

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Testování dynamických vlastností tištěných termistorů

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan PAVLOVIC**
Osobní číslo: **E15N0035P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Testování dynamických vlastností tištěných termistorů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

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

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

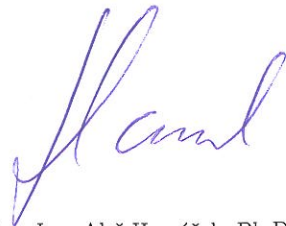
1. FRADEN, Jacob. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 4. vyd. Springer-Verlag New York, 2010. ISBN 978-1-4419-6466-3.
2. WEBSTER, John G. a Halit EREN. Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement. 2. vyd. CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4398-4889-0.
3. CHILDS, Peter R. N. Practical temperature measurement. Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0 7506 5080 X.
4. Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Wiley Online Library, AIP Scitation, Google Scholar, ResearchGate, Mendeley ...) a technická literatura významných výrobců termistorů (QTI, Vishay, Murata, AVX, Omega, ...)

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

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017
Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018


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




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

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Cílem předkládané práce bylo navrhnout postup měření dynamických vlastností tištěných termistorů s ohledem na dostupnou laboratorní infrastrukturu a doporučení obsažená v normách tuzemských a zahraničních institucí. Byl sestaven postup pro měření disipačního faktoru, časové konstanty a doby teplotní odezvy. Měření bylo podrobena 22 NTC termistorů z toho 16 tištěných a 6 referenčních. Tištěné termistory se lišily 4 materiálovými formulacemi a způsobem zapouzdření termo-senzitivní vrstvy (krycí lak, PET fólie). Správnost postupu měření byla ověřena na základě srovnání naměřených výsledků dynamických vlastností referenčních termistorů s daty uvedenými v jejich technických listech. Výstupem bylo zjištění, že postupem lze docílit řádově srovnatelných výsledků. Následovalo měření tištěných NTC termistorů, při kterém byly naměřeny hodnoty disipačního faktoru od 0,005mW/°C do 11,5 mW/°C, časové konstanty od 1,3 s do 3,7 s a doby teplotní odezvy (99,9 %) od 12,1 s do 27,5 s.

Klíčová slova

Dynamické vlastnosti, termistory NTC, časová odezva, přenosová funkce, přechodová funkce, odpor při nulovém zatížení, disipační faktor, časová konstanta, doba teplotní odezvy.

Abstract

The aim of this master thesis was to propose a procedure for measurement of dynamic properties of printed thermistors with regard to available laboratory infrastructure and recommendations contained in standards of domestic and foreign institutions. A procedure for measuring dissipation factor, time constant, and temperature response time has been established. The measurement was carried out by 22 NTC thermistors including 16 printed and 6 reference thermistors. Printed thermistors differed with 4 material formulations and encapsulation of the thermo-sensitive layer (cover lacquer, PET film). The accuracy of the measurement procedure was verified by comparing the measured results of the dynamic properties of the reference thermistors with the data given in their datasheets. The outcome of the comparison was the finding that the procedure can produce results of the same order. Further measurement of printed NTC thermistors followed. The result of dissipation factor ranges from 0.005 mW/°C to 11.5 mW/°C, time constant ranges from 1.3 s to 3.7 s and response to step change (99.9 %) ranges from 12.1 s to 27.5 s.

Key words

Dynamic properties, NTC thermistors, time response, transfer function, transient function, zero power resistance, dissipation factor, time constant, response to step change.

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 14.5.2018

Milan Pavlovic

Poděkování

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

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD.....	9
1 DYNAMICKÉ VLASTNOSTI SNÍMAČŮ	10
1.1 MATEMATICKÝ MODEL DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ	11
1.1.1 <i>Systém nultého řádu.....</i>	<i>12</i>
1.1.2 <i>Systém prvního řádu</i>	<i>12</i>
1.1.3 <i>Systém druhého řádu až n-tého řádu</i>	<i>15</i>
1.2 DYNAMICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO SNÍMAČE	18
1.2.1 <i>Struktura snímače</i>	<i>21</i>
1.2.2 <i>Zpracování signálu snímače</i>	<i>21</i>
2 TERMISTORY NTC	22
2.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY A FUNKČNÍ PRINCIPY	23
2.2 FENOMÉN SAMOZAHŘÍVÁNÍ A JEHO VLIV NA DYNAMICKÉ VLASTNOSTI	25
2.3 PŘEHLED NOREM TUZEMSKÝCH A ZAHRANIČNÍCH INSTITUCÍ	27
2.3.1 <i>Měření disipačního faktoru.....</i>	<i>29</i>
2.3.2 <i>Měření časové konstanty.....</i>	<i>30</i>
3 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ TERMISTORŮ	32
3.1 PŘÍPRAVA TERMISTORŮ PŘED MĚŘENÍM DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ	33
3.1.1 <i>Výběr reprezentativních vzorků</i>	<i>33</i>
3.1.2 <i>Příprava měřicí kabeláže.....</i>	<i>35</i>
3.1.3 <i>Kalibrace termistorů.....</i>	<i>36</i>
3.1.4 <i>Uložení a aklimatizace vzorků v ustáleném prostředí klimatické komory</i>	<i>41</i>
3.1.5 <i>SMU jednotka Keithley 2612B a software ACS basic 2.0</i>	<i>42</i>
3.2 MĚŘENÍ DISIPAČNÍHO FAKTORU	44
3.3 MĚŘENÍ ČASOVÉ KONSTANTY A DOBY TEPLOTNÍ ODEZVY	47
3.4 DISKUZE VÝSLEDKŮ	53
ZÁVĚR	57
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	58
SEZNAM PŘÍLOH.....	59

Seznam symbolů a zkratek

$\Delta\delta$	Dynamická chyba snímače.
C	Tepelná kapacita [J/K].
I	Elektrický proud [A].
P	Elektrický výkon [W].
Q	Tepelný tok [W].
Q_a	Absorbovaná tepelná energie [W].
Q_z	Vyzářená tepelná energie [W].
r	Tepelný odpor [K/W].
R_{25}	Elektrický odpor při teplotě 25 °C [Ω].
R_{35}	Elektrický odpor při teplotě 35 °C [Ω].
R_{50}	Elektrický odpor při teplotě 50 °C [Ω].
RH	Relativní vlhkost [%].
R_t	Elektrický odpor při teplotě T_t [Ω].
T_o	Teplota okolního prostředí [K].
T_s	Teplota snímače [K].
U	Elektrické napětí [V].
α	Teplotní součinitel termistoru [K^{-1}].
β	Tepelná konstanta [K].
δ	Disipační faktor [mW/°C].
τ	Časová konstanta [s].
ω	Úhlová frekvence [$rad \cdot s^{-1}$].
ACS	Automated Characterization Suite.
AWG	American Wire Gauge.
GPIOB	General Purpose Interface Bus.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
MS	Measure Delay.
NTC	Negative Temperature Coefficient.
PET	Polyethylentereftalát.
PLC	Power Line Cycle.
PTC	Positive Temperature Coefficient.
SMU	Source Measure Unit.

Úvod

Měření teploty je v dnešní době běžnou záležitostí, se kterou člověk přichází do kontaktu při každodenních činnostech po celý život. S ohledem na tuto skutečnost je vhodné disponovat nástroji pro její přesné měření.

V současné době existuje celá řada různých teploměrů (teplotních snímačů), které využívají mnoho odlišných technologií pro zaznamenání změny okolní teploty. Mezi hojně používané se řadí elektrické teploměry, které se dělí na kovové odporové, odporové polovodičové, polovodičové s PN přechodem a v neposlední řadě také termoelektrické. Tato práce je zaměřena na odporové teploměry tvořené polovodičem. Tento typ teploměru v praxi užívá název termistor a dělí se na dva základní typy: NTC a PTC.

Vlastnosti teploměrů, ale také snímačů jiných veličin, lze obecně rozdělit na dvě skupiny a to statické a dynamické. Dynamické vlastnosti, které jsou předmětem zkoumání této práce, popisují chování teplotního snímače v krátkých časových intervalech při různých změnách okolních podmínek. Pro popis těchto vlastností se v odborné literatuře používají především tři veličiny. Jedná se o disipační faktor, časovou konstantu a tepelnou kapacitu. Velikost těchto parametrů je závislá na konstrukčním provedení snímače, použitém materiálu, ale mimo jiné i na podmínkách okolního prostředí, za kterých je dynamické chování testováno.

V předkládané práci jsou zkoumány dynamické vlastnosti tištěných NTC termistorů vytvořených sítotiskem. Páteř postupu měření je tvořena na základě informací získaných z norem tuzemských a zahraničních institucí. Postup měření však bylo nutné upravit pro dostupnou laboratorní infrastrukturu. Naměřené hodnoty jsou porovnány s hodnotami konvenčních termistorů obdobných parametrů (nominální elektrický odpor, rozsah měření) a konstrukčního provedení.

Díky pochopení dynamického chování a jeho respektování při návrhu systému je možné vytvořit velice spolehlivé snímače s krátkou reakční odezvou při zachování vysoké přesnosti.

1 Dynamické vlastnosti snímačů

Za statických podmínek, kdy je snímaná veličina v čase neměnná, je snímač popsán za pomoci časově nezávislé přenosové funkce. Nicméně v případech, kdy se vstupní signál rychle mění, nestačí výstupní signál snímače včas reagovat a sledovat tyto změny na vstupu v reálném čase [1, 2]. Důvodem je, že snímač a zdroj signálu nemohou v reálných podmínkách reagovat ve stejný okamžik. Dynamická chyba snímače $\Delta\delta$, popsaná rovnicí (1.1), je rovna odchylce mezi vstupním $x(t)$ a výstupním $y(t)$ signálem a je způsobena charakteristickými vlastnostmi zkoumaného snímače. Dynamická chyba je, na rozdíl od statické chyby, časově závislá, a proto je často nazývána jako časová odezva mezi vstupem a výstupem snímače [1].

$$\Delta\delta = y(t) - x(t)(-) \quad (1.1)$$

Dynamický systém reprezentující snímač může být jak lineární, tak i nelineární. V případě nelineárního chování dynamického systému je velice obtížné tento systém popsat spolehlivým matematickým modelem [1, 2]. Proto jsou nelineární systémy často segmentovány na malé lineární úseky, které lze jednotlivě řešit velice efektivně za pomoci výpočetní techniky [2].

Vztah dynamického systému je reprezentován rovnicí (1.2), kde výstup je roven součinu matematické funkce vstupního signálu (G_{vstup}) s přenosovou funkcí popisující dynamický systém (G_{odezva}) [2].

$$G_{výstup} = G_{vstup} \times G_{odezva} (-) \quad (1.2)$$

Výstup je tedy závislý jak na vstupním signálu, tak i na dynamickém systému popisující snímač samotný [2].

Pro posouzení dynamického systému je používána celá řada různých vstupních signálů (stimulů). Mezi nejčastější se řadí: jednotkový skok, *Diracův impuls* a harmonický signál o různých frekvencích [2]. Pro tuto práci je stěžejní časová odezva systému na jednotkový skok. Časová odezva systému na jednotkový skok je v literatuře nazývána jako přechodová funkce. Přechodová charakteristika je jejím grafickým znázorněním [3].

1.1 Matematický model dynamických systémů

Chování dynamických systémů je charakterizováno za pomoci diferenciálních rovnic. Obecný matematický přepis lineárního dynamického systému je reprezentován rovnicí:

$$\frac{a_n d^n y(t)}{dt^n} + \frac{a_{n-1} d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = x(t) \quad (-) \quad (1.3)$$

Levá strana rovnice je známa jako charakteristická rovnice, kde a_n , a_{n-1} a a_0 jsou libovolnými koeficienty. Pravá strana rovnice obsahuje funkci reprezentující vstupní signál systému.

Specifická kombinace vstupního signálu snímače a dynamického systému popisující snímač rozhoduje o podobě výstupního signálu snímače. Dle složitosti dynamického systému se používají diferenciální rovnice nultého, prvního, druhého, až n-tého řádu [2].

Diferenciální rovnici (1.3) lze převést do algebraického tvaru za pomoci Laplaceovy transformace:

$$a_n p^n Y(p) + a_{n-1} p^{n-1} Y(p) + \dots + a_0 Y(p) = X(p) \quad (-) \quad (1.4)$$

Pro kompletní přesun z časové do frekvenční oblasti je nutné za komplexní operátor p dosadit imaginární parametr j a reálný parametr ω [$rad \cdot s^{-1}$] představující úhlovou frekvenci. Rovnice poté získá tvar:

$$a_n (j\omega)^n Y(j\omega) + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} Y(j\omega) + a_0 Y(j\omega) = X(j\omega) \quad (-) \quad (1.5)$$

Přenosová funkce $G(p)$ je získána z podílu Laplaceových obrazů výstupní a vstupní veličiny systému. Rovnice (1.6) je ponechána s parametrem p a jedná se tedy o operátorový přenos funkce.

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{a_n p^n Y(p) + a_{n-1} p^{n-1} Y(p) + \dots + a_0 Y(p)} \quad (-) \quad (1.6)$$

1.1.1 Systém nultého řádu

Systém nultého řádu je definován časově nezávislou přenosovou funkcí [1, 2]. Takový systém neobsahuje žádné prvky akumulující energii, jako například kondenzátor nebo induktor. Systém nultého řádu reaguje okamžitě. Tento systém tedy není potřeba charakterizovat dynamickým matematickým modelem [1]. Systém je popsán následující rovnicí:

$$a_0 y(t) = x(t) \quad (-) \quad (1.7)$$

po Laplaceově transformaci do frekvenční oblasti získá tvar:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = 1 \quad (-) \quad (1.8)$$

Z rovnice (1.8) je zřetelné, že neobsahuje žádný člen závislý na frekvenci, rovnice je tedy bez časové derivace. Z tohoto důvodu bude vstupní signál na výstupu interpretován vždy v reálném čase bez zpoždění [2].

1.1.2 Systém prvního řádu

Systém prvního řádu je časově závislý a popisuje snímač obsahující jeden člen akumulující energii (tepelnou, elektrickou apod.) [1]. Vztah mezi vstupem a výstupem je popsán následující rovnicí:

$$\frac{a_1 dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad (-) \quad (1.9)$$

přenosová funkce systému prvního řádu po Laplaceově transformaci s parametrem p :

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{a_1 p + a_0} = \frac{\frac{1}{a_0}}{\frac{a_1}{a_0} p + 1} = \frac{K}{\tau p + 1} \quad (-) \quad (1.10)$$

kde $K = \frac{1}{a_0} \quad (-)$ je zesílení a $\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad [s]$ je časová konstanta.

