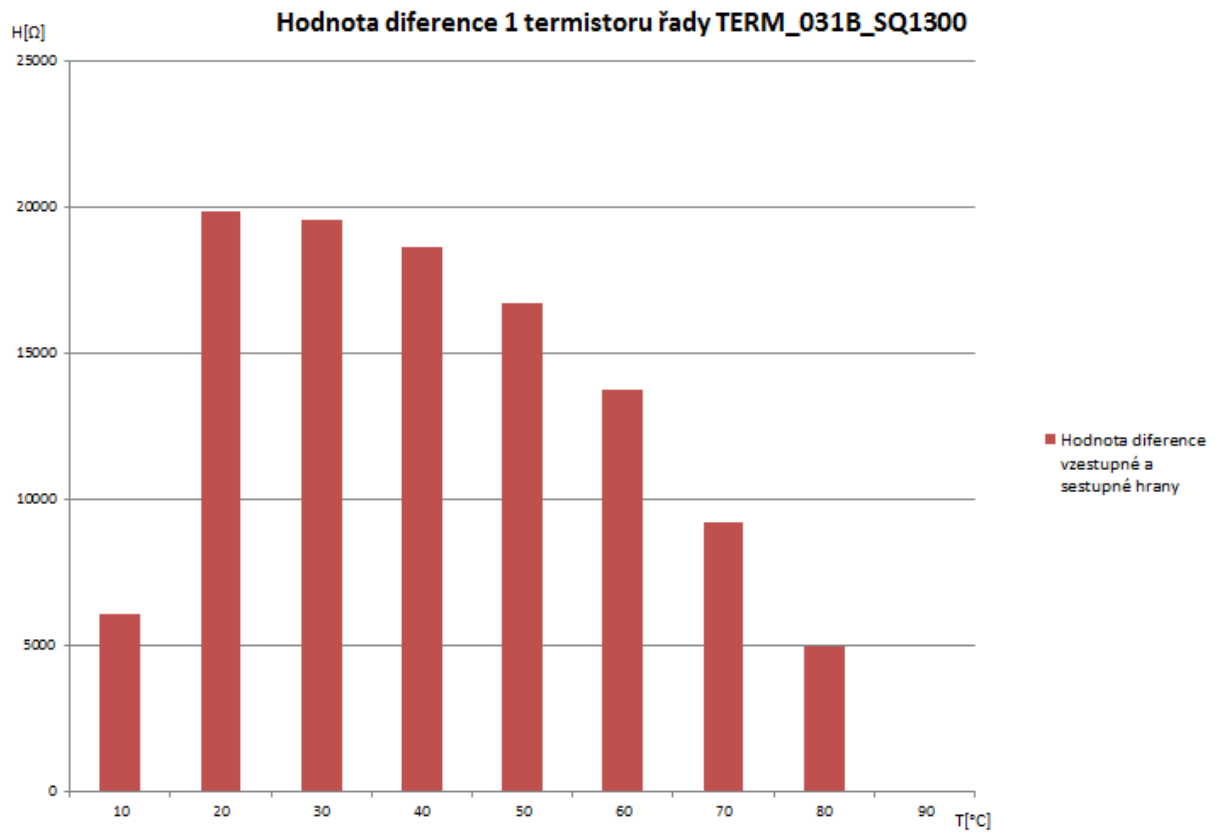


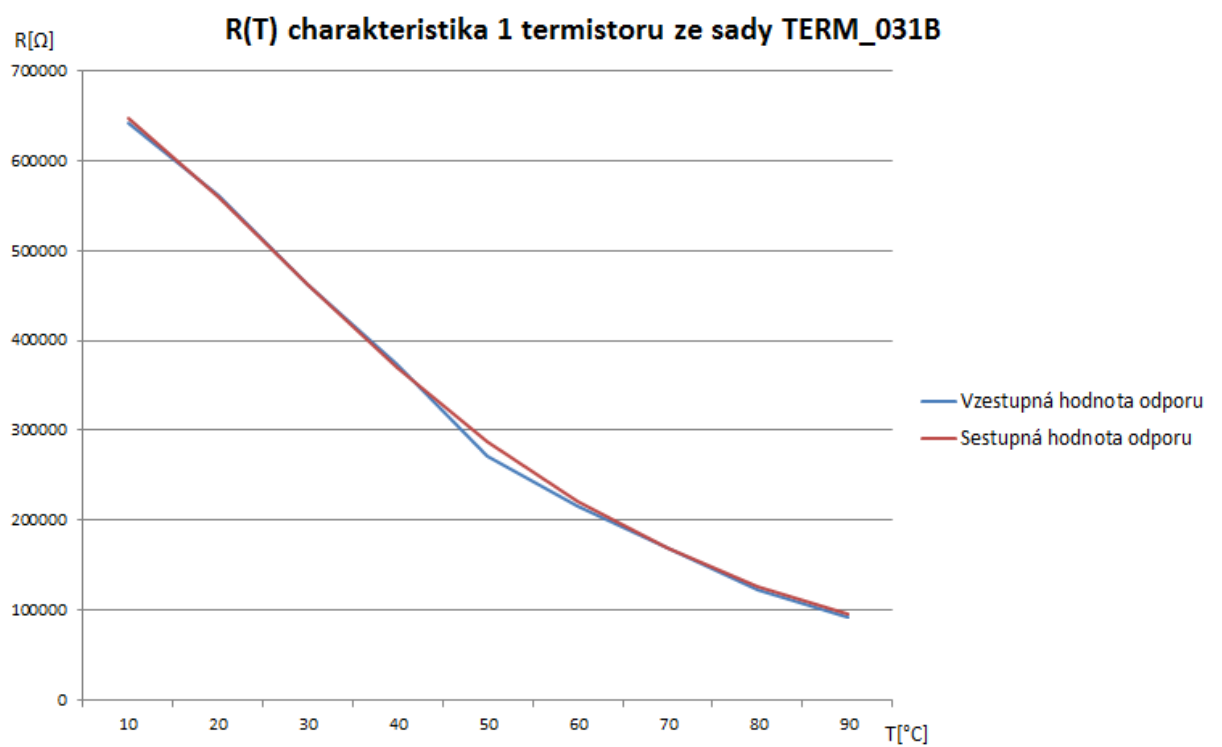
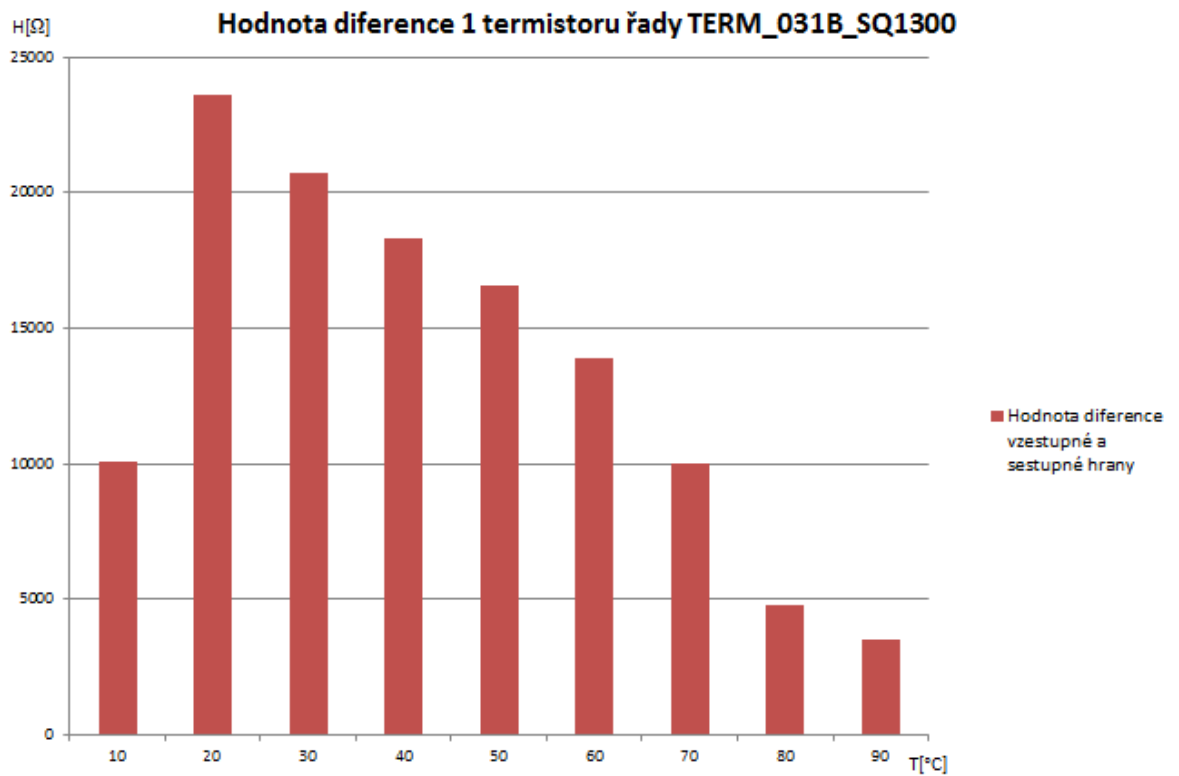