V tento okamžik je nutná znalost funkce vstupního signálu, která bude použita pro zkoumání dynamického systému. V této práci je používán výhradně jednotkový skok, jehož obrazem je:

$$X(p) = \frac{1}{p} \quad (-) \quad (1.11)$$

obraz jednotkového skoku dosadíme do přenosové funkce a získáme tzv. přechodovou funkci:

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{p(\tau p + 1)} \quad (-) \quad (1.12)$$

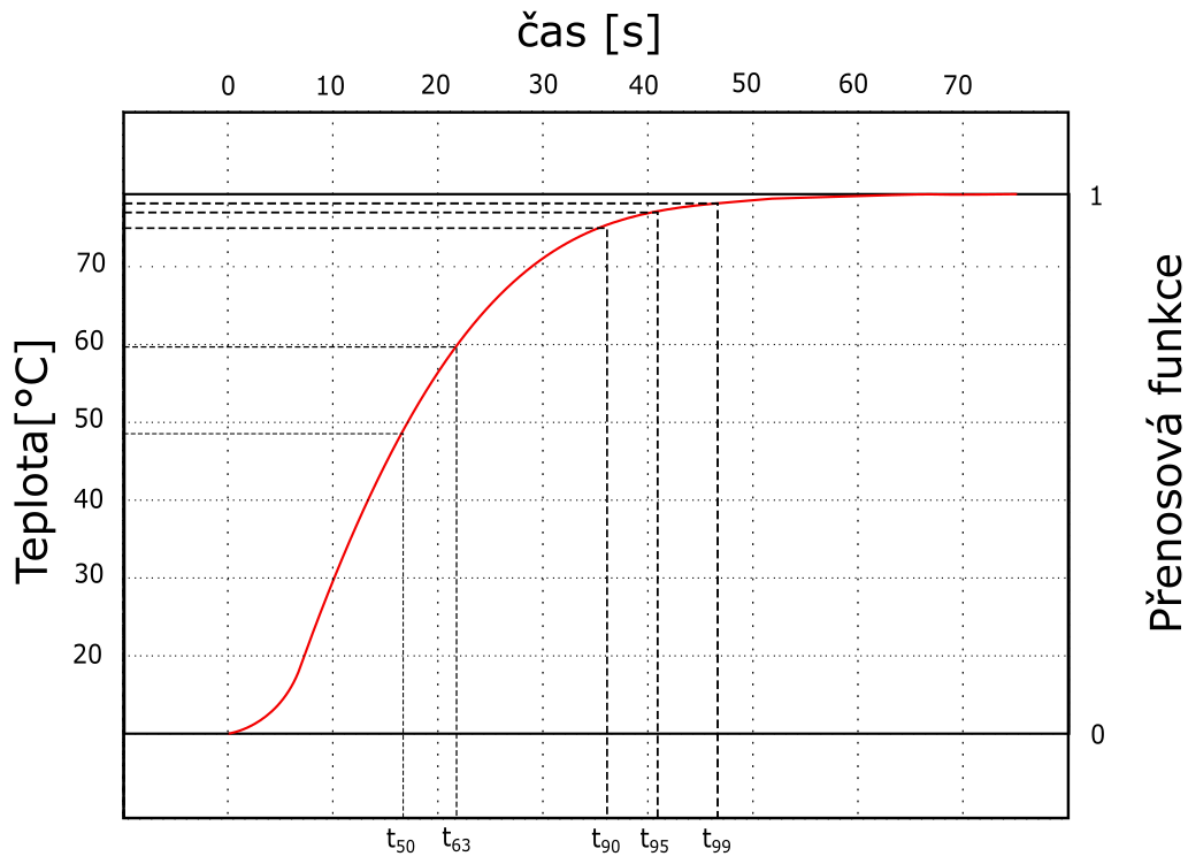
po provedení Laplaceovy zpětné transformace dostáváme přechodovou rovnici systému prvního řádu pro časovou oblast:

$$h(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (-) \quad (1.13)$$

v případě, kdy je $t = \tau$ nabývá rovnice následujícího tvaru:

$$h(t) = K \left(1 - \frac{1}{e} \right) = K(0.6321) \quad (-) \quad (1.14)$$

Z rovnice (1.14) vyplývá, že pokud se čas od poslední změny na vstupu snímače rovná časové konstantě, je hodnota na výstupu snímače rovna přibližně 63,2 % hodnoty v ustáleném stavu.



Graf 1.1 Přechodová funkce teplotního snímače prvního řádu (převzato s úpravami z [10])

V Graf 1.1 je znázorněna přechodová funkce dynamického systému prvního řádu, kde po uplynutí doby rovné dvojnásobku časové konstanty ($t = 2\tau$) je na výstupu dosaženo 86,5 % hodnoty v ustáleném stavu. Po uplynutí doby rovné trojnásobku časové konstanty ($t = 3\tau$) je na výstupu dosaženo 95 % hodnoty v ustáleném stavu.

Funkce $h(t)$ v čase konverguje k ustálené hodnotě K v nekonečnu [1]. Po uplynutí doby rovné trojnásobku až pětinásobku (podle požadavku na přesnost 5-1%) časové konstanty, jsou hodnoty přechodové funkce považovány za ustálené.

1.1.3 Systém druhého řádu až n-tého řádu

V případech, kdy dynamický systém obsahuje dva a více členů akumulujících energii, je nutné pro popis dynamického systému využít diferenciální rovnice druhého až n-tého řádu. Časová odezva systému druhého řádu reaguje odlišným způsobem a se specifickými vlastnostmi, které mohou být chtěné i nechtěné [2]. Vztah mezi vstupem $x(t)$ a výstupem $y(t)$ je popsán za pomoci diferenciální rovnice druhého řádu v následující podobě:

$$\frac{a_2 d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{a_1 dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad (-) \quad (1.15)$$

přenosová funkce pro systém druhého řádu po Laplaceově transformaci nabývá tvaru:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{1}{a_0} \cdot \frac{1}{\left[\left(\frac{a_2}{a_0}\right) p^2 + \left(\frac{a_1}{a_0}\right) p + 1\right]} = \frac{1}{\tau^2 p^2 + 2\tau\xi p + 1} \quad (1.16)$$

kde $K = \frac{1}{a_0}$ je zesílení, $\tau = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}}$ [s] je časová konstanta a $\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ je poměrné tlumení.

Podle velikosti poměrného tlumení ξ rozlišujeme systémy druhého řádu na:

- přetlumený systém,
- systém na mezi aperiodicity,
- kmitavý systém tlumený,
- kmitavý systém netlumený.

Přetlumený systém

Přenosová funkce přetlumeného systému druhého řádu má tvar:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)} \quad (-) \quad (1.17)$$

po dosažení obrazu jednotkového skoku získáme přechodovou funkci ve tvaru:

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{p(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)} \quad (-) \quad (1.18)$$

po Laplaceově zpětné transformaci přechodové funkce do časové oblasti:

$$h(t) = K \left[1 - \frac{1}{\tau_1 - \tau_2} \left(\tau_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \tau_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \right] \quad (-) \quad (1.19)$$

Systém na mezi aperiodicity

Přenosová funkce systému druhého řádu na mezi aperiodicity má tvar:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{(\tau p + 1)^2} \quad (-) \quad (1.20)$$

po dosazení obrazu jednotkového skoku získáme přechodovou funkci ve tvaru:

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{p(\tau p + 1)^2} \quad (-) \quad (1.21)$$

po Laplaceově zpětné transformaci přechodové funkce do časové oblasti:

$$h(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{t}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (-) \quad (1.22)$$

Kmitavý systém tlumený

Přenosová funkce tlumeného kmitavého systému druhého řádu má tvar:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{\tau^2 p^2 + 2\tau\xi p + 1} \quad (-) \quad (1.23)$$

po dosazení obrazu jednotkového skoku získáme přechodovou funkci ve tvaru:

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{p(\tau^2 p^2 + 2\tau\xi p + 1)} \quad (-) \quad (1.24)$$

po Laplaceově zpětné transformaci přechodové funkce do časové oblasti:

$$h(t) = K \left[1 - \frac{e^{-\frac{\xi}{\tau}t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\tau} t + \phi \right) \right] \quad (-) \quad (1.25)$$

Kmitavý systém netlumený

Přenosová funkce netlumeného kmitavého systému druhého řádu má tvar:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{\tau^2 p^2 + 1} \quad (-) \quad (1.26)$$

po dosazení obrazu jednotkového skoku získáme přechodovou funkci ve tvaru:

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{p(\tau^2 p^2 + 1)} \quad (-) \quad (1.27)$$

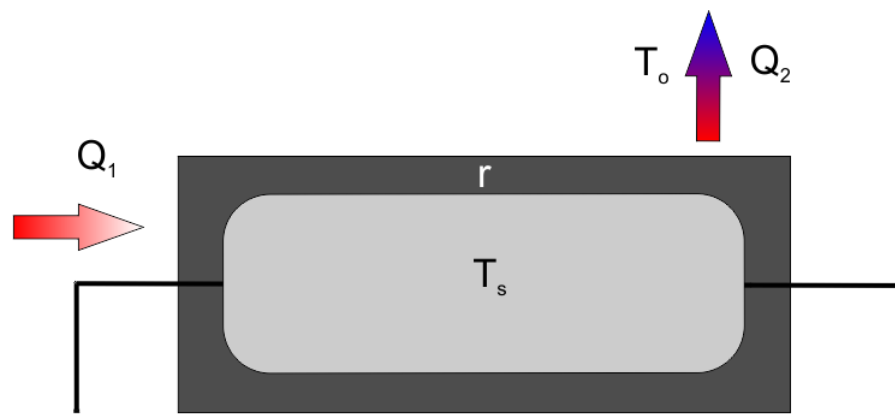
po Laplaceově zpětné transformaci přechodové funkce do časové oblasti:

$$h(t) = K(1 - \cos \omega_0 t) \quad (-) \quad (1.28)$$

1.2 Dynamický model teplotního snímače

Pro posouzení snímače a jeho odezvy slouží celá řada stimulů různých tvarů a forem. Tento stimul je přiveden na vstup snímače, zatímco je zkoumán jeho výstup. Vztah mezi vstupním stimulem, jehož tvar a formu přesně známe, a výstupní veličinou, vede k pochopení různých pochodů a vztahů uvnitř snímače samotného [1].

Pro měření teploty je za vhodný stimul považován jednotkový skok, který dobře simuluje prudký nárůst okolní teploty, například při vložení snímače do pece, lázně apod. Jedním z nejsledovanějších parametrů je čas, respektive odezva, což je rozdíl časů od přivedení stimulu na vstup snímače až po jeho ustálení na výstupu snímače [1, 2].



Obrázek 1.1 Model teplotního snímače (převzato z [1])

Teplu mezi snímaným objektem a snímačem může být přeneseno třemi mechanismy: kondukcí, přirozenou/nucenou konvekcí a tepelnou radiací.

Pro jednoduchý popis změny teploty snímače (Obrázek 1.1), lze využít první termodynamický zákon. Rychlost změny teploty je závislá na velikosti rozdílu mezi tepelným ziskem a tepelnou ztrátou snímače, respektive na výkonu zahřívání a chlazení [1]:

$$C \frac{dT_s}{dt} = Q_1 - Q_2 \text{ (W)} \quad (1.29)$$

kde C [J/K] je tepelná kapacita, T [K] je teplota a $Q_1 - Q_2 = \Delta Q$ [W] výsledný tepelný tok.

Q_2 je rovno:

$$Q_2 = \frac{T_s - T_o}{r} (W) \quad (1.30)$$

kde T_s [K] je teplota snímače, T_o [K] je teplota okolí a r [K/W] a tepelný odpor. Po dosazení do původní rovnice je získána diferenciální rovnice ve tvaru:

$$\frac{dT_s}{dt} + \frac{T_s}{rC} = \frac{Q_1}{C} + \frac{T_o}{rC} (-) \quad (1.31)$$

tato diferenciální rovnice prvního řádu je typická pro tepelné systémy.

Časová odezva snímače je charakterizována tepelnou časovou konstantou, která je výsledkem součinu tepelné kapacity C [J/K] a tepelného odporu r [K/W] snímače:

$$\tau = Cr (s) \quad (1.32)$$

Časová konstanta τ [s] pro pasivně chlazený snímač je rovna času, který je potřeba k dosažení 63,2 % ustálené teploty snímače. Na první pohled je zřetelné, že analogii pro časovou konstantu teplotního snímače lze nalézt v teorii elektrických obvodů (RC obvod) [1].

Hodnota teploty měřená snímačem se za ustálenou považuje po uplynutí doby odpovídající pěti až deseti násobku časové konstanty. V případě $t = 5\tau$ je odchylka skutečné teploty snímaného objektu a změřené teploty přibližně 0,7 % a v druhém případě, kdy $t = 10\tau$ je odchylka teploty přibližně v řádech 0,005 % [1, 2].

Ve výše uvedeném příkladu je uvažován pouze ideální případ, který funguje za předpokladu, že tepelný odpor mezi snímačem a prostředím je nekonečně velký a teplota snímaného objektu je po dobu měření v čase neměnná. Na základě těchto předpokladů jsou shrnuty vlastnosti ideálního objektu, který je podroben snímání teploty [1]:

- rozměry zkoumaného objektu jsou výrazně větší než velikost snímače,
- zkoumaný objekt má nekonečně velkou tepelnou kapacitu,
- zkoumaný objekt disponuje nekonečně velkou tepelnou vodivostí.

Pro porovnání bude uveden příklad bližší reálným podmínkám, ve kterém nebude uvažován jeden z výše zmíněných předpokladů. Pomineme-li předpoklad, že tepelný odpor mezi párem (objekt, snímač) a prostředím není nekonečně velký, chování tepelného přenosu se mezi všemi zúčastněnými elementy řídí dle základních termodynamických zákonů [1]. Po této úvaze je získána časová konstanta nového tvaru:

$$\tau = C \frac{r}{1 + \frac{r_1}{r_2}} \text{ (s)} \quad (1.33)$$

Ze vztahu uvedeného výše vyplývá, že velikost časové konstanty je menší a odezva teplotního snímače je tedy rychlejší. Na druhou stranu snímač nikdy nedosáhne přesné teploty snímaného objektu. Snímaná teplota může být vyšší, nižší, ale nikdy nebude shodná [1].

V případě, že pomineme další předpoklad, kdy velikost snímaného objektu není dramaticky větší než velikost snímače a jeho tepelná vodivost je relativně malá, vzniká na rozhraní snímač-objekt rušení. Toto rušení se projeví pouze v okamžiku kontaktu snímače s objektem a nebo při rychlých změnách teploty snímaného objektu. Rušení tohoto typu však není trvalé a po určité době odezní. Systém se po krátké prodlevě navrácí do ustáleného stavu. Rušení se projevuje především způsobením odchylky, která deformuje ideální průběh exponenciální funkce snímače. V tomto případě má časová konstanta, jako veličina charakterizující dynamické vlastnosti, zkreslenou vypovídající hodnotu. Na straně měřicí aparatury je obtížné toto rušení vyhodnotit a zmírnit [1].

1.2.1 Struktura snímače

Termo-senzitivní element – elektrické vlastnosti materiálu tvořícího tento citlivostní člen se mění v závislosti na teplotě. Disponuje nízkou tepelnou kapacitou, malou hmotností, vysokou a předvídatelnou citlivostí a v neposlední řadě dobrou teplotní stabilitou [1].

Svorky – slouží k propojení termo-senzitivního elementu s externím elektrickým obvodem. Přívodní vodiče mají co nejmenší možnou tepelnou vodivost, nízký elektrický odpor a vysokou mechanickou pevnost [1].

Ochranné pouzdro – jedná se o fyzické oddělení termo-senzitivního elementu a okolního prostředí. Pouzdro disponuje nízkým tepelným odporem, nízkou tepelnou kapacitou, dobrými elektricko-izolačními vlastnostmi a dobrou mechanickou pevností. Dále je vhodné, aby pouzdro bylo rezistentní a stabilní v prostředí, pro které je snímač zamýšlen [1].

1.2.2 Zpracování signálu snímače

Teplota snímače se po kontaktu s objektem s rozdílnou teplotou začíná měnit a snímač generuje na svém výstupu elektrický signál. V určitou chvíli se teplota ustálí, což vede k závěru, že tepelný tok mezi objekty je zanedbatelný [1].