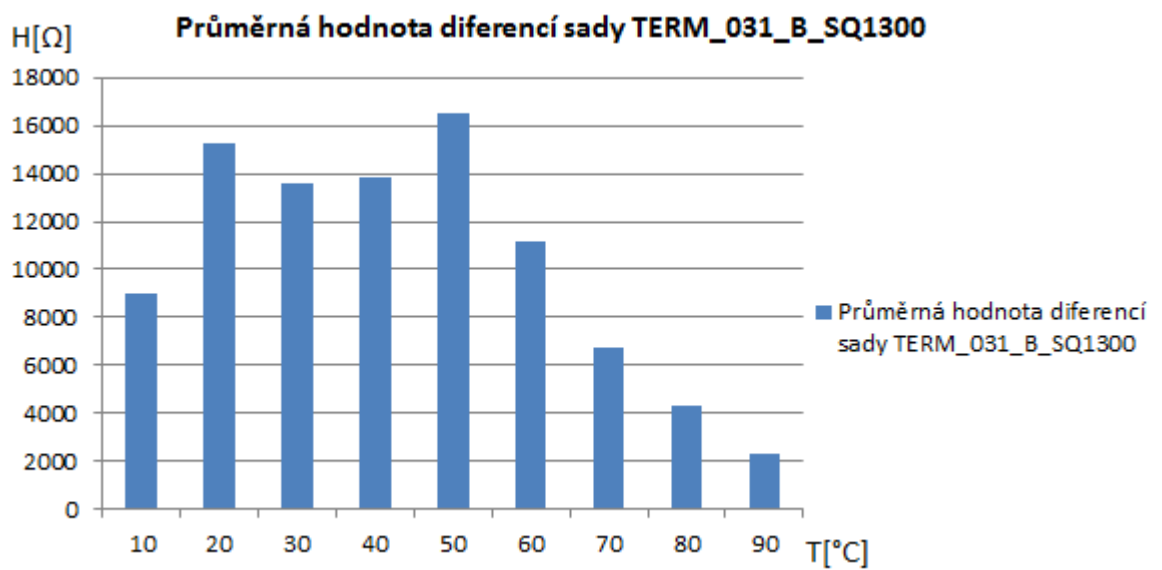
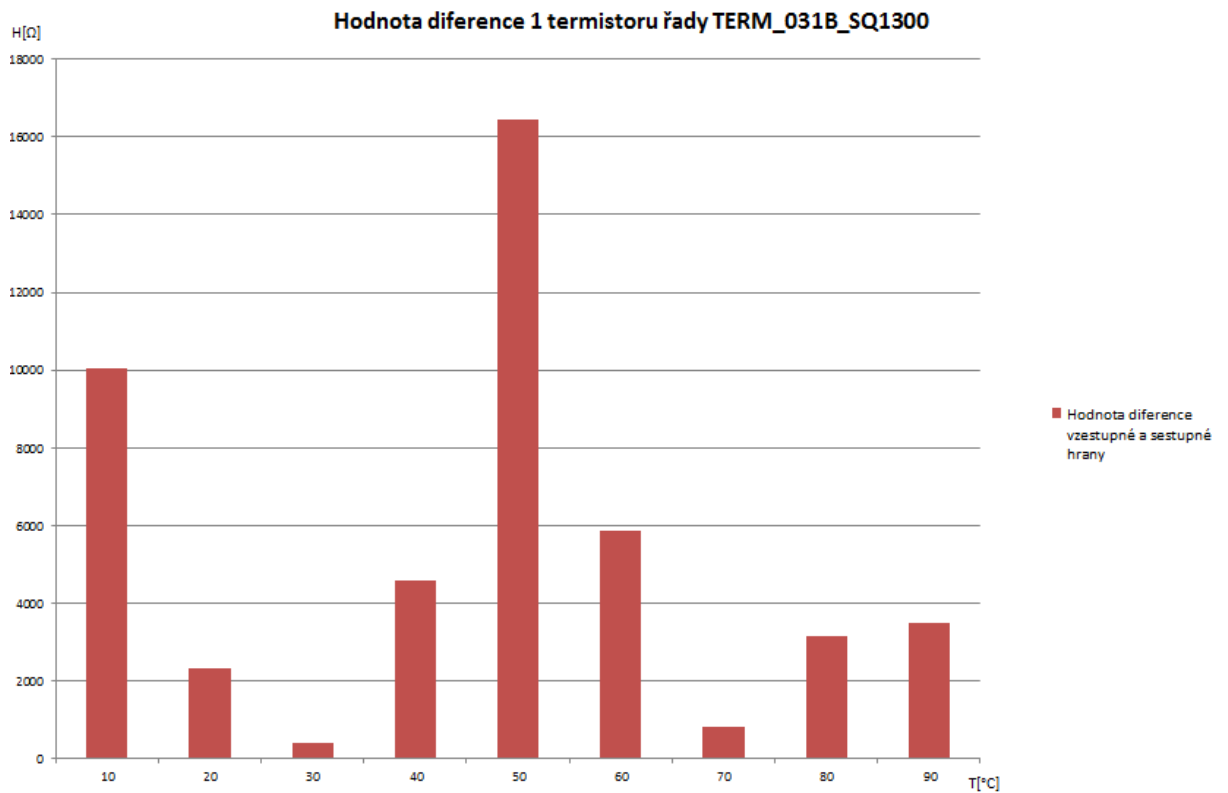




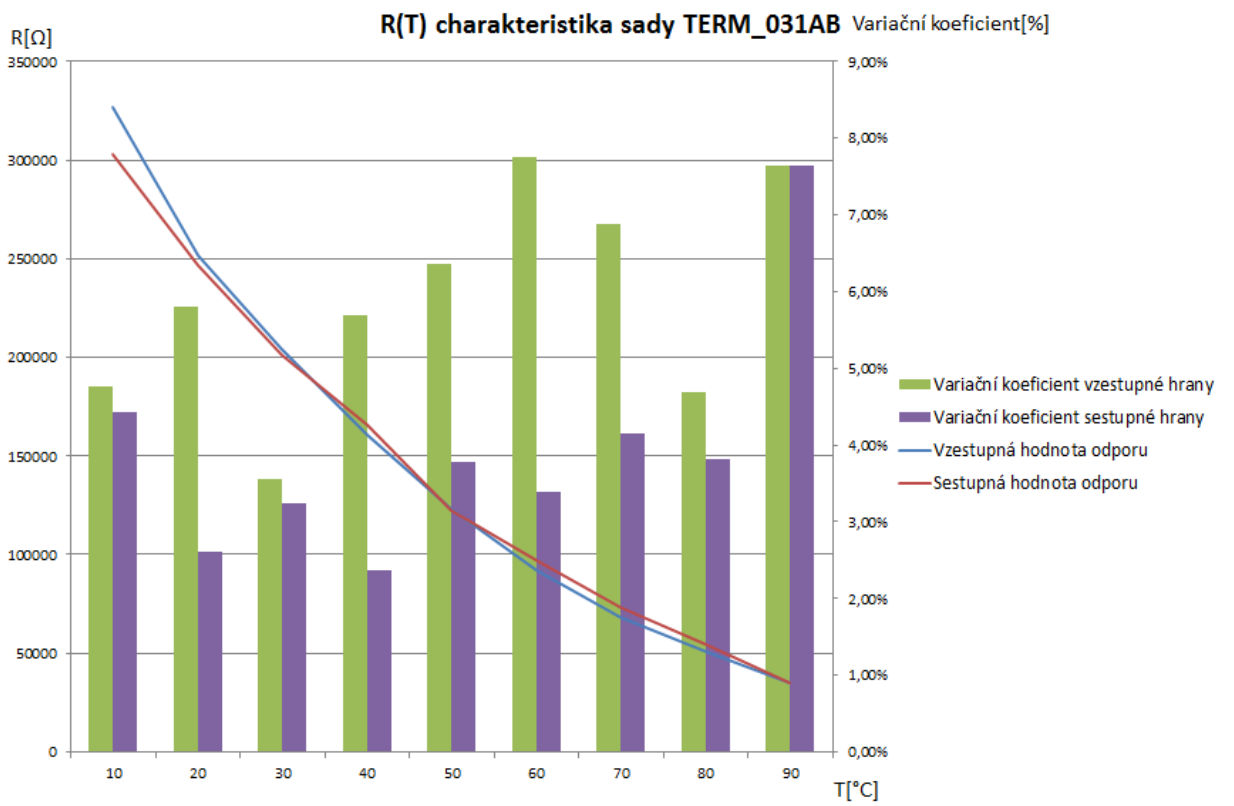
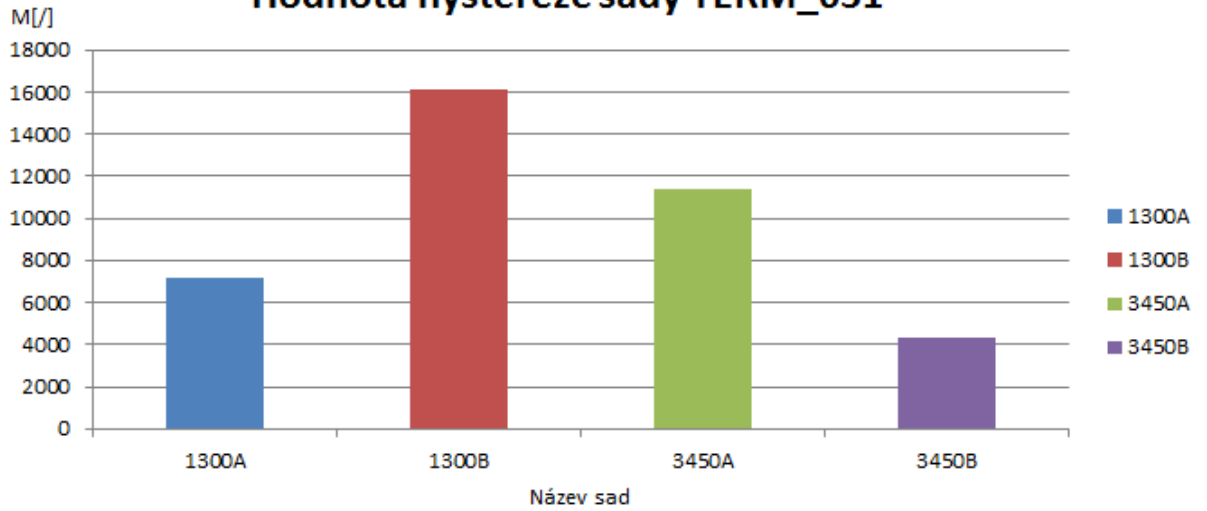