Pokud se teplota snímače mění, snímač absorbuje nebo reprodukuje tepelnou energii. Proto odezva snímače může být dvojího typu: stálá nebo nestálá. Na základě těchto podmínek, lze teplotu objektu určit podle dvou fundamentálních metod o zpracování signálu: **rovnovážná** a **prediktivní** [1].

Rovnovážná metoda považuje měření teploty za ukončené ve chvíli, kdy teplotní gradient mezi objektem a snímačem je zanedbatelný. Poté je signál na výstupu reprezentující teplotu snímače, považován za teplotu objektu [1].

Prediktivní metoda vyžaduje pro určení teploty mnohem kratší čas než Rovnovážná metoda. Ta je založena na vyvozování a předvídání rovnovážné teploty pomocí výpočtů proměnlivé rychlosti změn teploty snímače. V neposlední řadě je nutné poznamenat, že prediktivní metoda je ve své podstatě méně přesná než metoda rovnovážná [1].

2 Termistory NTC

Termistory jsou elektrotechnické polovodičové součástky, jejichž odpor je závislý na teplotě. Termistory se dělí do dvou hlavních skupin a to PTC (*positive temperature coefficient*) a NTC (*negative temperature coefficient*) [2, 4, 5]. Tato práce je primárně zaměřena na NTC termistory, které budou podrobněji okomentovány v následujících odstavcích.

Termistory se záporným teplotním součinitelem (NTC) patří mezi velice oblíbené kontaktní odporové snímače teploty a jsou známé také jako *negastory* [4]. Termistory jsou vyráběny především z polykrystalických materiálů (keramik) jako jsou oxidy metalických prvků. Mezi často používané kovy patří: magnézium, nikl, kobalt, železo, měď a titan [2, 4, 5].

Výrobní proces spočívá ve vytvoření speciální směsi dvou a více metalických oxidů. Tato směs je dále lisována a slinována za vysokých teplot [2, 4, 5]. Na základě celkové variability výrobního procesu (typ oxidu kovu, typu ochranné atmosféry a celkového nastavení průběhu sintrování), lze docílit široké škály jmenovitých odporů a teplotních součinitelů [5]. Mezi komerčně dostupnými NTC termistory je jmenovitý odpor při pokojové teplotě 25 °C v rozsahu od 10 Ω – 5 MΩ. Teplotní měřicí rozsah NTC termistorů je od 1 K do 1273,15 K [2, 4, 5].

Nejčastějším teplotním rozsahem, ve kterém jsou NTC termistory primárně využívány je od -80 °C do 300 °C. V tomto rozsahu poskytují NTC termistory oproti konkurenčním kovovým odporovým teploměřům mnohé výhody [2].

Mezi výhody NTC termistorů, díky kterým jsou využívány v řadě specializovaných disciplín termometrie, se řadí především: menší velikost, rychlejší odezva a vyšší citlivost oproti většině ostatních kontaktních teploměřů. Na druhou stranu jejich velkou nevýhodou je nelineární závislost odporu na teplotě. Dříve byly NTC termistory známy také svou nestabilitou, nicméně v dnešní době se řadí mezi nejspolehlivější tepelné snímače [2].

2.1 Základní vztahy a funkční principy

Jak už bylo výše zmíněno, NTC termistory jsou nejčastěji složeny ze směsi tvořené metalickými oxidy. Výrazným prvkem v pásové struktuře těchto materiálů je velice široký zakázaný pás, který z nich dělá velice dobré izolanty. Elektron nacházející se ve valenčním pásu potřebuje pro svoji excitaci vnější zdroj energie, který elektronu předá dostatek energie pro překonání zakázaného pásu. Elektron je tak přesunut do pásu vodivostního [1].

Jako vnější zdroj energie v tomto případě slouží energie tepelná. Zvyšováním teploty dochází k nárůstu množství elektronů nacházejících se ve vodivostním pásu, což vede ke zvýšení elektrické vodivosti daného materiálu. Konečný počet volných nosičů náboje se odvíjí od energie elektronů popsané *Boltzmannovým rozdělením* a hustotou částic nacházejících se na okraji energetických pásů [6].

Za úplně nejzákladnější parametr termistoru lze považovat tzv. odpor při nulovém zatížení (*zero-power resistance*). Tento parametr udává elektrický odpor, při kterém má součástka zanedbatelný výkon. Jedná se o výkon, respektive o jeho proudovou složku, který nezpůsobí znatelný nárůst teploty součástky. Tento výkon je v literatuře znám také jako Joulovy ztráty. Tyto ztráty charakterizují samozahřívání součástky vlivem průchodu elektrického proudu. Samozahřívání je při měření teploty nežádoucím jevem, který může způsobit nepřesnosti v měření, a proto je snahou ho potlačit nebo v ideálním případě zcela eliminovat [1, 2, 4, 5]. Na druhou stranu lze samozahřívání termistoru využít k proměření vlastních parametrů, čehož bude využito v této práci.

Pro reálné využití termistoru, jako snímače teploty, je nutná znalost jeho přenosové funkce. Přenosová funkce popisuje vztah mezi elektrickým odporem a teplotou termistoru. Na základě dobré znalosti této funkce je možné přesně měřit teplotu. Vyjádření přenosové funkce, které zde bude uvedeno, je čistě obecné a každý termistor disponuje zcela unikátní přenosovou funkcí i v případě, že se jedná o stejný typ. Tato výjimečnost je silně závislá na specifických parametrech konkrétního termistoru jako například použitím materiálu, použitím postupu ve výrobním procesu, geometrickém uspořádání snímacího elementu, velikosti snímače apod. Existují modely popisující odlišné typy termistorů pro různé aplikace jako například obecný model, *Fradenův model* a *Steinhart-Hartův model* [1, 2]. Pro tuto práci bude dostačující pouze model obecný, který následuje.

Obecný model je nejjednodušší aproximací přenosové funkce termistoru ve tvaru:

$$R_t = Ae^{\frac{\beta}{T}} (\Omega) \quad (2.1)$$

kde $R_t[\Omega]$ je odpor při teplotě $T [K]$, A je konstanta popisující geometrický tvar snímacího elementu a $\beta [K]$ je tepelná konstanta. Pro zpřesnění výpočtu lze použít hodnoty odporu $R_0[\Omega]$ a k tomu odpovídající teplotu $T_0[K]$, které zjistíme při kalibraci termistoru. Vztah poté nabývá tvaru:

$$R_t = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} (\Omega) \quad (2.2)$$

Mezi další důležité parametry termistoru patří teplotní součinitel $\alpha [K^{-1}]$, který vypovídá o citlivosti termistoru a je získán derivací funkce popisující vztah mezi odporem a teplotou termistoru:

$$\alpha_r = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dT} = -\frac{\beta}{T^2} (K^{-1}) \quad (2.3)$$

z tohoto vztahu jasně vyplývá, že citlivost závisí jak na konstantě β , tak i na snímané teplotě. Dále lze usuzovat, že citlivost je tím větší, čím menší je zkoumaná teplota, respektive čím blíže je k nule. V opačném případě, kdy teplota roste do kladných nebo záporných hodnot, je citlivost termistoru o to menší.

2.2 Fenomén samozahřívání a jeho vliv na dynamické vlastnosti

V případě měření teploty s požadavkem na vysokou citlivost je nutné zohlednit samozahřívání termistoru, které je způsobeno Joulovými ztrátami vznikajícími při průchodu elektrického proudu skrze termistor [1, 2, 4, 5]. To může mít neblahý vliv na přesnost měření, a proto je snahou proudové zatížení součástky co nejvíce omezit. Toho lze dosáhnout použitím termistoru o velké jmenovité hodnotě elektrického odporu nebo přivedením nízkého napájecího napětí. S použitím zákona o zachování energie zjistíme, že rychlost dodané tepelné energie součástce je přímo úměrná dodané elektrické energii [1, 2]:

$$\frac{dQ}{dt} = P = \frac{U^2}{R} = RI^2 \text{ (W)} \quad (2.4)$$

pro lepší pochopení zákonitostí je vhodné výše uvedený vzorec rozepsat:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_z}{dt} + \frac{dQ_a}{dt} \text{ (W)} \quad (2.5)$$

kde dQ [W] je celková změna tepelné energie, dQ_z [W] je tepelná ztráta termistoru a dQ_a [W] je teplo absorbované termistorem. Rychlost, jakou je teplo termistoru předáno do okolí, (tepelná ztráta Q_z [W]) je závislá na teplotě termistoru T_t [K] a na teplotě okolí T_o [K]:

$$\frac{dQ_z}{dt} = \delta(T_t - T_o) \text{ (W)} \quad (2.6)$$

kde δ [mW/°C] je disipační faktor, který je definován jako poměr disipační energie a teplotního gradientu. Disipační faktor je roven tepelné vodivosti mezi termistorem a jeho okolím. Převrácená hodnota této veličiny je známa také jako tepelný odpor objektu/prostředí:

$$r = \frac{1}{\delta} \text{ (°C/mW)} \quad (2.7)$$

Hodnota disipačního faktoru se odvíjí od celé řady proměnných jako například: designu termistoru, použitém materiálu, geometrickém uspořádání elektrod, tepelné radiaci z povrchu termistoru, rychlosti a vlastností prostředí/média (viskozita, tepelná kapacita, tepelná vodivost atd.) obklopujícího termistor [1, 2].

Rychlost, kterou je teplo Q_a do termistoru absorbováno, odpovídá tepelné kapacitě termistoru:

$$\frac{dQ_a}{dt} = C \frac{dT_t}{dt} \text{ (W)} \quad (2.8)$$

po dosazení do rovnice celkové změny tepelné energie:

$$\frac{dQ}{dt} = P = RI^2 = \delta(T_t - T_o) + C \frac{dT_t}{dt} \text{ (W)} \quad (2.9)$$

zde je popsáno tepelné chování termistoru, kdy je teplo generováno elektrickou energií. V případě, kdy je dodaný elektrický výkon konstantní, lze rovnici (2.9) upravit do tvaru:

$$\Delta T = (T_t - T_o) = \frac{P}{\delta} \left(1 - e^{-\frac{\delta}{C}t}\right) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.10)$$

Rovnice (2.10) se nazývá jako přechodová funkce a popisuje exponenciální růst teploty termistoru až do ustálené hodnoty, kdy absorpce tepelné energie je rovna ztrátě tepelné energie termistoru. O rychlosti této změny vypovídá časová konstanta tepelného systému, jenž je vyjádřena z přechodové funkce a je rovna součinu tepelné kapacity a tepelného odporu termistoru.

$$\tau = Cr \text{ (s)} \quad (2.11)$$

Jak je na první pohled patrné, časová konstanta vycházející z přechodové funkce popisující zjednodušené chování termistoru při samozahřívání je shodná s časovou konstantou vycházející z přechodové funkce popisující externí ohřev termistoru z kapitoly 1.2. Tato shoda je využita v praktické části této práce při měření časové konstanty.

Při eliminaci samozahřívání je získán nový tvar rovnice:

$$\frac{dT_t}{dt} = -\frac{\delta}{C}(T_t - T_o) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.12)$$

2.3 Přehled norem tuzemských a zahraničních institucí

Pro účely této práce posloužily následující normy, ze kterých bylo čerpáno a tvořily páteř postupu měření dynamických vlastností:

- **ČSN EN 60539-1 ed. 3** „*Přímo ohříváné termistory se záporným teplotním součinitelem – Část 1: kmenová specifikace*“
- **ČSN EN 60751** „*Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory*“
- **MIL-PRF-23648F w/ Amendment 2** „*Resistors, thermal (thermistors) insulated, general specification*“
- **VDI/VDE 3522 part 1** „*Dynamic behaviour of contact thermometers, principles and characteristic values*“

Pro další postup bylo nutné vybrat a správně definovat základní dynamické veličiny vhodné pro empirické ověření, a to za pomoci norem a technických listů.

Dynamické vlastnosti jsou předurčeny především zvoleným materiálem, rozměry a geometrickým uspořádáním citlivostního členu. Tyto aspekty jsou popsány veličinami jako je tepelná kapacita a tepelný odpor (disipační faktor). Vztah těchto veličin byl popsán v předchozích kapitolách, kde součin těchto veličin je roven časové konstantě. Na základě těchto znalostí byly pro empirické ověření dynamických vlastností zvoleny veličiny jako disipační faktor a časová konstanta. Časovou konstantu lze měřit dvěma způsoby, a to zahříváním termistoru nebo ochlazováním po jeho samozahřívání. S ohledem na dostupnou laboratorní infrastrukturu bylo zvoleno pouze měření časové konstanty při ochlazování termistoru po samozahřívání.

Disipační faktor nebo také koeficient samozahřívání popisuje zvýšení teploty termistoru na jednotku vyzářeného výkonu [7].

Při popisu doby odezvy snímače výrobci často ve svých technických listech uvádí mimo obvyklou časovou konstantu také veličinu nazývanou se doba teplotní odezvy. Ve výjimečných případech výrobce uvádí oba parametry. Tyto parametry mají v základě identickou vypovídající hodnotu. Doba, kterou termistor potřebuje na dosažení definovaného procenta z ustálené hodnoty na odezvu skokové změny teploty. U časové konstanty je toto procento pevně

definováno (63,2 %), jelikož vychází z přechodové funkce dynamického systému prvního řádu. V případě veličiny zvané doba teplotní odezvy je nezbytné pro specifikaci doby odezvy deklarovat procento odezvy. Obvykle 10 %, 50 %, nebo 90 % [7–9].

Při porovnání výše uvedených parametrů lze snadno určit jejich výhody a nevýhody. Výhodou časové konstanty je, že vychází z přechodové funkce a lze ji snadno určit i nepřímou metodou měření. Na druhou stranu má pevně definováno procento ustáleného stavu, které je dosaženo právě po uplynutí časové konstanty. Ta v některých případech nemusí být pro popis časové odezvy termistoru dostačující, ba dokonce může být i zavádějící. Z tohoto důvodu se používá právě veličina doba teplotní odezvy, u které je možné dané procento z ustáleného stavu volit dle způsobu průběhu přechodové funkce konkrétního termistoru. Nevýhodou doby teplotní odezvy je, že se získává především přímou metodou měření. Její dopočítání je vzhledem k nelineárnímu průběhu teplotně-odporové charakteristiky obtížné.

2.3.1 Měření disipačního faktoru

V normách [8, 9] je uveden postup pro měření disipačního faktoru. Následující body obsahují kombinaci obou postupů uvedených v těchto normách a také podmínky pro samotné měření.