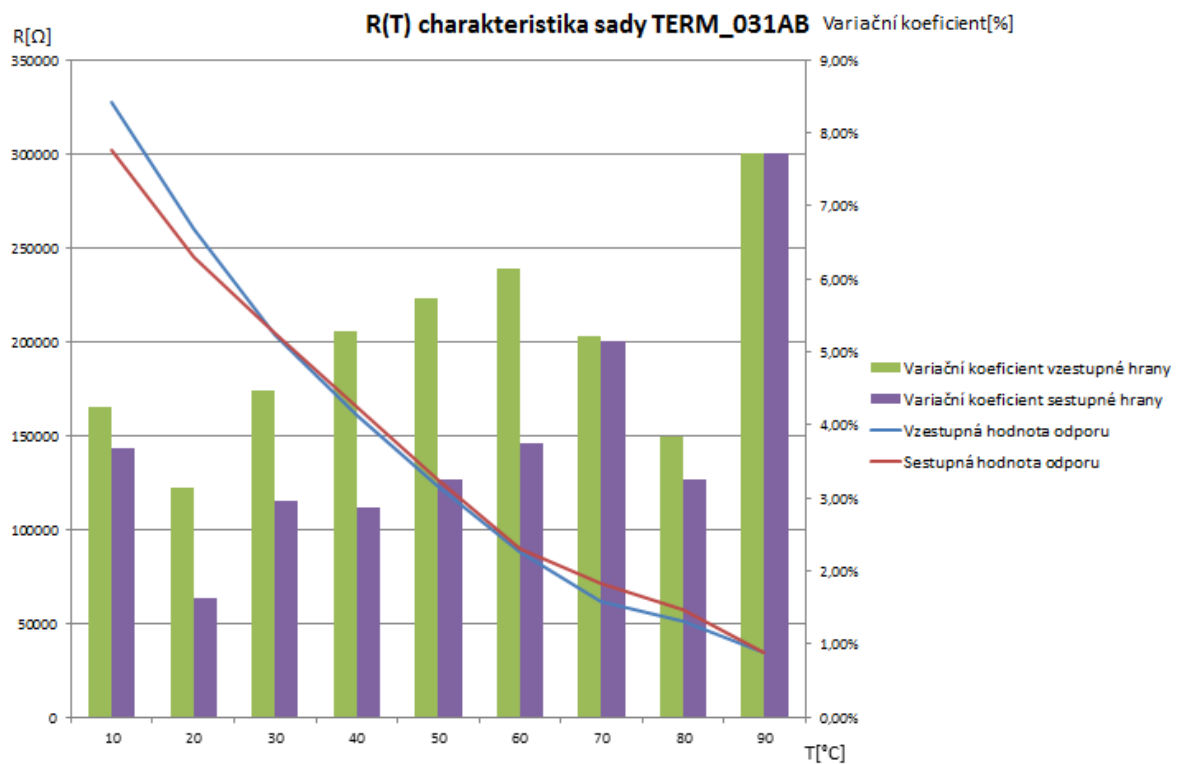
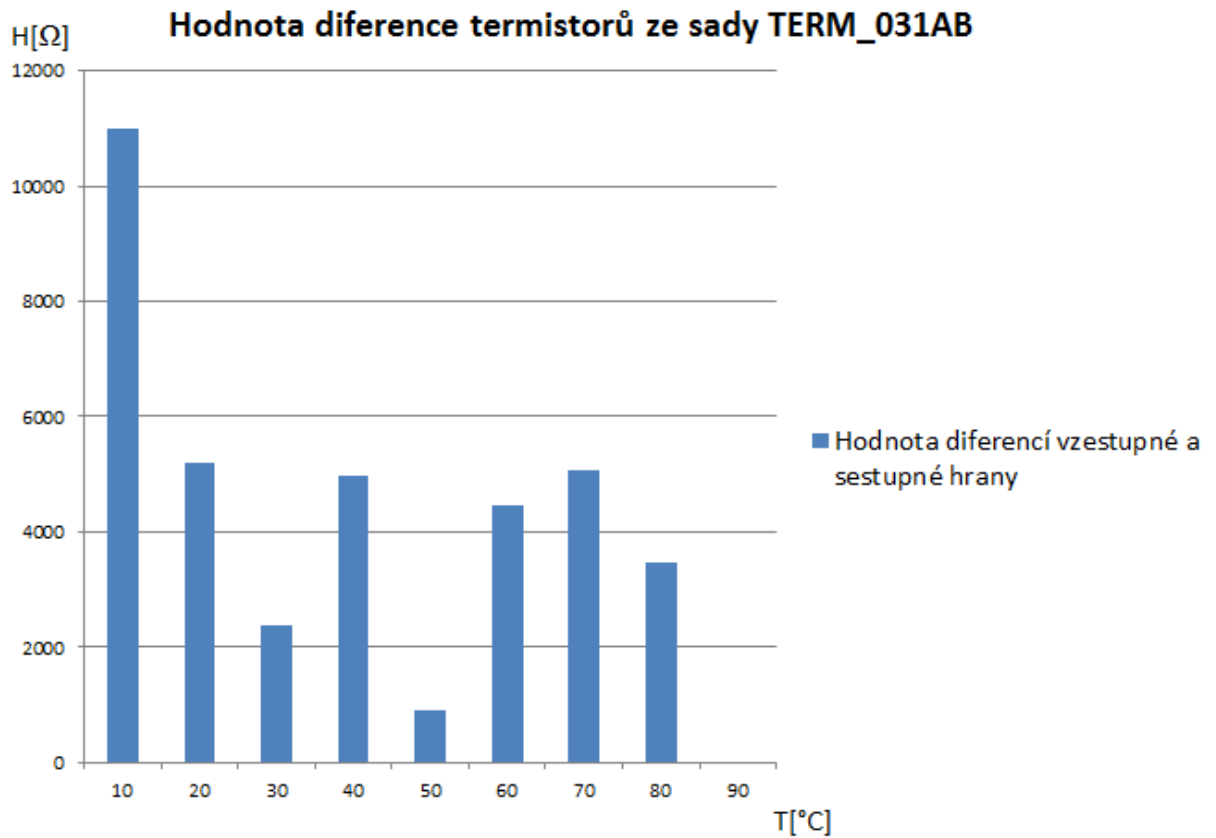


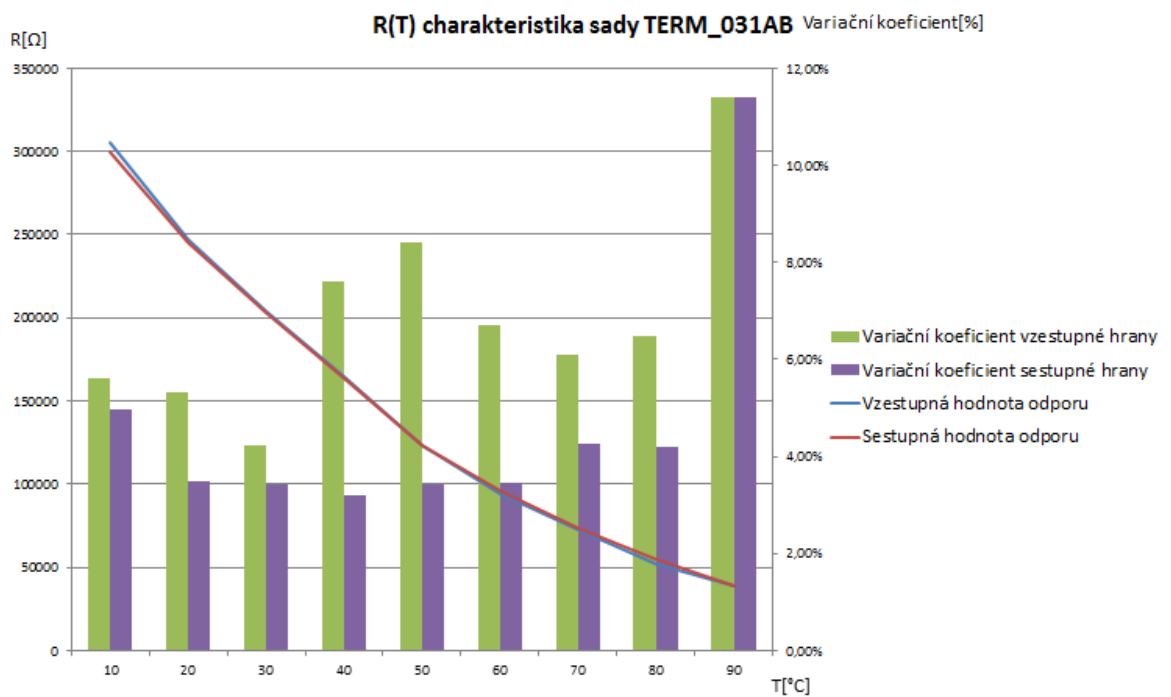