- Termistor je umístěn do komory o objemu minimálně $1000 \times$ větším než je objem termistoru.
- Doporučená teplota komory je $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Prostředí uvnitř klimatické komory je stacionární, to je bez proudění.
- Je změřen elektrický odpor při nulovém zatížení pro teploty $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a $75 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Pro napájení je použit stejnosměrný zdroj elektrické energie E .
- Hodnoty elektrického napětí U_{Th} a elektrického proudu I_{Th} jsou nastaveny tak, aby poměr odpovídal elektrickému odporu při nulovém zatížení pro teplotu $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Termistor je zatěžován maximálně 15 min.
- Měření U_{Th} a I_{Th} je provedeno obvody o vysoké nominální hodnotě elektrického odporu a přesnosti $\pm 1 \%$ nebo lepší.
- Hodnoty U_{Th} a I_{Th} jsou zaznamenány.
- Zaznamenané hodnoty U_{Th} a I_{Th} jsou dosazeny do rovnice disipačního faktoru.

$$\delta = \frac{P}{50} = \frac{U_{Th} \cdot I_{Th}}{75 - 25} \text{ (mW/}^\circ\text{C)} \quad (2.13)$$

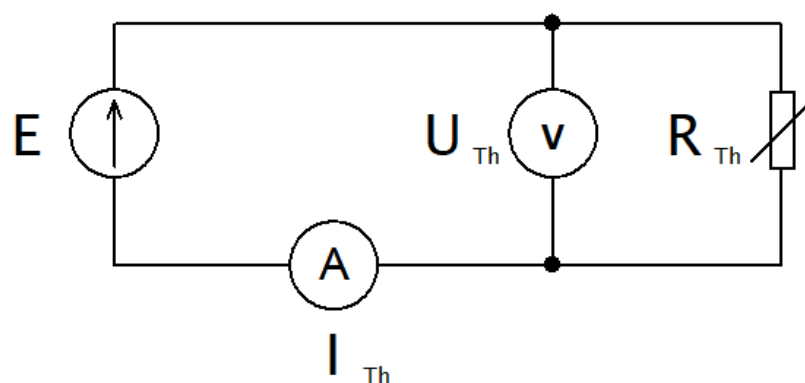


Schéma 2.1 Zapojení obvodu pro měření disipačního faktoru
(převzato s úpravami z [9])

2.3.2 Měření časové konstanty

V tuzemských i zahraničních normách [8, 9] jsou uvedeny dvě metody pro měření časové odezvy termistoru na skokovou změnu teploty, ať už reprezentovanou časovou konstantou nebo dobou teplotní odezvy. V následujících podkapitolách jsou uvedeny obě dvě metody. Základní rozdíl mezi nimi je, že v první metodě dochází k zahřívání termistoru a v druhé naopak k jeho ochlazení.

Rozdíl výsledků získaných na základě jedné nebo druhé metody je patrný z normy [10] německého institutu. V této normě jsou porovnány hodnoty časové konstanty pro zahřívání a ochlazení snímače. Z výsledků je zřejmé, že se časové konstanty neshodují. Z toho vyplývá, že časová konstanta je závislá na směru změny teploty, respektive jejím růstu či poklesu. Mimo jiné se v normě [10] také uvádí, že výsledek měření není závislý pouze na směru změny teploty, ale také na velikosti skokové změny. Proto je žádoucí při měření časové konstanty uvádět směr změny teploty a zároveň počáteční a koncovou hodnotu teplotního skoku.

V dostupných laboratorních podmínkách bylo možno použít pouze jednu metodu měření, a to zjištění časové konstanty při ochlazení po samozahřívání.

2.3.2.1 Měření časové konstanty při změně okolní teploty

Pro aplikaci této metody je nutné přemístit měřený vzorek z ustáleného prostředí o nižší teplotě (např. klimatická komora – 25 °C) do prostředí s vyšší teplotou. Předpokladem pro získání přesných výsledků je rychlost přemístění vzorku a rychlost výměny tepla mezi vzorkem a médiem, které je podmíněno mechanismem této tepelné výměny. Pokud se jedná o konvekci, musí být uvedeny doplňující informace jako je rychlost proudění nebo viskozita použitého média.

Po konstatování těchto skutečností bylo s ohledem na dostupnou laboratorní infrastrukturu od této metody upuštěno. Důvodem bylo nenaplnění výše zmíněného předpokladu o rychlém přemístění vzorku z jednoho prostředí do druhého. Při přemísťování vzorků, které by muselo být provedeno ručně, by do procesu měření byla s největší pravděpodobností zanesena chyba, která by svou velikostí odpovídala téměř velikosti časové konstanty při korektním postupu. Mimo jiné je zcela nemožné provést stejně rychlý přesun všech vzorků při opakovaném měření.

2.3.2.2 Měření časové konstanty při ochlazování po samozahřívání

Následující body obsahují kombinaci postupů uvedených v normách [8, 9] a také podmínky samotného měření.

- Termistor je umístěn do klimatické komory o objemu minimálně $1000 \times$ větším než je objem termistoru.
- Doporučená teplota klimatické komory je $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Je změřen elektrický odpor při nulovém zatížení pro teploty $43,4 \text{ }^\circ\text{C}$ a $75 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Hodnoty elektrického napětí U_{Th} a elektrického proudu I_{Th} jsou nastaveny tak, aby poměr odpovídal elektrickému odporu při nulovém zatížení pro teplotu $75 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Pro napájení je použit stejnosměrný zdroj elektrické energie E .
- Použitý obvod je fyzicky rozdělen (přepínačem) na dva samostatné obvody, výkonový (poloha A) a měřicí (poloha B).
- Přepínač je nastaven do polohy A, kdy je termistor propojen s výkonovým obvodem. Poměr U_{Th} a I_{Th} je nastaven tak, aby odpovídal elektrickému odporu při nulovém zatížení pro teplotu $75 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Měřicí můstek je vyvážen pro elektrický odpor při nulovém zatížení pro $43,4 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Měření započne po přemístění přepínače do polohy B, kdy je termistor propojen s měřicím obvodem. Od momentu přepnutí je stopován čas, a to do chvíle, kdy je dosaženo hodnoty elektrického odporu odpovídající vyváženému můstku, tj. $43,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

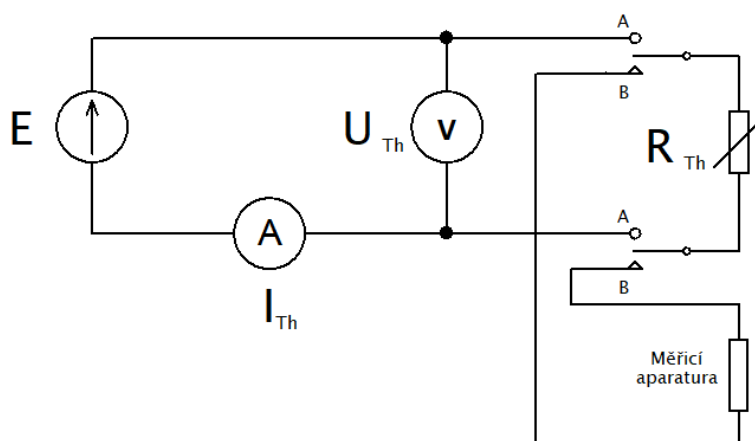


Schéma 2.2 Zapojení obvodu pro měření časové konstanty/doby teplotní odezvy (převzato s úpravami z [9])

3 Praktické ověření dynamických vlastností termistorů

Cílem praktické části bylo změřit hodnoty disipačního faktoru a časové konstanty/doby teplotní odezvy tištěných termistorů. Postup měření byl sestaven na základě úkonů doporučených normami a uzpůsoben dostupné laboratorní infrastruktuře.

Předmětem měření byly tištěné NTC termistory, které jsou tvořeny nosným substrátem v podobě flexibilní polymerní fólie (PET), sítotiskem nanesenou interdigitální elektrodovou strukturou na bázi Ag a finální vrstvou termo-senzitivní formulace. Formulaci tvoří polovodičová funkční složka na bázi metalických oxidů, polymerní pojivový systém a rozpouštědlový systém.

Postupy pro charakterizaci dynamických vlastností, uvedené v normách, byly upraveny pro dostupnou laboratorní infrastrukturu. Na základě získaných výsledků bylo provedeno porovnání tištěných vzorků termistorů s konvenčními termistory (dále jako referenční termistory), které byly vybrány na základě následujících požadavků:

- použití flexibilních materiálů v konstrukci termistoru,
- miniaturní rozměry, které splňují předpoklad malé tepelné kapacity,
- nízké hodnoty dynamických parametrů termistoru,
- jmenovitá hodnota elektrického odporu řádově srovnatelná s testovanými tištěnými termistory.

Na základě výše zmíněných predispozic byly vybrány tři typy referenčních termistorů pokrývající celé spektrum hodnot všech testovaných tištěných termistorů. Jmenovitě se jedná o termistory:

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

Pro ověření testovacího postupu byly nejdříve proměřeny dynamické parametry referenčních termistorů. Výsledky byly následně porovnány s daty uvedenými v technických listech referenčních termistorů. Na základě toho byla ověřena správnost postupu měření.

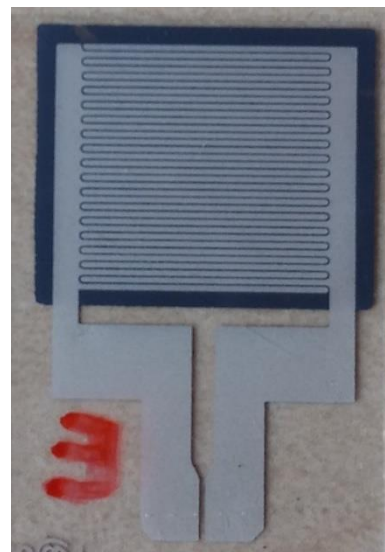
3.1 Příprava termistorů před měřením dynamických vlastností

Před samotným měřením dynamických vlastností byl proveden výběr reprezentativních vzorků tištěných termistorů (Obrázek 3.1), příprava měřicí kabeláže, kalibrace vzorků a sestavení systematického postupu pro zjištění optimálního nastavení měřicí aparatury pro charakterizaci dynamických vlastností. Následuje shrnutí nejpodstatnějších úkonů a jednotlivých nastavení:

- vizuální kontrola a proměření vzorků multimetrem,
- příprava kabeláže: holení kabelů, pocínování drátu, pájení a krimpování,
- kalibrace v olejové lázni 3x schody (-10; 50; -10) °C (50 hodin),
- aklimatizace vzorků v klimatické komoře při 25 °C a 40% RH (1 den),
- příprava měřicích profilů v ACS basic 2.0 pro SMU Keithley 2612B.

3.1.1 Výběr reprezentativních vzorků

Vzorky tištěných termistorů byly uspořádány v celkem osmi sadách a lišily se složením formulace termo-senzitivního materiálu a také způsobem zapouzdření senzitivní vrstvy. Každá z osmi sad obsahovala jednu ze čtyř formulací termo-senzitivního materiálu (*NTC1.0*, *NTC1.1*, *NTC2*, *NTC3*), kde každá formulace disponovala dvěma druhy zapouzdření: laminací PET fólie nebo přetiskem pomocí transparentního krycího laku. Z každé z těchto osmi sad byly vybrány vždy dva reprezentativní vzorky pro testování, celkem tedy 16 vzorků tištěných termistorů (Tabulka 3.1).



Obrázek 3.1 Vzorek tištěného NTC termistoru

Tabulka 3.1 Základní značení měřených vzorků a jejich rozdělení dle materiálových formulací

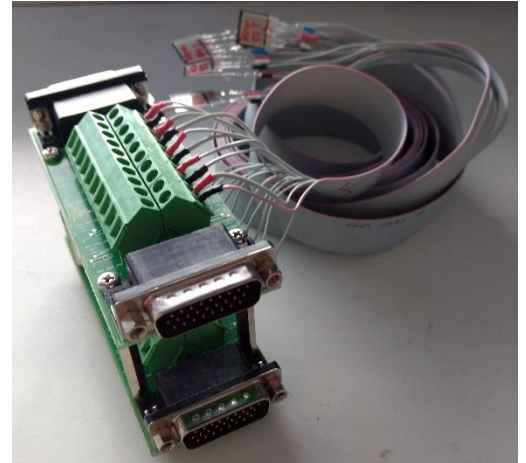
Zapouzdření	Materiálové formulace			
	<i>NTC1.0</i>	<i>NTC1.1</i>	<i>NTC2</i>	<i>NTC3</i>
<i>Transp.</i>	TERM 39_01	TERM 68_01	TERM 81_01	TERM 93_01
	TERM 39_02	TERM 68_02	TERM 81_02	TERM 93_02
<i>Lamino</i>	TERM 47_01	TERM 75_01	TERM 87_01	TERM 99_01
	TERM 47_02	TERM 75_02	TERM 87_02	TERM 99_02

Výběru každého vzorku termistoru předcházela vizuální kontrola natištěných elektrod a také orientační měření elektrického odporu multimetrem FLUKE 179 pro zjištění případného zkratu. Po provedení výše uvedených činností byly na každou ze dvou elektrod na vzorku připevněny za pomoci krimpovacích kleští dva pájecí piny s úmyslem využít čtyřbodovou metodu měření, viz (Obrázek 3.1).

Základnímu proměření multimetrem byly podrobeny také všechny tři typy referenčních termistorů. Každý referenční termistor, stejně jako termistory tištěné, měl dva své zástupce stejného druhu. V poslední fázi bylo všech 22 termistorů, z toho 16 tištěných a šest referenčních, připájeno na předem připravenou měřicí kabeláž.



Obrázek 3.2 Nakrimpované piny na vzorcích termistorů s připájenou měřicí kabeláží



Obrázek 3.3 Vzorky termistorů připojené k měřicímu přípravku

3.1.2 Příprava měřicí kabeláže

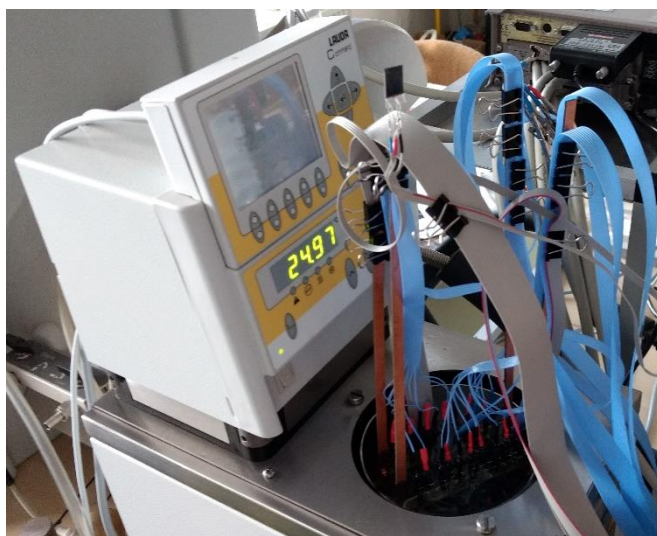
K propojení termistorů s měřicí aparaturou byl použit plochý 20 žilový kabel nestíněný (rozteč 1,27mm, jádro Cu pocínované, průměr 28 AWG – 0,32mm). Každý vzorek byl připojen čtyřmi samostatnými vodiči, aby bylo možné použít čtyřbodovou metodu měření. Z toho vyplývá, že na každém kabelu bylo připojeno celkem pět vzorků. Pro pokrytí všech 22 termistorů bylo nutné připravit pět samostatných kabelů při využití 88 vodičů. Každý vodič byl po odstranění bužírky na svém konci stočen a pocínován. Následně byly vodiče v každé čtveřici označeny bužírkou jiné barvy. Vzhledem k plánovanému použití krokosvorek, tedy vyššímu mechanickému namáhání na straně měřicí aparatury, byly na konce kabeláže připájeny pozlacené piny pro dosažení větší odolnosti proti mechanickému namáhání. Na druhý konec byly následně připájeny jednotlivé termistory prostřednictvím mechanicky nakrimpovaných pájecích terminálů. Každý kabel byl samostatně označen a pod tímto označením byly zaznamenány i vzorky termistorů připojené k tomuto kabelu, viz (*Tabulka 3.2*).