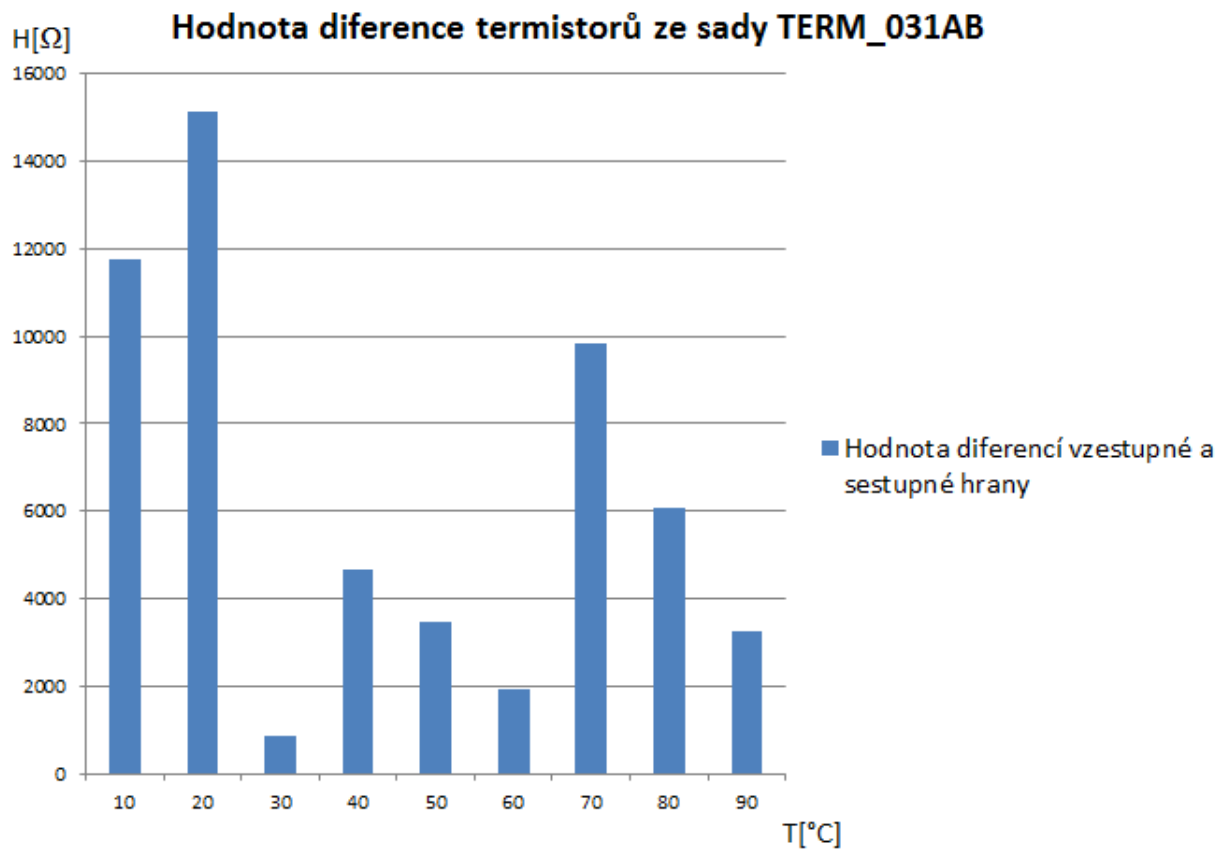


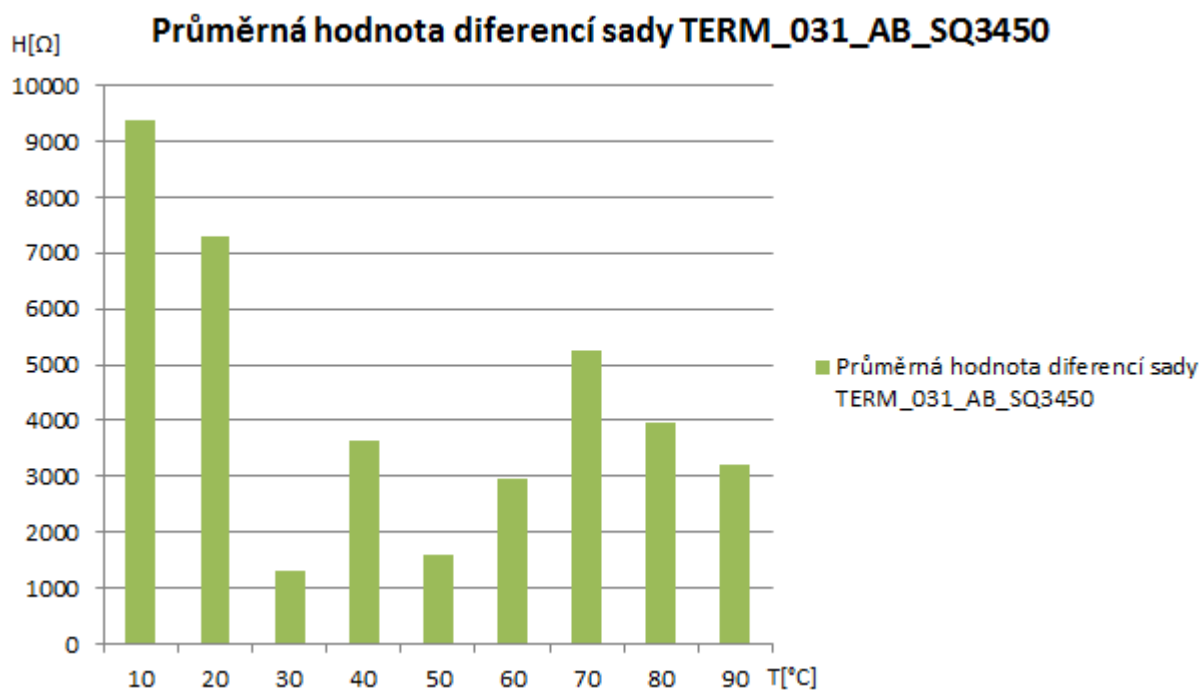
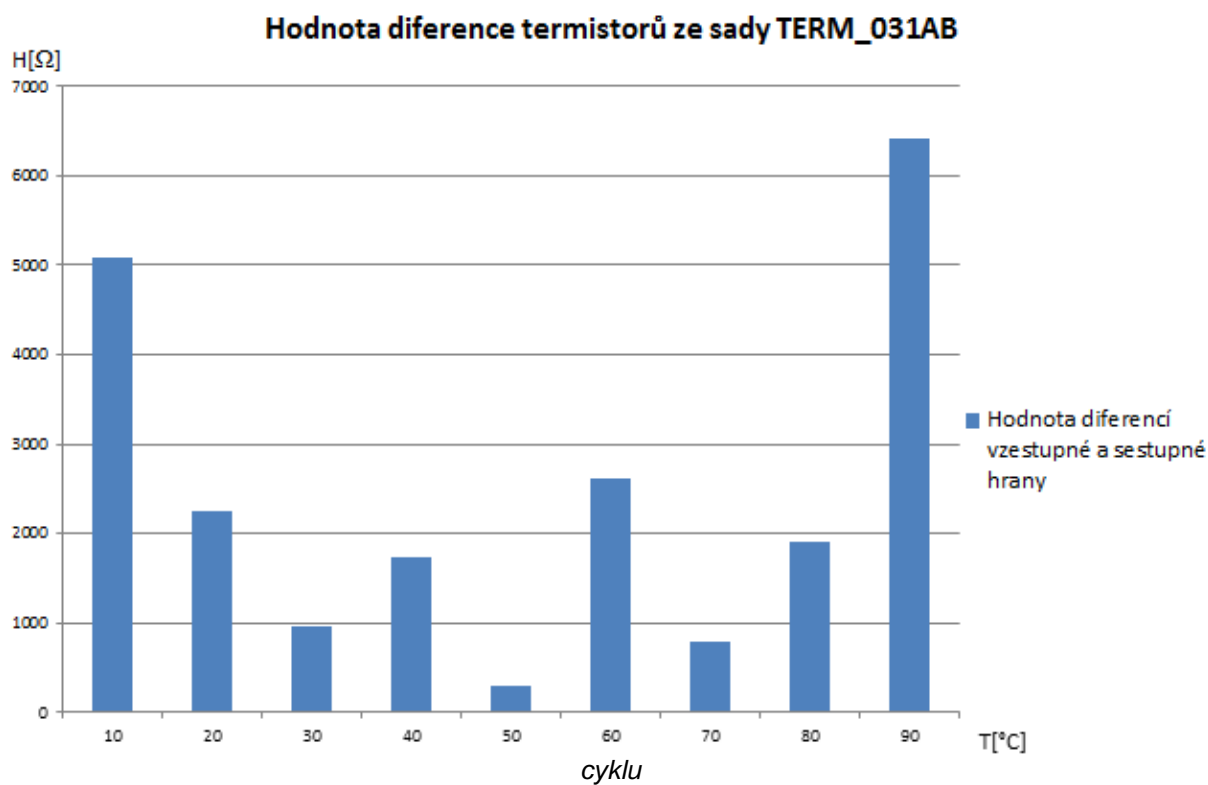


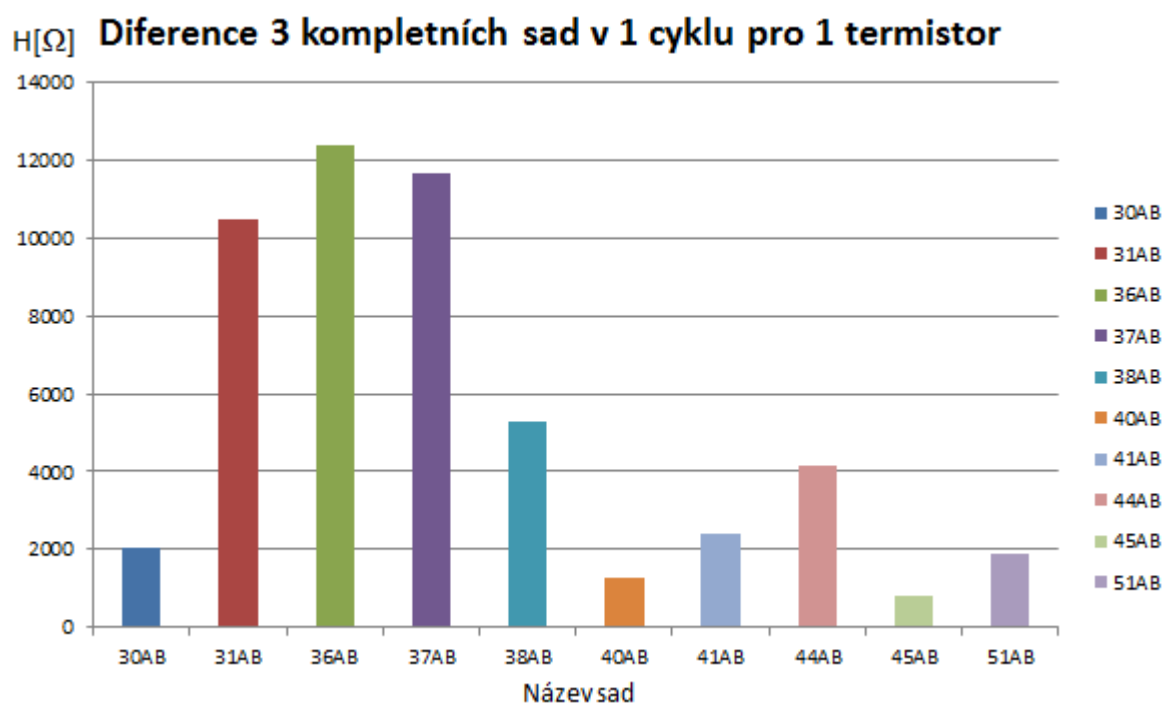
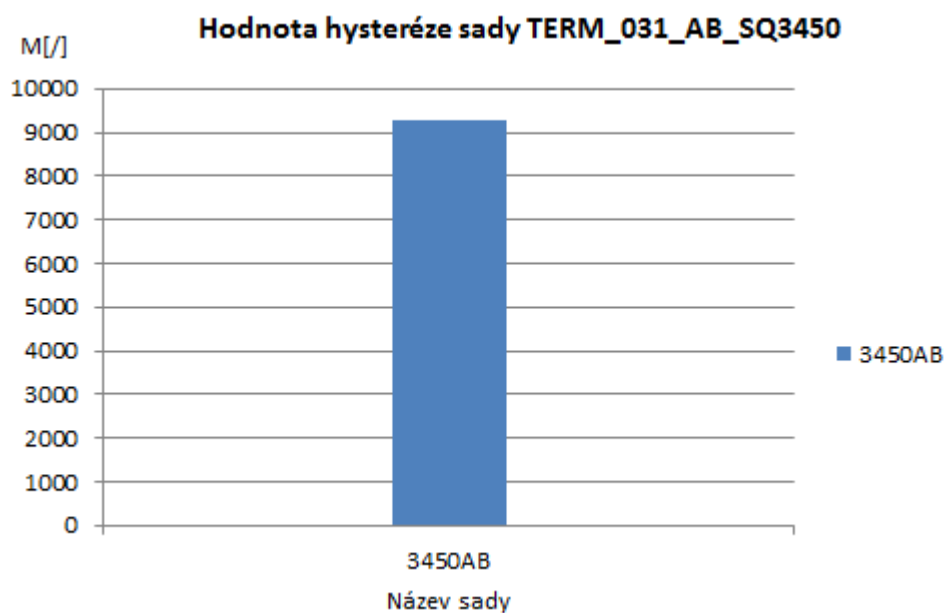
Hodnota hysteréze sady TERM_031

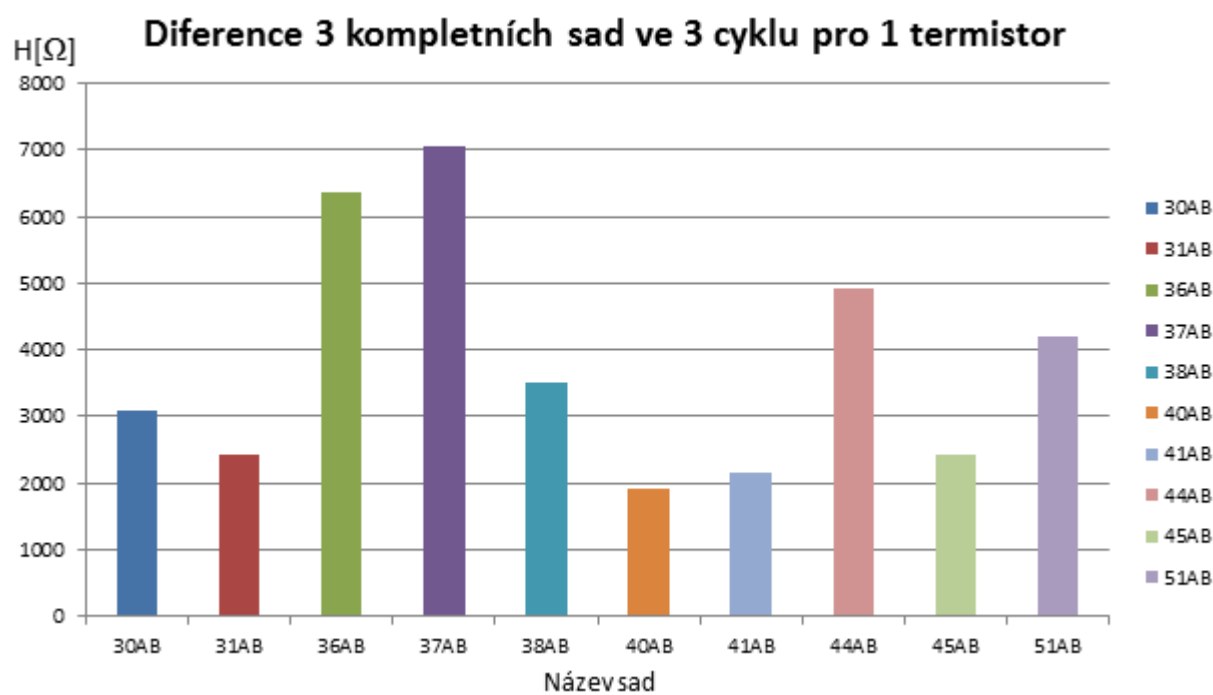