Tabulka 3.2 Seznam vzorků s označením a s provázáním označení měřicí kabeláže a vodičů

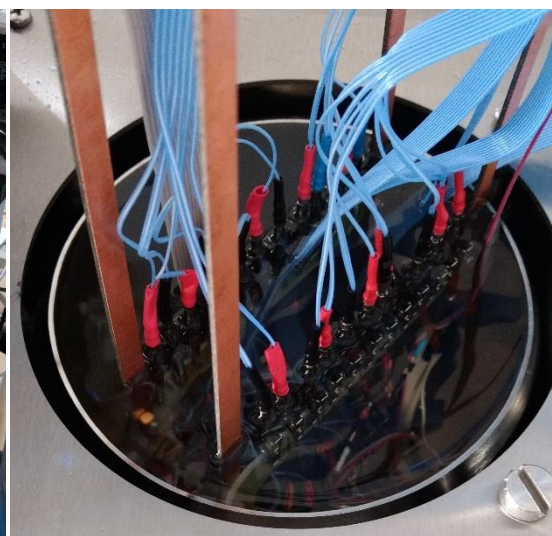
Termo-senz. formulace	Zapouzdření / enkapsulace	Panel / sada	č. vzorku	Agregované označ. vzorku	Měř. kabel	Vodiče
NTC 1.0	Transp.	TERM 39	11	TERM 39_11_T	K1	1-4
NTC 1.0	Transp.	TERM 39	12	TERM 39_12_T	K1	5-8
NTC 1.0	Lamino	TERM 47	11	TERM 47_11_L	K1	9-12
NTC 1.0	Lamino	TERM 47	12	TERM 47_12_L	K1	13-16
NTC 1.1	Transp.	TERM 68	11	TERM 68_11_T	K1	17-20
NTC 1.1	Transp.	TERM 68	12	TERM 68_12_T	K2	1-4
NTC 1.1	Lamino	TERM 75	11	TERM 75_11_L	K2	5-8
NTC 1.1	Lamino	TERM 75	12	TERM 75_12_L	K2	9-12
NTC 2	Transp.	TERM 81	11	TERM 81_11_T	K2	13-16
NTC 2	Transp.	TERM 81	12	TERM 81_12_T	K2	17-20
NTC 2	Lamino	TERM 87	11	TERM 87_11_L	K3	1-4
NTC 2	Lamino	TERM 87	12	TERM 87_12_L	K3	5-8
NTC 3	Transp.	TERM 93	11	TERM 93_11_T	K3	9-12
NTC 3	Transp.	TERM 93	12	TERM 93_12_T	K3	13-16
NTC 3	Lamino	TERM 99	11	TERM 99_11_L	K3	17-20
NTC 3	Lamino	TERM 99	12	TERM 99_12_L	K4	1-4
REF_TERM		REF_ATC100k		REF_ATC100k_01	K5	1-4
REF_TERM		REF_ATC100k		REF_ATC100k_02	K5	5-8
REF_TERM		REF_TKS30k		REF_TKS30k_01	K4	5-8
REF_TERM		REF_TKS30k		REF_TKS30k_02	K4	9-12
REF_TERM		REF_AVX1M		REF_AVX1M_01	K4	13-16
REF_TERM		REF_AVX1M		REF_AVX1M_02	K4	17-20

3.1.3 Kalibrace termistorů

Před započítím měření dynamických vlastností byla provedena kalibrace termistorů v olejové lázni. Termostatická lázeň Lauda ProLine PJL12 (Obrázek 3.4) obsahovala silikonový olej (Obrázek 3.5), do kterého byly termistory umístěny na časový interval dlouhý 50 hodin. Teplota lázně byla měněna po 5 °C krocích v rozmezí od -10 °C do 50 °C. Celkem proběhly tři plnohodnotné cykly změny teploty, přičemž hodnota teploty pro začátek i konec měření byla -10 °C.



Obrázek 3.4 Termostatická lázeň Lauda ProLine PJL12



Obrázek 3.5 Detail nádoby termostatické lázně s termistorem ponořenými v silikonovém oleji

Kalibrace termistorů byla provedena s dvojím účelem. Prvním účelem bylo provedení aklimatizace, tedy ustálení vlastností materiálové struktury termo-senzitivní vrstvy za různých podmínek. V tomto případě se jednalo o podmínky vytvořené přesně stanoveným rozmezím teplot olejové lázně. Druhým účelem bylo zjištění elektrického odporu termistoru při nulovém zatížení a za předem stanovených teplot (25 °C, 35 °C, 50 °C). Elektrický odpor při nulovém zatížení je odpor, při kterém dochází k minimálnímu samozahřívání vlivem průchodu měřicího elektrického proudu. Fenoménu samozahřívání termistorů se samostatně věnuje kapitola 2.2.

Jedním z předpokladů při vyhodnocování výsledků z kalibrace termistorů bylo, že průběhy termistorů o stejné materiálové formulaci a způsobu zapouzdření budou v každém okamžiku měření vykazovat stejné chování, tj. budou nabývat stejných hodnot.

U většiny dvojic však dochází k více či méně výrazným odchylkám, které mohou být způsobeny například:

- kontaminací nebo porušením materiálové jednotlosti při tištění vzorků,
- kontaminací vzorků po tištění,
- mechanickým poškozením termo-senzitivní vrstvy při manipulaci se vzorky,
- vystavením vzorků vysokým teplotám při jejich pájení ke kabeláži,
- vlivem cyklování teploty olejové lázně na materiálovou formulaci.

Všechny tyto faktory, kterým byly jednotlivé vzorky více či méně vystaveny, mohou mít různě významný vliv na odchylky mezi stejnými vzorky.

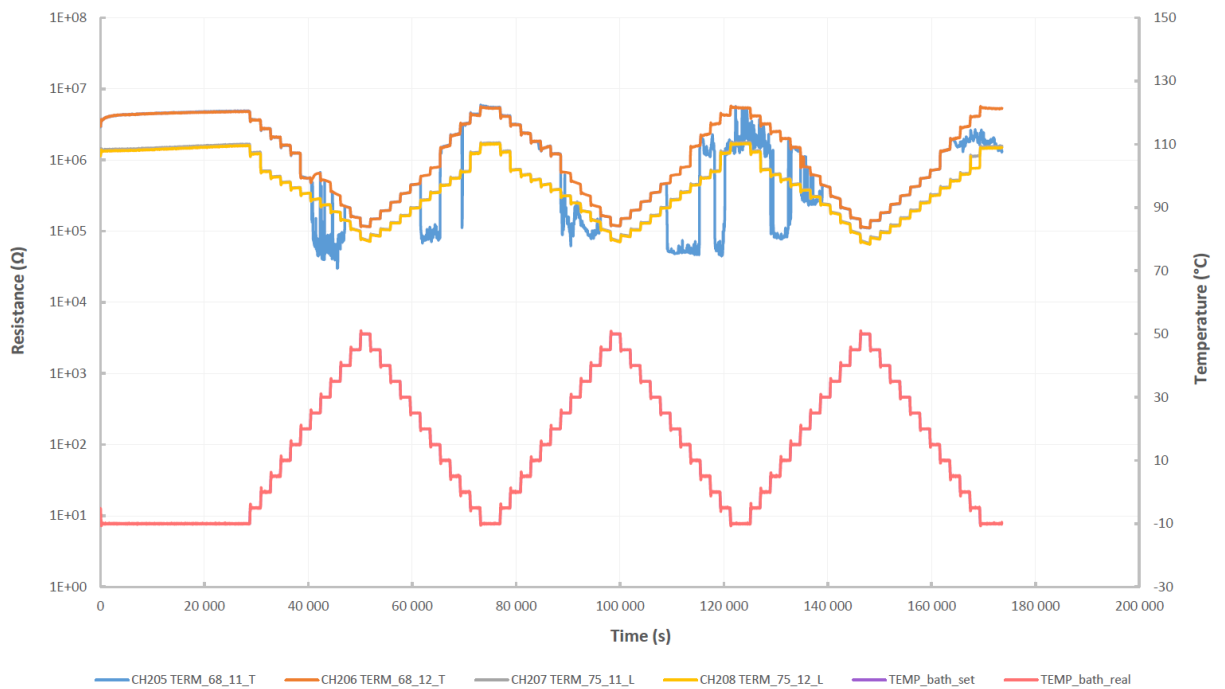
Mimo výše popsané odchylky mezi vzorky stejného druhu byly při vyhodnocování výsledků z kalibrace v olejové lázni zjištěny výrazné deformace a abnormality v průbězích těchto termistorů: TERM 39_12_T, TERM 68_11_T a TERM 93_11_T.



Graf 3.1 Teplotně-odporová závislost vzorků TERM 39 a TERM 47 v olej. lázni

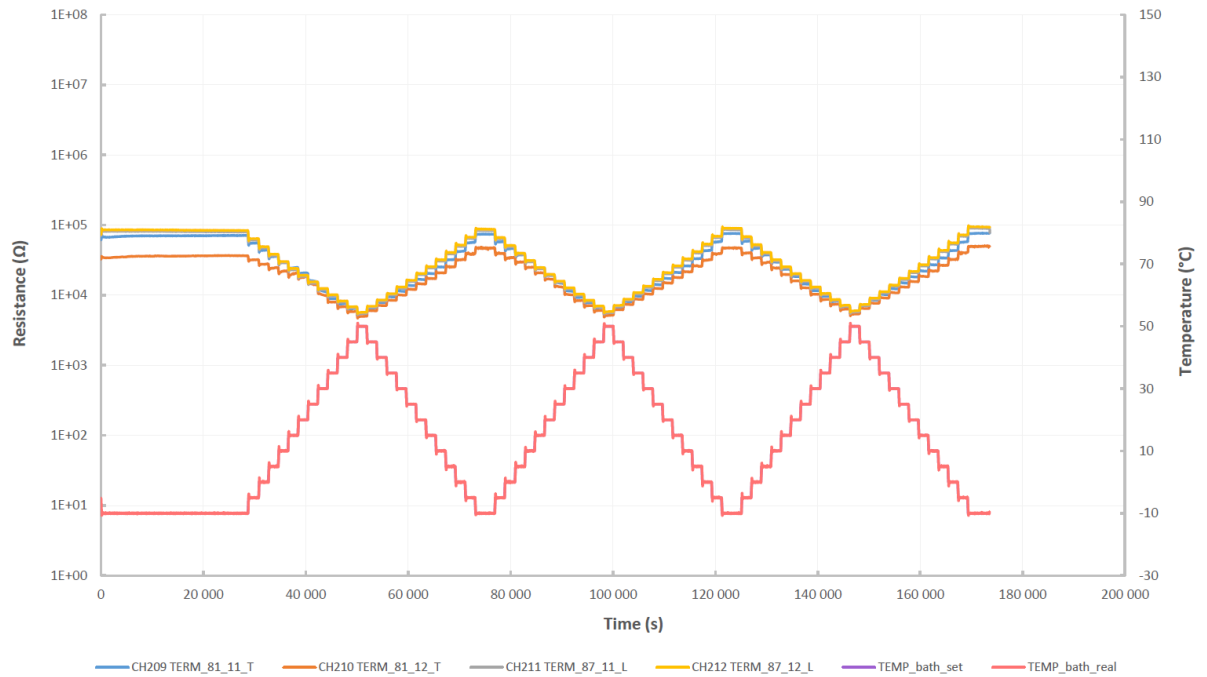
U vzorku TERM 39_12_T docházelo k deformaci hodnot elektrického odporu pouze při nízkých teplotách. U druhého vzorku stejného druhu, TERM 39_11_T, k těmto deformacím při nízkých teplotách nedocházelo. Příčinou může být například přepínání měřicího rozsahu

digitálního multimetru. Tento jev se opakoval i u jiných vzorků. Navzdory tomu však hodnoty dynamických veličin obou vzorků vycházely téměř shodně.



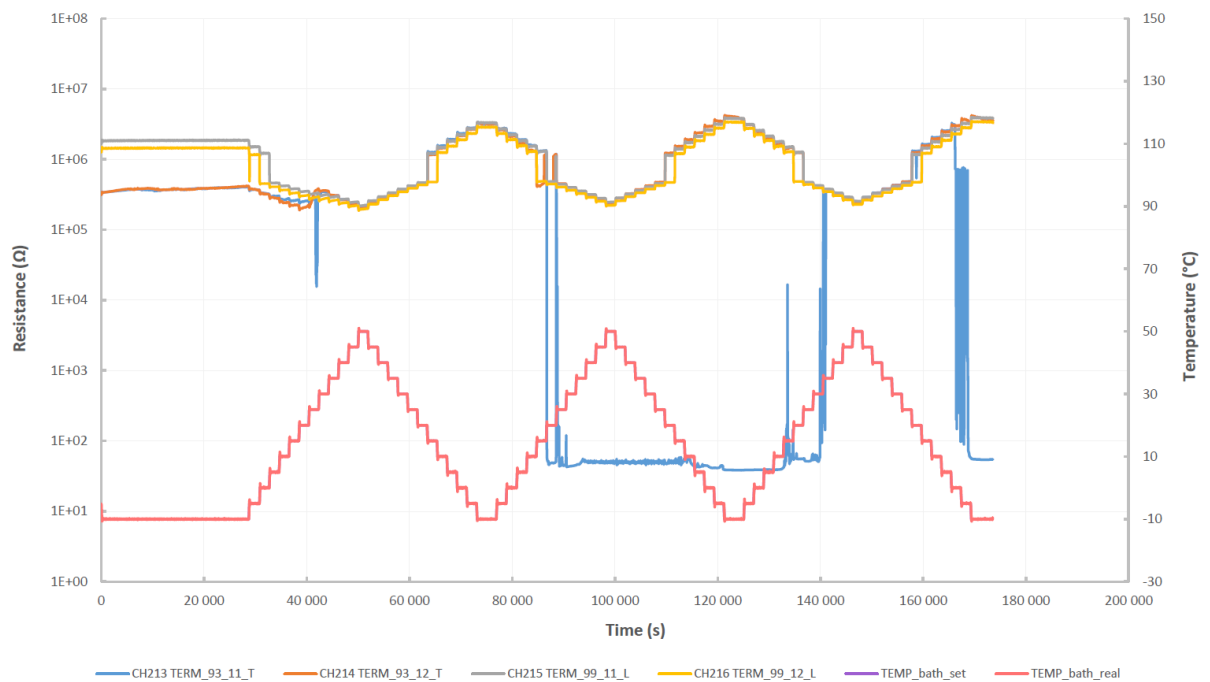
Graf 3.2 Teplotně-odporová závislost vzorků TERM 68 a TERM 75 v olej. lázni

Hodnoty elektrického odporu vzorku TERM 68_11_T (viz Graf 3.2) nabývaly při nižších a středních teplotách nahodilých hodnot, které v žádném případě neodpovídají předpokladům. Z tohoto důvodu byl tento vzorek vyřazen z navazujících měření dynamických vlastností.



Graf 3.3 Teplotně-odporová závislost vzorků TERM_81 a TERM_87 v olej. lázni

U vzorků TERM_81 a TERM_87 nedocházelo ke zjevným abnormalitám (Graf 3.3).



Graf 3.4 Teplotně-odporová závislost vzorků TERM_93 a TERM_99 v olej. lázni

Téměř identické chování jako u vzorku TERM_68_11_T lze pozorovat i u vzorku TERM_93_11_T. Z tohoto důvodu nebyl vzorek pro další měření použit.

Dále bylo při vyhodnocování kalibračních dat zjištěno, že při opakovaném cyklování teploty se hodnoty elektrického odporu pro stejné teploty v jednotlivých cyklech mírně liší.

S odkazem na výše popsany trend změny elektrického odporu byla použita pouze data naměřená v posledním cyklu změny teploty olejové lázně. Tato data byla pro další měření považována za dostatečně ustálené hodnoty.

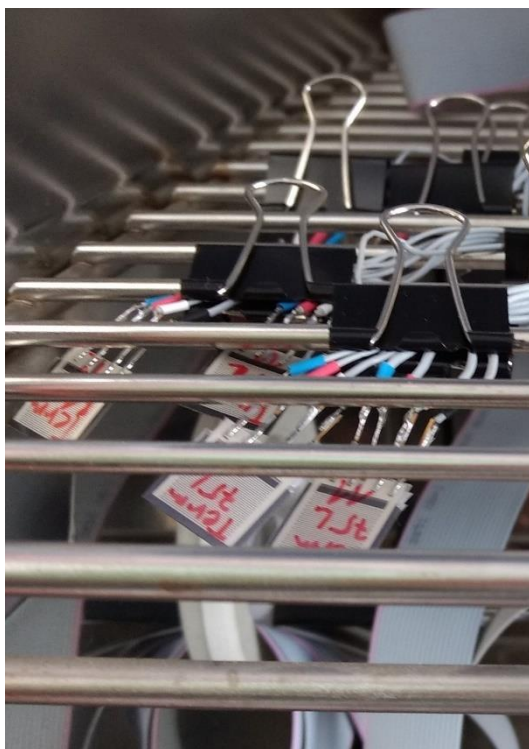
V posledním kroku byla data vzorků, jejichž průběhy se chovaly dle předpokladů, podrobena filtraci s cílem zjištění hodnot elektrického odporu při zanedbatelně nízkém výkonovém zatížení (tzv. *zero power resistance*) pro různé teploty. Data byla pro každý termistor vybrána vždy v ustálené oblasti jednotlivých teplotních úrovní, a to samostatně pro stoupající a klesající část teplotního profilu v termostatické lázni. Tato data byla po základním filtrování zprůměrována. Tak byl stanoven přibližný elektrický odpor při nulovém zatížení pro 25 °C, 35 °C a 50 °C. Hodnota elektrického odporu při nulovém zatížení pro teplotu 25 °C je jedním ze základních parametrů každého termistoru. Tento parametr se v literatuře objevuje také pod pojmy: nominální odpor termistoru nebo jmenovitý odpor termistoru.

Tabulka 3.3 obsahuje upravená data z měření elektrického odporu vzorků při nulovém zatížení v olejové lázni

Agregované označ.	R_{25}^{\uparrow} [Ω]	R_{25}^{\downarrow} [Ω]	R_{35}^{\uparrow} [Ω]	R_{35}^{\downarrow} [Ω]	R_{50} [Ω]
TERM 39_11_T	263 740	246 570	208 774	197 814	137 546
TERM 39_12_T	306 524	287 903	239 587	228 054	154 277
TERM 47_11_L	203 092	196 284	161 244	155 318	106 143
TERM 47_12_L	202 324	191 525	158 641	150 536	101 519
TERM 68_11_T	319 597	420 717	298 980	238 412	112 028
TERM 68_12_T	612 036	423 426	300 714	241 129	113 619
TERM 75_11_L	308 690	199 276	181 097	122 500	70 380
TERM 75_12_L	301 782	192 130	176 540	118 029	68 058
TERM 81_11_T	14 408	15 003	9 607	10 249	5 811
TERM 81_12_T	12 727	13 087	8 651	9 156	5 345
TERM 87_11_L	15 574	16 690	10 184	10 774	5 740
TERM 87_12_L	16 209	17 374	10 597	11 229	5 968
TERM 93_11_T	-	482 654	345 059	382 190	245 859
TERM 93_12_T	459 997	479 868	356 948	376 206	238 385
TERM 99_11_L	472 701	461 405	378 552	370 494	254 799
TERM 99_12_L	438 863	426 692	348 218	338 247	229 183
REF TKS30K	29 482	29 482	19 304	19 304	5 331
REF ATC100K	99 280	99 280	62 151	62 151	32 223
REF AVX1M	1 022 351	1 022 351	622 610	622 610	308 755

3.1.4 Uložení a aklimatizace vzorků v ustáleném prostředí klimatické komory

Po vyjmutí z olejové lázně byly termistory usušeny a mechanicky očištěny od zbytků silikonového oleje na jejich povrchu. Takto připravené termistory byly umístěny do klimatické komory Vötsch VC 7018, kde byly připevněny za pomoci klipsů ke kovovému roštu (Obrázek 3.6). Měřicí kabeláž byla vedena podél stěn klimatické komory až k průchodce, kudy byla protažena ven k měřicí aparatuře. Průchodka poté byla pečlivě utěsněna. Klimatická komora udržovala konstantní vnitřní prostředí o teplotě 25 °C a 40% relativní vlhkosti. Prostor uvnitř klimatické komory však nebylo stacionární, vnitřní ventilátor udržoval z důvodu správné regulace stálý průtok vzduchu. Tímto nastavením však nemohlo být dosaženo stacionárního prostředí, prostředí bez proudícího vzduchu, které bylo podmínkou měření disipačního faktoru dle normy [9]. Tento problém byl vyřešen za pomoci plastového víka, které bylo umístěno nad kovový rošt s termistory, aby proudění vzduchu v jejich blízkosti bylo co nejvíce omezeno (Obrázek 3.7).



Obrázek 3.6 Vzorky termistorů upevněné ke kovovému roštu v klimatické komoře



Obrázek 3.7 Plastové víko pro odstínění proudícího vzduchu uvnitř klimatické komory

3.1.5 SMU jednotka Keithley 2612B a software ACS basic 2.0

Posledním krokem před měřením dynamických vlastností bylo seznámení s měřicím softwarem ACS basic 2.0, který umožňoval přesnou konfiguraci parametrů měření a sběr naměřených dat z SMU jednotky Keithley 2612B připojené k PC.



Obrázek 3.8 Keithley 2612B (převzato z [11])

Komunikace mezi SMU jednotkou a PC byla zprostředkována skrze USB adaptér na GPIB rozhraní (*KUSB-488B*). Na straně měřicí aparatury bylo pro připojení využito GPIB/IEEE 488 rozhraní a na straně PC USB port.

SMU jednotka funguje jako programovatelný zdroj elektrického napětí/proudu a zároveň disponuje měřicími funkcemi elektrického napětí/proudu. Jednotka má k dispozici dva měřicí kanály, které umožňují měření dvou vzorků současně. Vzhledem k vysoké rychlosti provedených měření byl využit pouze jeden kanál. Kanály disponují čtyřmi vodiči: Force – High/Low, Sense – High/Low umožňující čtyřbodovou metodu měření.

Pro zkušební měření byly použity vyřazené vzorky tištěných termistorů. Na těchto vzorcích byla provedena orientační konfigurace jednotlivých parametrů. Následně bylo zkoumáno chování jednotlivých vzorků. Na základě těchto pokusů bylo stanoveno výchozí nastavení veškerých potřebných parametrů v softwaru ACS basic 2.0:

Tabulka 3.4 Nastavené hodnoty jednotlivých parametrů v softwaru ACS basic 2.0

Úvodní stránka s nastavením							
Pad	Function	Force mode	Source	Measure	Compliance	Meas. range	Advanced
Remote	I Bias	DC	I	I+V	20V	auto	Best fixed
Timing							
Speed	PLC	AVG	Hold time	Timestamp	Period	Measure delay	Sample
Custom	1	-	-	Enabled	-	1	30

Následuje krátký popis parametrů z (Tabulka 3.4):

- *Function* volí průběh funkce veličiny použité pro napájení (*bias*, *steep*, *CSV list-custom*), apod.
- *Force mode* nabízí na výběr mezi stejnosměrným napájením (*DC*) nebo pulzním napájením (*Pulse*). Vzhledem k potřebě vzorek zatížit kontinuálním elektrickým proudem, bylo nutné použít pouze stejnosměrným napájení.
- *Source* volí mezi použitím napěťového nebo proudového zdroje.
- V parametru *Measure* uživatel volí z nabídky měřených veličin (*U [V]*, *I [A]*, *U+I [V, A]*).
- *Compliance* definuje max. hodnotu povoleného namáhání elektrickým napětím. Pro tištěné termistory byla stanovena hranice 20V. Tato hodnota se zdála být jako dostačující a zároveň bylo empiricky ověřeno, že při ní nedochází vlivem elektrického namáhání k poškození termo-senzitivní vrstvy. Nicméně pro vzorky TERM (68, 75, 81, 87) bylo nutné použít vyšší elektrické napětí, aby bylo možné snížit elektrický odpor odpovídající hodnotě R_{50} .
- *Meas. range* upravuje rozsah měření (2 V, 20 V, 200 V, *auto*).
- *Advanced* nabízí další rozšířená nastavení.
- Změnou hodnoty *PLC* (*Power Line Cycles*) uživatel zkracuje či prodlužuje dobu integrace šumu obsaženého ve střídavém napájecím signálu. Nastavením hodnoty *PLC* rovné 1 nebo hodnotě vyšší se zvyšuje rozlišení a přesnost měření. Avšak se zvyšující se přesností se snižuje rychlost snímání měřené veličiny.
- *Measure delay (MS)* má vliv na počet zaznamenaných hodnot za jednotku času, která je volena uživatelem.

3.2 Měření disipačního faktoru

Cílem tohoto měření bylo snížit elektrický odpor termistoru vlivem samozahřívání na hodnoty, které odpovídaly teplotě 50 °C a poté odečíst hodnoty elektrického proudu a elektrického napětí z měřicích přístrojů. Následně byly tyto hodnoty dosazeny do vzorce (3.1) a z něho byla dopočítána hodnota disipačního faktoru.

$$\delta = \frac{P}{25} = \frac{U_{Th} \cdot I_{Th}}{50 - 25} \text{ (mW/}^\circ\text{C)} \quad (3.1)$$

Při průchodu elektrického proudu dochází vlivem Joulových ztrát k samozahřívání termistoru a ten mění svůj elektrický odpor stejně jako při změně okolní teploty. Tohoto jevu bylo využito jak pro měření disipačního faktoru, tak i pro měření časové konstanty/doby teplotní odezvy. Hodnota elektrického odporu odpovídající teplotě 50 °C, byla získána při měření odporově teplotní závislosti termistorů v olejové lázni.

Pro snazší určení velikosti elektrického proudu, který vlivem samozahřívání sníží elektrický odpor termistoru na hodnotu odpovídající teplotě 50 °C, byla vytvořena proudová rampa. Proudová rampa byla sestavena v softwaru Excel jako CSV soubor, který byl následně importován do softwaru ACS basic 2.0. Hodnoty obsažené v tomto CSV souboru byly určeny pro měření proudové závislosti všech vzorků. Takto byly získány řádově blízké hodnoty elektrického odporu odpovídající pro R_{50} , které byly postupně optimalizovány pro jednotlivé vzorky. Zjištění přesné hodnoty elektrického proudu pro danou velikost elektrického odporu bylo provedeno jemným laděním výkonu proudového zdroje.

Výchozí nastavení všech parametrů v softwaru ACS basic, které bylo pro všechny termistory totožné, je uvedeno v tabulce (Tabulka 3.5).

Tabulka 3.5 Nastavení parametrů pro měření disipačního faktoru

Úvodní stránka s nastavením							
Pad	Function	Force mode	Source	Measure	Compliance	Meas. range	Advanced
Remote	I Bias	DC	I	I+V	55V	auto	Best fixed
Timing							
Speed	PLC	AVG	Hold time	Timestamp	Period	Measure delay	Sample
Custom	1	-	15	Enabled	-	1	60

Při nastavení časového průběhu měření disipačního faktoru byla stěžejní především přesnost změřených hodnot a nikoliv rychlost jejich měření. Proto byla pro veličinu *MS* a *PLC* nastavena hodnota 1.

Srovnání hodnot parametrů použitých při měření a parametrů doporučených dle norem je obsaženo v (*Tabulka 3.6*).

Tabulka 3.6 Srovnání hodnot klíčových parametrů uvedených v normách a použitých při měření

	Norm. postup	Proved. postup
<i>Objem komory je mi. 1000× větší než objem vzorku</i>	Ano	Ano
<i>Teplota klimatické komory</i>	25 °C ± 5 °C	25 °C
<i>Pohyb média v klimatické komoře</i>	Stacionární	Mechanicky omezen
<i>Elektrický odpor při nulovém zatížení změřen při teplotě</i>	25 °C a 75/85 °C	25 °C a 50 °C
<i>Zdroj elektrické energie</i>	ss	ss
<i>Poměr U a I odpovídá elektrickému odporu při teplotě</i>	75/85 °C	50 °C
<i>Doba měření</i>	Max. 15 min.	75 sekund

Automatické zaznamenávání hodnot elektrického proudu a napětí započalo po 15 sekundové prodlevě, kdy se vzorek vlivem samozahřívání prohřál v celém svém objemu a elektrický odpor se ustálil. Celé měření trvalo přesně 75 sekund včetně 15 sekundové prodlevy. Každou sekundu byla zaznamenána hodnota elektrického proudu a napětí. Celkem tedy 60 hodnot.

Pro každý vzorek byla takto provedena tři samostatná měření s 20 sekundovým rozestupem mezi každým měřením. Hodnoty, které byly softwarem ACS basic zaznamenány, byly exportovány do CSV souboru. Pro každé ze tří měření byl vypočten aritmetický průměr, směrodatná odchylka a z ní také variační koeficient, viz (*Tabulka 3.7*). V úplném závěru byl z výsledků třech samostatných měření vypočten aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. To přispělo k snazšímu porovnání výsledků mezi jednotlivými měřeními a zároveň byla získána reprezentativní hodnota disipačního faktoru pro jeden vzorek, viz (*Tabulka 3.8*).