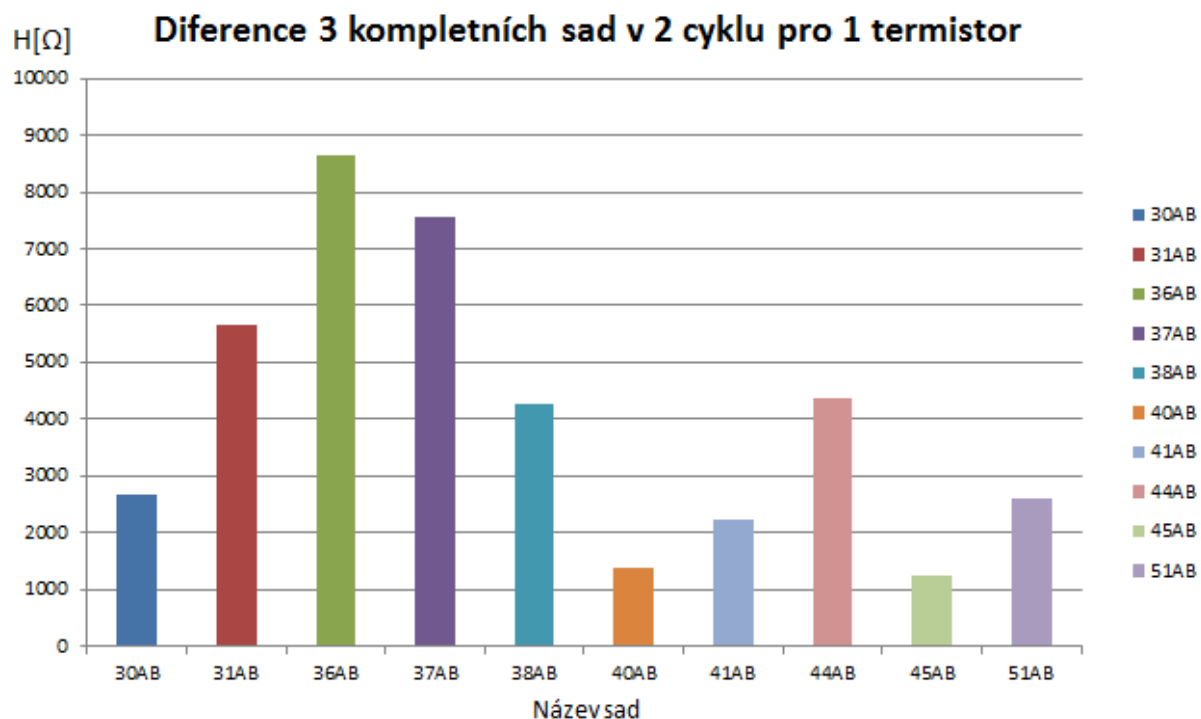


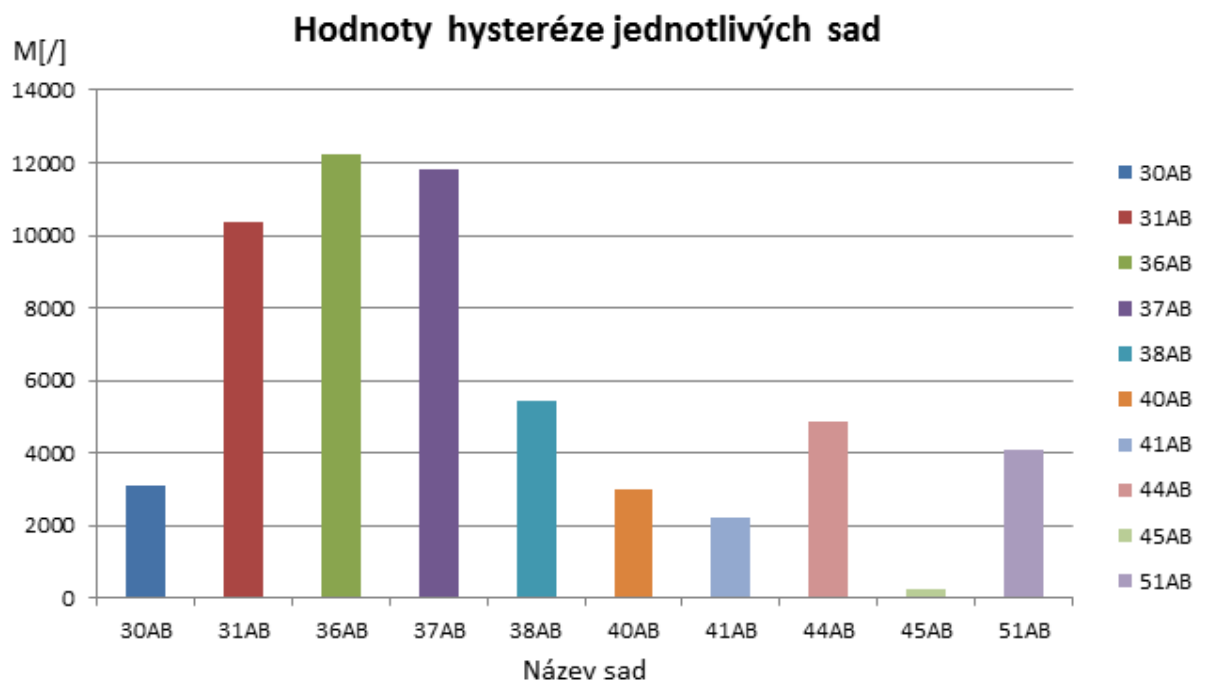
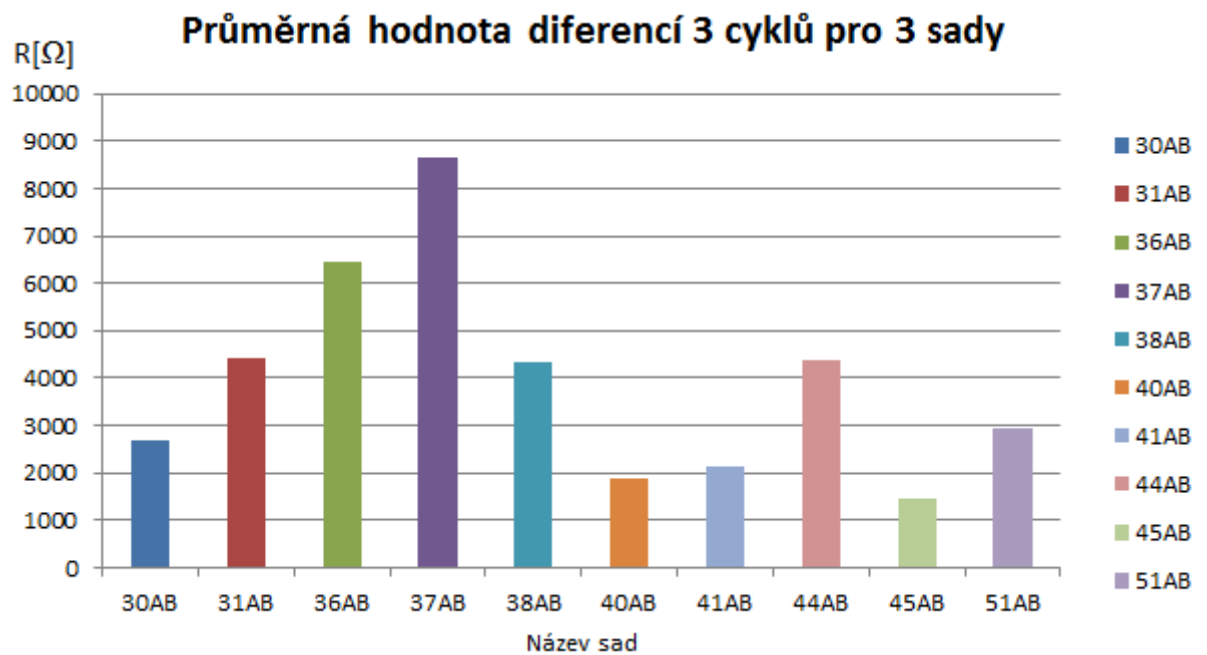