Tabulka 3.7 Výsledky měření disipačního faktoru a variačního koeficientu

Vzorky termistorů	1. měření		2. měření		3. měření	
	δ [mW]	var. koef. [%]	δ [mW]	var. koef. [%]	δ [mW]	var. koef. [%]
REF TKS30K_01	2,162	0,33	2,164	0,44	2,163	0,36
REF TKS30K_02	2,010	0,25	2,010	0,23	2,011	0,24
REF ATC100K_01	1,034	0,30	1,033	0,31	1,032	0,32
REF ATC100K_02	1,142	0,47	1,141	0,40	1,141	0,35
TERM 39_11_T	0,025	0,03	0,025	0,04	0,025	0,06
TERM 39_12_T	0,025	0,03	0,025	0,03	0,025	0,02
TERM 47_11_L	0,036	0,05	0,036	0,05	0,036	0,05
TERM 47_12_L	0,034	0,04	0,034	0,03	0,034	0,02
TERM 68_12_T	0,969	3,48	0,966	2,02	0,969	1,99
TERM 75_11_L	0,660	0,19	0,663	0,17	0,670	0,18
TERM 81_11_T	9,710	0,85	9,737	0,70	9,788	0,80
TERM 81_12_T	11,293	1,03	11,408	0,59	11,486	0,58
TERM 87_11_L	10,915	0,65	10,947	0,85	10,977	0,87
TERM 87_12_L	11,482	1,16	11,736	1,86	11,749	2,07
TERM 99_11_L	0,005	0,43	0,005	0,39	0,005	0,28
TERM 99_12_L	0,005	0,52	0,005	0,32	0,005	0,40

Tabulka 3.8 Zprůměrované výsledky
Disipačního faktoru a var. koef. ze všech třech měření

Vzorky termistorů	δ [mW]	var. koef. [%]
REF TKS 30K_01	2,163	0,07
REF TKS 30K_02	2,010	0,02
REF ATC 100K_01	1,033	0,11
REF ATC 100K_02	1,141	0,03
TERM 39_11_T	0,025	0,07
TERM 39_12_T	0,025	0,09
TERM 47_11_L	0,036	0,06
TERM 47_12_L	0,034	0,05
TERM 68_12_T	0,968	0,17
TERM 75_11_L	0,665	0,77
TERM 81_11_T	9,745	0,41
TERM 81_12_T	11,396	0,85
TERM 87_11_L	10,947	0,28
TERM 87_12_L	11,656	1,29
TERM 99_11_L	0,005	0,50
TERM 99_12_L	0,005	0,62

3.3 Měření časové konstanty a doby teplotní odezvy

Pro měření časové konstanty byla zvolena metoda měření ochlazováním po samozahřívání zkoumaného vzorku. Postup měření byl následující. Vzorky byly umístěny do klimatické komory o teplotě T_a . Byl proveden teplotní skok z teploty T_b na teplotu klimatické komory T_a . Čas byl stopován od počátku změny teploty až po moment, kdy odpor vzorku odpovídal teplotě T_i . Tato hodnota byla spočtena na základě vzorce (3.2) uvedeného v normách [8, 9].

$$T_i = T_b - (T_b - T_a) \cdot 0,632 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.2)$$

dosazením, kdy teplota klimatické komory $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ a vrcholová teplota skoku $T_b = 50 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$T_i = 50 - (50 - 25) \cdot 0,632 = 34,2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

Z praktického hlediska byla hodnota teploty T_i upravena. Důvodem byla absence přesných hodnot elektrického odporu při teplotě $34,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Z měření závislosti elektrického odporu na teplotě v olejové lázni byly k dispozici pouze hodnoty elektrického odporu odpovídající teplotám $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Jednou z možností, jak získat hodnotu elektrického odporu odpovídající teplotě $34,2 \text{ }^\circ\text{C}$, bylo provedení jednoduché lineární interpolace. Avšak použití lineární interpolace pro nelineární závislost NTC termistoru se jeví jako nevhodné. Pro další měření byla použita hodnota elektrického odporu odpovídající teplotě $35 \text{ }^\circ\text{C}$ s vědomím, že výsledek nebude možné považovat za přesnou hodnotu časové konstanty (63,2 %), ale jako dobu teplotní odezvy deklarovanou pro cca 60 % ustálené hodnoty elektrického odporu termistoru.

Po uvážení velikosti vzniklé chyby bude termín časová konstanta i nadále používán. Pro korektnost bude tato chyba zanesena do celkové chyby měření.

Dalším krokem bylo nastavení optimálních hodnot jednotlivých parametrů v měřicím softwaru ACS basic 2.0. Dále bylo nutné připravit CSV soubor obsahující posloupnost hodnot elektrického proudu, které vlivem samozahřívání způsobí snížení elektrického odporu na hodnoty odpovídající elektrickému odporu při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnoty v souboru byly seřazeny tak, aby výsledný průběh odpovídal obdélníkovému signálu. Délka trvání jedné periody je 60 sekund, přičemž střída je v poměru 1:1. Jedno měření sestává ze tří period.

Konfiguraci časování byla, stejně jako u měření disipačního faktoru, věnována zvýšená pozornost. V tomto měření byl však důraz kladen na rychlost zaznamenaných dat a nikoliv na jejich přesnost. Z toho důvodu bylo *MS* nastaveno na 0,1 a hodnota *PLC* rovněž na 0,1.

Tabulka 3.9 Nastavení parametrů pro měření časové konstanty a doby teplotní odezvy

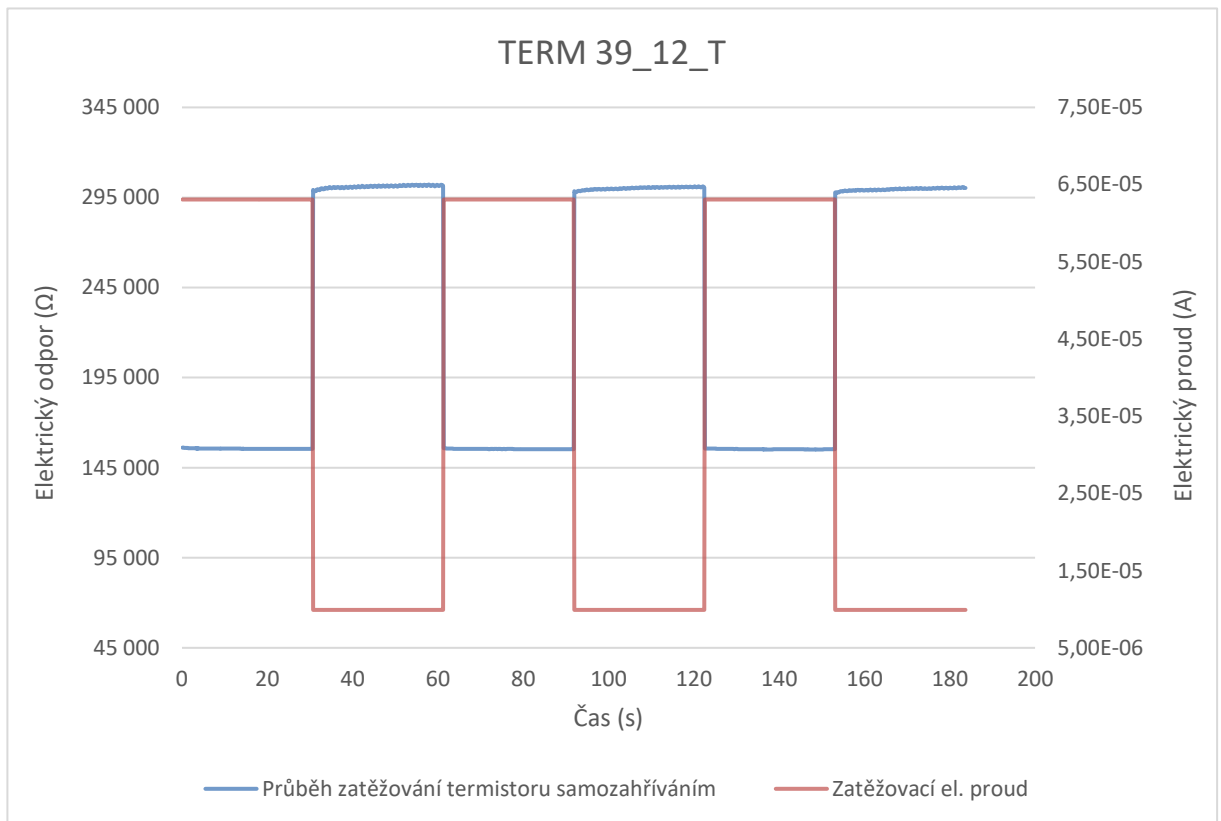
Úvodní stránka s nastavením							
Pad	Function	Force mode	Source	Measure	Compliance	Meas. range	Advanced
Remote	List I	DC	I	I+V	55V	auto	Best fixed
Timing							
Speed	PLC	AVG	Hold time	Timestamp	Period	Measure delay	Sample
Custom	0,1	-	-	Enabled	-	1e-1	-

Celkem byla provedena tři samostatná měření. Každé měření sestávalo ze tří period. Celkem bylo naměřeno 5400 hodnot pro každý vzorek.

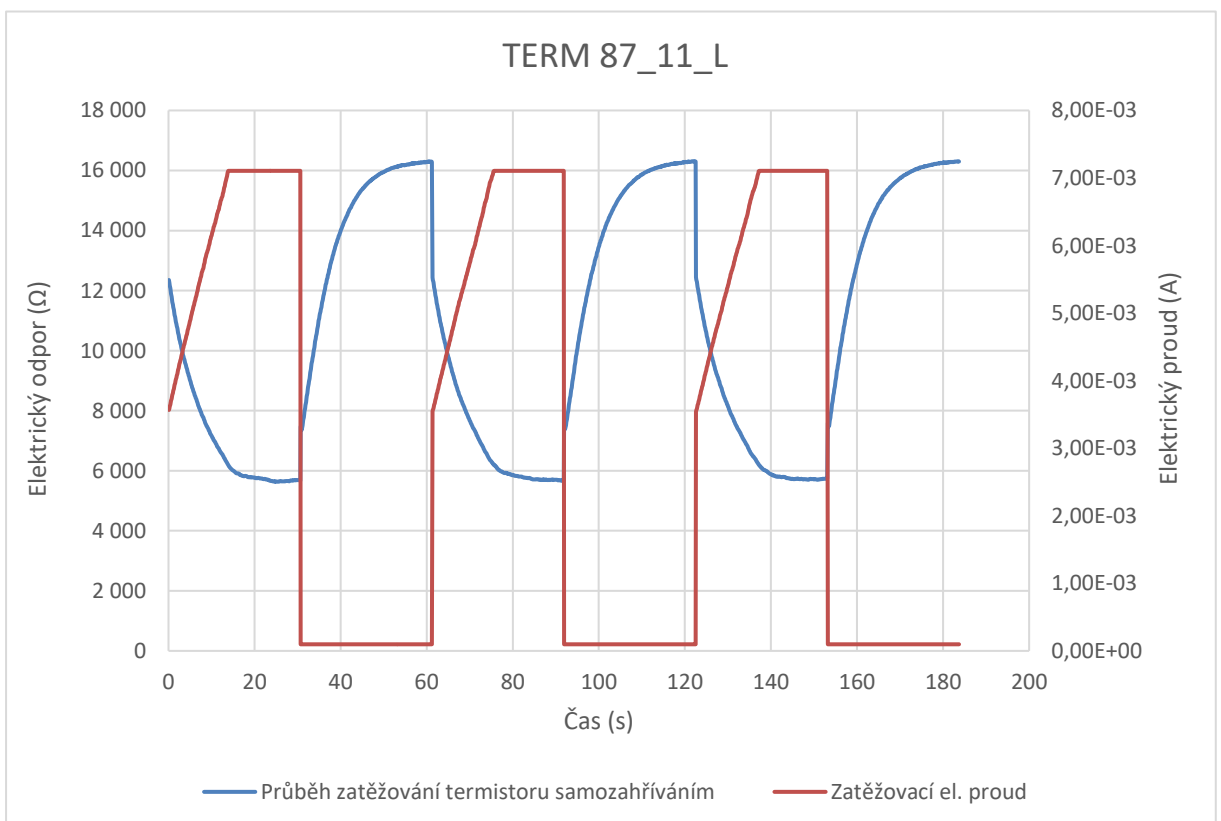
Tabulka 3.10 Srovnání hodnot klíčových parametrů uvedených v normách a použitých

	Norm. postup	Proved. postup
Objem komory je mi. 1000× větší než objem vzorku	Ano	Ano
Teplota klimatické komory	25 °C ± 5 °C	25 °C
Pohyb média v klimatické komoře	Nucený	Nucený (ventilátorem)
Elektrický odpor při nulovém zatížení změřen při teplotě	25 °C a 75/85 °C	25 °C a 50 °C
Zdroj elektrické energie	ss	ss
Poměr <i>U</i> a <i>I</i> odpovídá elektrickému odporu při teplotě	75/85 °C	50 °C
	.	

Postupným proměřením vzorků bylo zjištěno, že vzorky TERM (39, 47, 68, 75, 99) reagují příliš rychle na to, aby s dostupnou měřicí aparaturou bylo reálné zaznamenat hodnotu časové konstanty. Téměř okamžitě po skokové změně teploty (hodnoty elektrického proudu) nabyla přechodová funkce termistorů ustálené hodnoty (Graf 3.5). Z tohoto důvodu byla změřena pouze doba teplotní odezvy na 99,9 % ustálené hodnoty. Zbylé vzorky TERM (81, 87) a referenční termistory (ATC 100K, TKS 30K) byly dle původního plánu podrobeny měření časové konstanty a po té i doby teplotní odezvy na 99,9 % ustálené hodnoty (Graf 3.6).



Graf 3.5 Průběh zatěžovací charakteristiky TERM 39_12_T. Z grafu je patrná okamžitá reakce na změnu elektrického proudu (teploty) s následným ustálením.

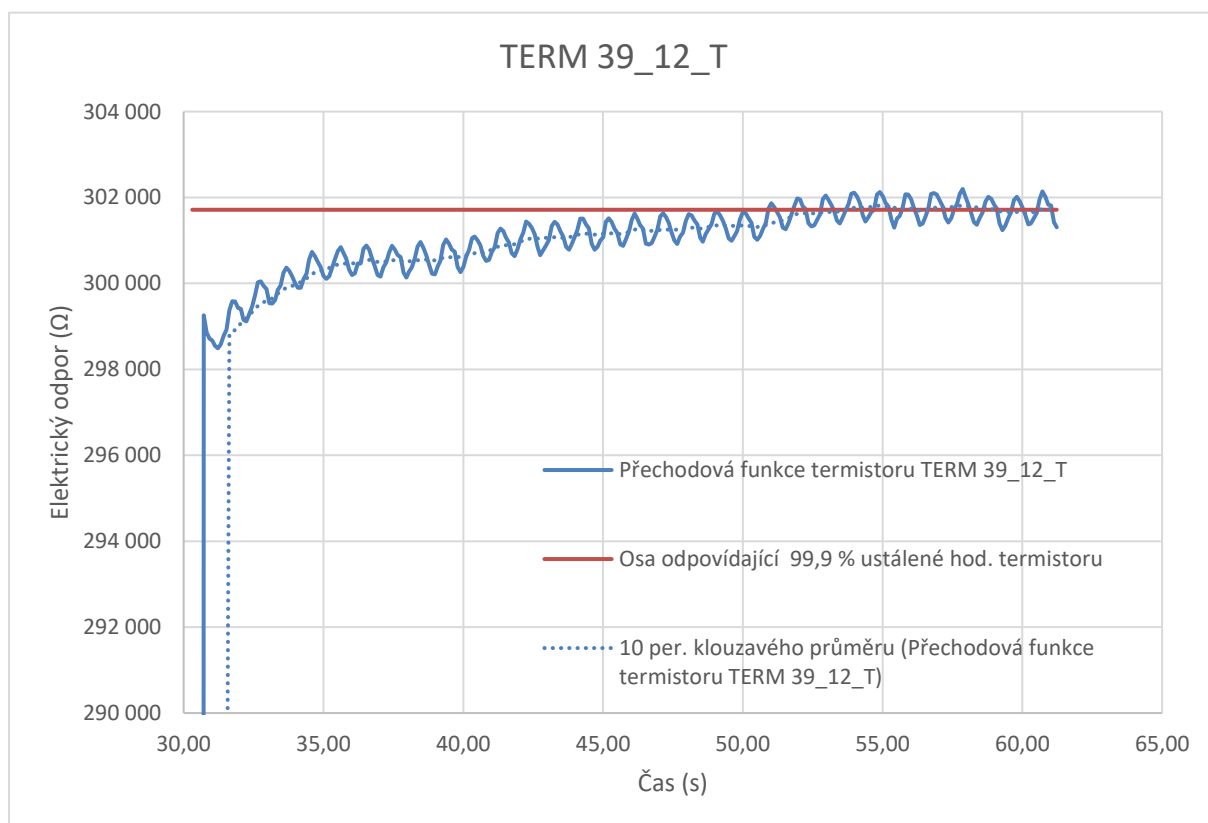


Graf 3.6 Průběh zatěžovací charakteristiky TERM 81_11_L. Z grafu je patrné, že po skokové změně elektrického proudu (teploty), vzorek nereaguje okamžitě, ale dochází k postupnému ustálení.