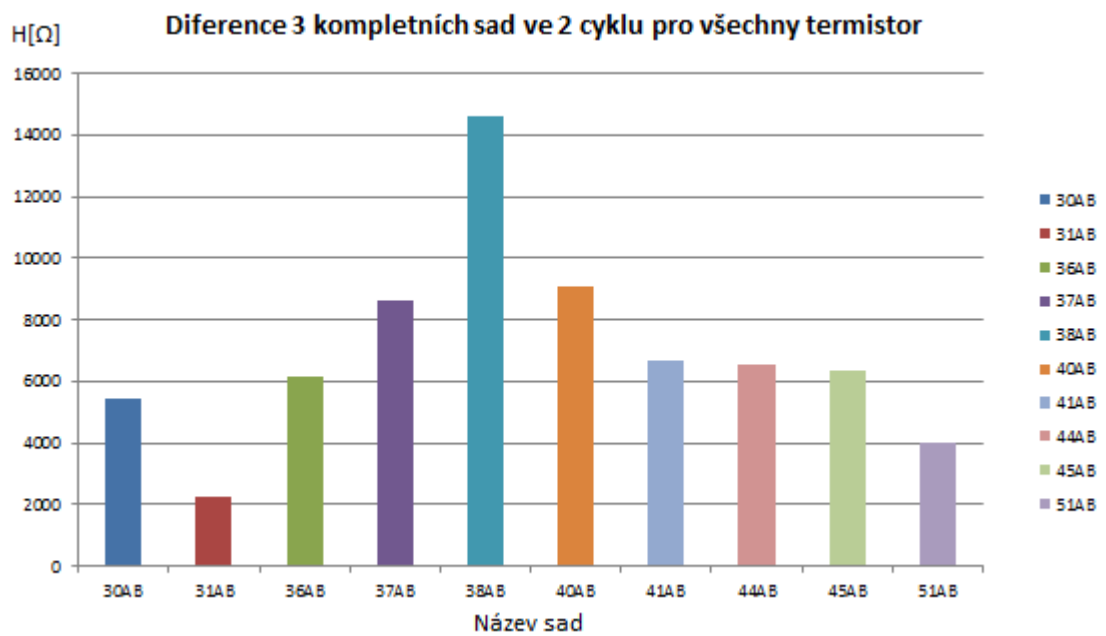
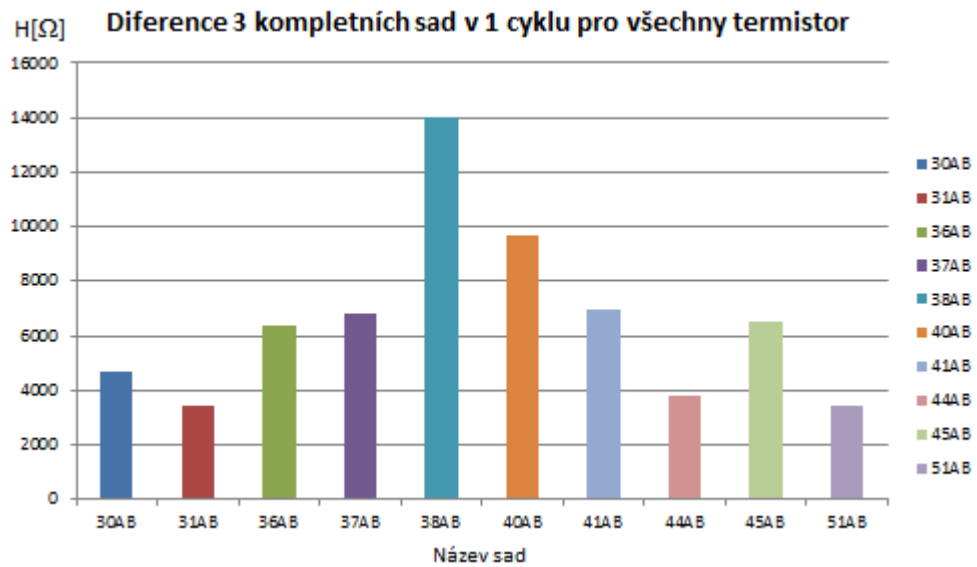


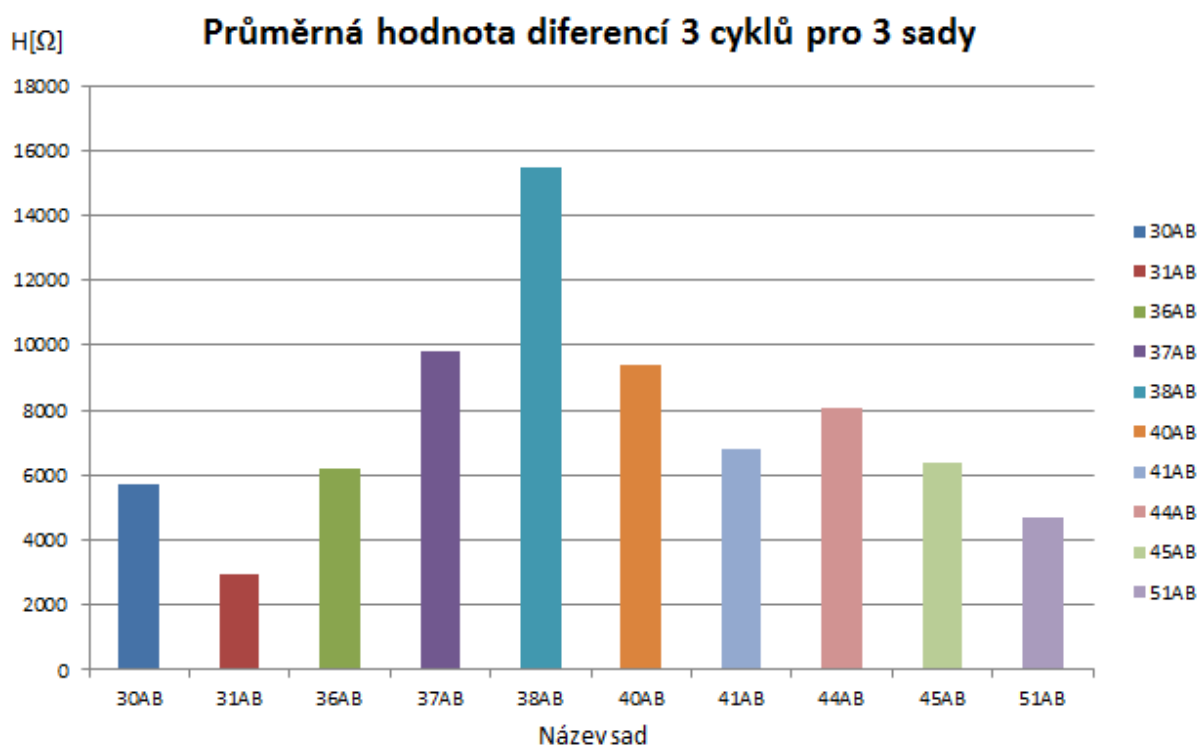
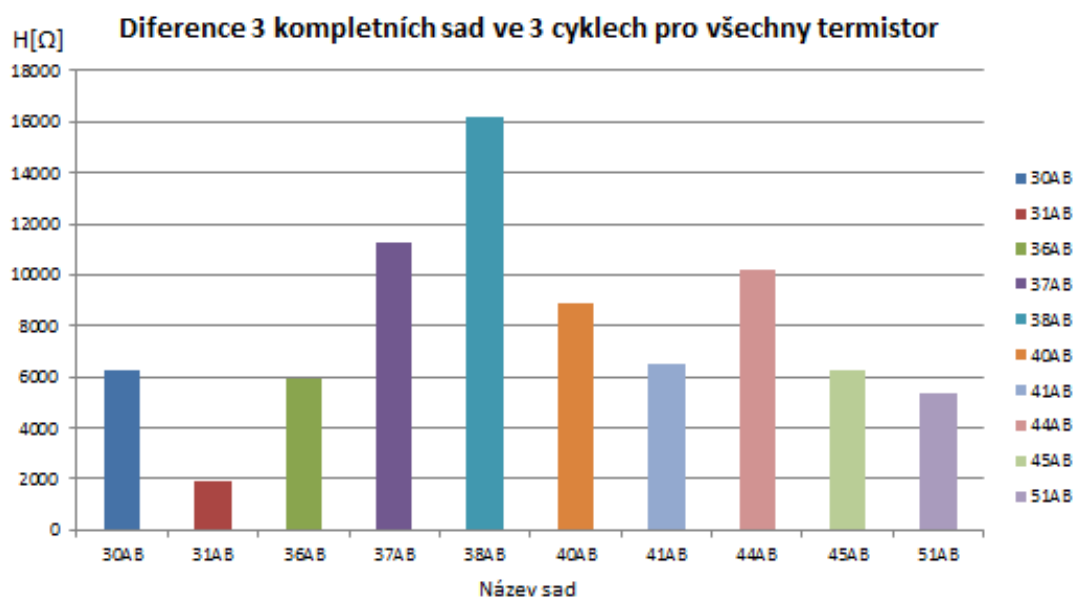


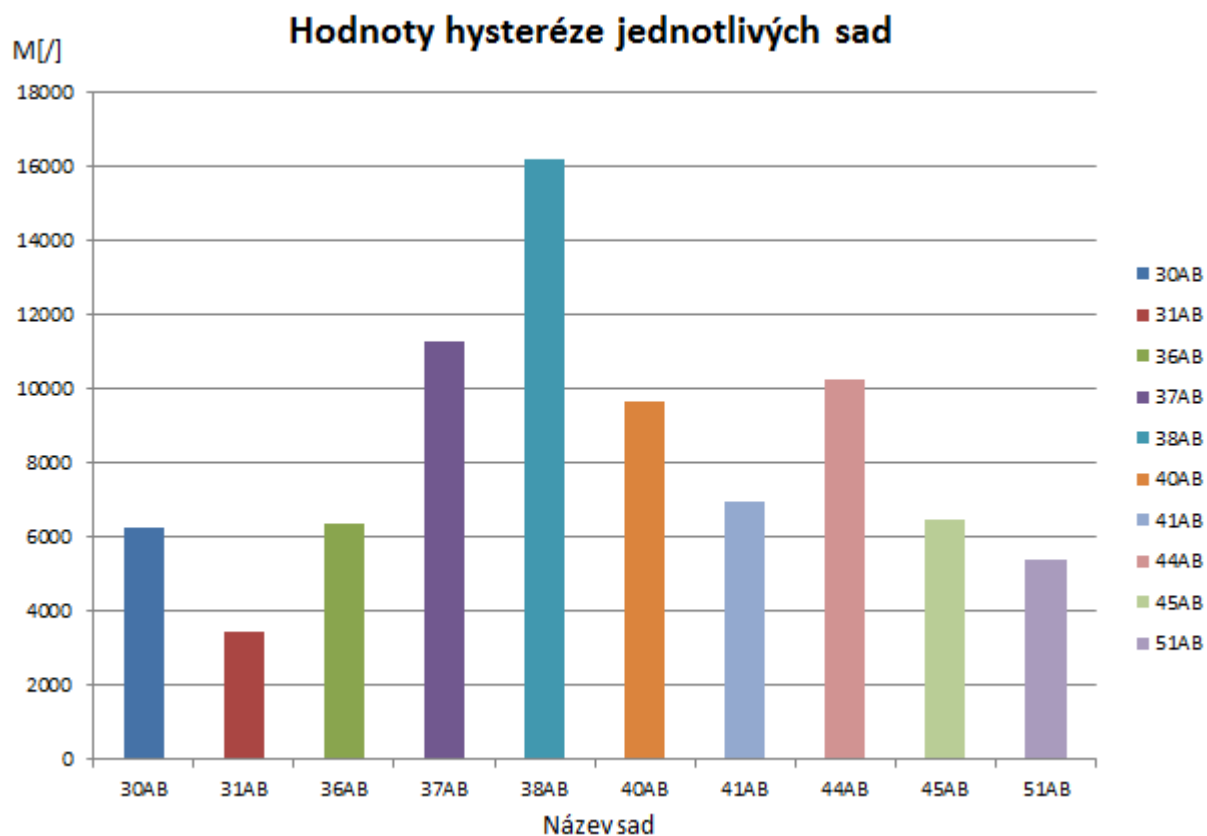












Graf 44 : Výsledná hysteréze jednotlivých sad