Pro zjištění doby teplotní odezvy na 99,9 % ustálené hodnoty bylo nutné nejdříve vyhodnotit naměřená data a popřípadě je upravit pro další zpracování. Stěžejní bylo určit přesný časový bod, kdy dojde k ustálení přechodové funkce.

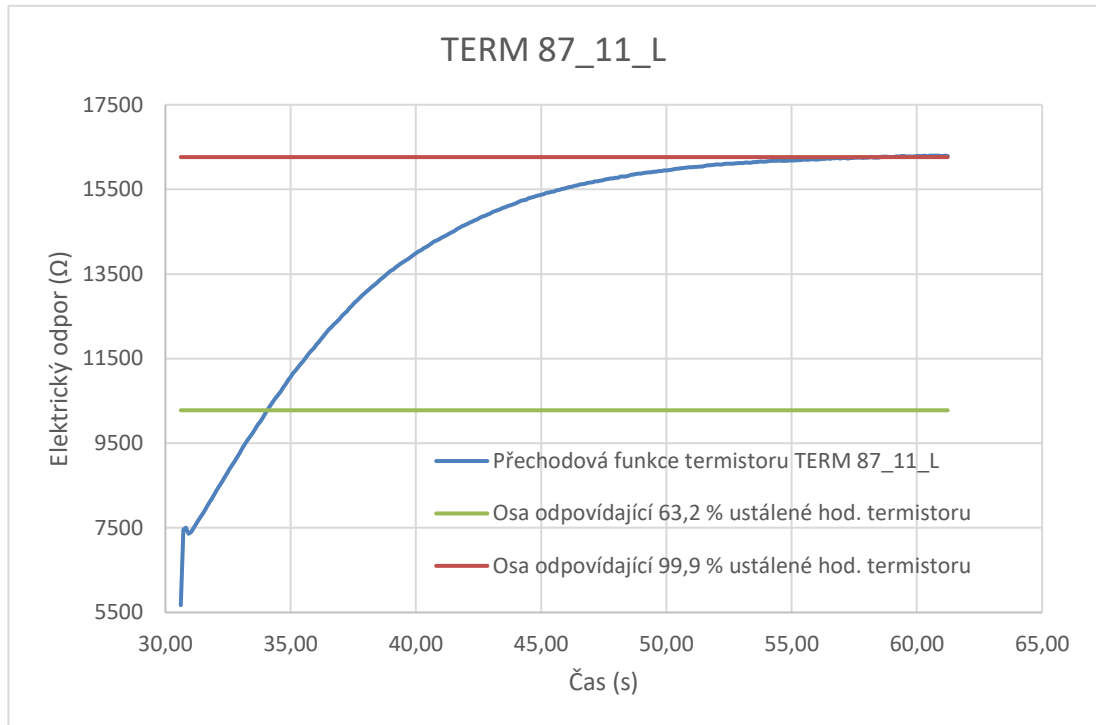
Jedno samostatné měření sestává ze tří period obsahující 1800 naměřených hodnot. Zkoumání byla podrobena především část dat zaznamenaných při změně elektrického proudu (teploty). Tato změna proběhla za jednu půl periodu (30 s), což odpovídá 300 naměřených hodnot. Klíčové bylo stanovení přesné hodnoty ustálení termistoru po skokové změně elektrického proudu (teploty). Na základě prvotních měření bylo hrubě ověřeno, že doba trvání přechodového děje se pohybuje od cca. 15-25 s. Na základě tohoto poznatku bylo posledních 50 hodnot považováno za hodnoty ustálené. Z těchto hodnot byl spočten aritmetický průměr. Z aritmetického průměru byla vytvořena osa, která protínala zvlněný průběh přechodové funkce termistoru v různých časových bodech.

K odstranění tohoto zvlnění a nalezení přesného okamžiku ustálení, bylo nutné vyhladit stávající průběh přechodové funkce. K tomu byl použit klouzavý průměr 10. řádu. Díky tomu byl následně nalezen přesný časový bod, kdy dochází k ustálení přechodové funkce (*Graf 3.7*).

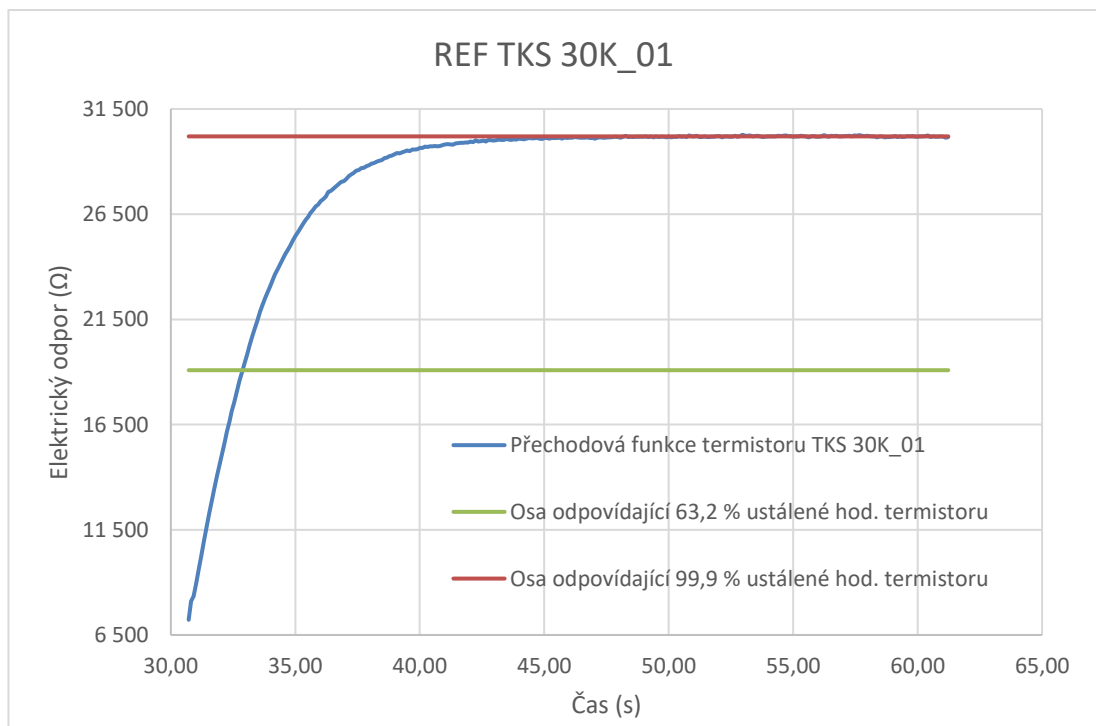


Graf 3.7 Detail postupného ustálení přechodové funkce termistoru TERM 39_12_T.

Pro stanovení časové konstanty byl použit podobný postup. Byla sestavena osa z hodnot odpovídající elektrickému odporu při teplotě 35 °C. V místě průsečíku osy s přechodovou funkcí je odečtena odpovídající hodnota z časové osy. Tento čas odpovídá časové konstantě termistoru.



Graf 3.8 Detail postupného ustálení přechodové funkce termistoru TERM 87_11_L.



Graf 3.9 Detail postupného ustálení přechodové funkce termistoru TKS 30K_01.

Tabulka 3.11 výsledky z měření časové konstanty termistorů. Hodnoty jsou seřazeny od nejrychlejších vzorků po nejpomalejší.

63,2 % ust. hod. [s]	1. měření			2. měření			3. měření				
Vzorky termistorů	1. per.	2. per.	3. per.	1. per.	2. per.	3. per.	1. per.	2. per.	3. per.	AVG [s]	Var. Koef. [%]
REF ATC100K_02	1,20	1,20	1,30	1,30	1,30	1,40	1,30	1,30	1,40	1,30	0,05
REF ATC100K_01	1,30	1,30	1,30	1,20	1,20	1,30	1,20	1,20	1,30	1,26	0,04
TERM 81_12_T	2,00	1,90	1,90	1,90	1,90	1,80	1,50	1,70	1,70	1,81	0,08
TERM 81_11_T	2,00	1,90	1,90	1,70	1,70	1,90	2,00	1,80	1,80	1,86	0,06
REF TKS 30K_02	2,10	2,10	2,20	2,10	2,10	2,20	2,10	2,10	2,20	2,13	0,02
REF TKS 30K_01	2,10	2,10	2,20	2,10	2,10	2,20	2,10	2,00	2,20	2,12	0,03
TERM 87_11_L	3,80	3,80	3,70	3,80	3,90	3,80	3,70	3,80	3,70	3,78	0,02
TERM 87_12_L	3,60	3,70	3,70	3,60	3,80	3,70	3,60	3,60	3,70	3,67	0,02
TERM 39_11_T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TERM 39_12_T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TERM 47_11_L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TERM 47_12_L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TERM 68_12_T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TERM 75_11_L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TERM 99_11_L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TERM 99_12_L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka 3.12 Tabulka výsledků z měření doby teplotní odezvy termistorů. Hodnoty jsou seřazeny od nejrychlejších vzorků po nejpomalejší.

99,9 % ust. hod. [s]	1. měření [s]			2. měření [s]			3. měření [s]				
Vzorky termistorů	1. per.	2. per.	3. per.	1. per.	2. per.	3. per.	1. per.	2. per.	3. per.	AVG [s]	Var. Koef. [%]
TERM 81_11_T	12,4	11,7	11,5	12,4	12,4	11,4	12,8	12,7	11,5	12,1	4,4
TERM 81_12_T	12,6	14,5	12,8	15,4	12,4	12,1	11,5	13,6	11,3	12,9	9,9
REF ATC100K_02	13,6	13,6	11,9	13,1	12	11,5	13,7	13,1	17,5	13,3	12,5
TERM 68_12_T	22	22,6	25,6	11,9	15,3	18,9	4,7	4,1	10,1	15,0	49,3
REF ATC100K_01	26,7	15,6	13,8	12,6	18,3	17,8	13,3	20,6	15,7	17,2	24,3
REF TKS30K_02	17,5	16,7	18,5	18,2	25,3	15,4	17,1	15	14,9	17,6	17,0
TERM 39_12_T	22,1	25,1	23,9	25,5	23,1	8,9	24,1	17,1	15,9	20,6	25,4
REF TKS30K_01	21,3	21,7	20,5	24,5	20,4	18,3	17,3	26,4	16,1	20,7	15,0
TERM 99_12_L	23,2	20,1	27,5	19,1	22,8	20,1	18,7	25,5	23,7	22,3	12,8
TERM 99_11_L	26,9	21,1	21,5	22,5	27,6	27,4	21,6	19,7	19,8	23,1	13,3
TERM 47_12_L	27,4	24,3	25,4	27,3	19	23,2	20	16,4	28,4	23,5	16,8
TERM 39_11_T	17,3	21,1	23,9	27	26,1	28,9	26,4	24,1	17,9	23,6	16,2
TERM 47_11_L	27,5	25,1	29,9	27,5	28,1	16,3	20,5	26,2	19,7	24,5	17,7
TERM 75_11_L	27,5	27,5	23,8	24,4	28,5	22,8	28,1	25,4	24,2	25,8	7,8
TERM 87_11_L	27,8	27,5	27,1	27,8	27,6	26,8	27,7	27,4	27,1	27,4	1,2
TERM 87_12_L	28	27,2	27,3	27,4	28,1	27,1	28	26,7	27,3	27,5	1,6

3.4 Diskuze výsledků

Jedním z předpokladů při kalibračním měření teplotně-odporové charakteristiky tištěných vzorků bylo získání srovnatelných průběhů pro dvojice vzorků stejného druhu (materiálová formulace a způsob zapouzdření). U většiny dvojic dochází pouze k mírným odchylkám. Tyto odchylky mohou být způsobeny například: kontaminací termo-senzitivní vrstvy, mechanickým poškozením termo-senzitivní vrstvy nebo tepelnou degradací materiálové formulace. Mimo jiné bylo při vyhodnocování kalibračních dat zjištěno, že při opakovaném zatížení vzorku teplotní rampou (-10 /50/-10) °C se hodnoty elektrického odporu v každém cyklu mírně liší. Tento jev může být způsoben právě nevyzrálostí materiálové struktury. Lze předpokládat, že pro úplné ustálení materiálových vlastností bude nutné při další kalibraci zvolit vyšší teploty nebo delší časový interval měření. V případě této práce byla pro kalibraci použita relativně nízká teplota (max. 50 °C) společně s krátkým časovým intervalem měření (50 hodin). Takto zvolené parametry kalibrace nemusely plně dostačovat k ustálení materiálových vlastností. Na druhou stranu lze použití takto získaných výsledků v dalším postupu obhájit s ohledem na omezené časové kapacity a snahou snížit riziko tepelné degradace materiálové struktury termo-senzitivní vrstvy.

U vzorků TERM 39_12_T, TERM 68_11_T, TERM 93_11_T byly při kalibraci zaznamenány výrazné abnormality v chování teplotně-odporové charakteristiky. Nevyzpytatelné chování za různých teplot tyto vzorky předem vyloučilo z dalších měření. Jak je z uvedených označení vzorků zřejmé, jedná se o vzorky bez zapouzdření. Termo-senzitivní vrstva těchto vzorků byla kryta pouze slabou vrstvou transparentního laku. Na základě této skutečnosti lze předpokládat, že minimálně chráněná termo-senzitivní vrstva byla narušena mechanicky při přípravě měření, nebo vlivem působení nízkých a vysokých teplot v olejové lázni.

Postup měření disipačního faktoru byl nejdříve ověřen na vzorcích konvenčních průmyslově vyráběných termistorů. Výsledek měření byl porovnán s hodnotami uvedenými v jejich technických listech. V technických listech se uvádí doslova „*přibližná hodnota disipačního faktoru*“ a bez blíže určené tolerance. Uvedená hodnota disipačního faktoru je pro vzorky REF TKS_30K a REF ATC_100K shodná a je rovna 0,7 mW/ °C. Postupem použitým v této práci bylo pro REF TKS_30K naměřeno cca. 2,1 mW/ °C a pro REF ATC_100K naměřeno cca. 1,05 mW/ °C. Výsledky jsou si řádově blízké a příčin mírného rozdílu může být

hned několik. Například technických listech výrobce nejsou nijak specifikovány podmínky pro měření disipačního faktoru. S úvahou, že výrobce postupoval dle doporučení uvedených v normách, lze předpokládat, že pro měření a výpočet disipačního faktoru použil vyšší hodnotu elektrického proudu k dosažení vyšší teploty termistoru. V normách se uvádí doporučená hodnota teploty cca. $75\text{ }^{\circ}\text{C} - 85\text{ }^{\circ}\text{C}$. V případě postupu měření disipačního faktoru v dostupných laboratorních podmínkách byla součástka podrobena zatížení odpovídající pouze teplotě $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento rozdíl mohl způsobit výše uvedenou odchylku v hodnotě disipačního faktoru. Mezi další možnosti se řadí nepřesné určení jmenovitého elektrického odporu pro teplotu $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na základě této hodnoty elektrického odporu, byl upravován poměr elektrického napětí a elektrického proudu při nastavování zdroje. V případě, že hodnota elektrického odporu změřeného pro teplotu $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla zatížena chybou měření, došlo při nastavení výkonových parametrů zdroje k chybě a změřené hodnoty odpovídaly podmínkám s vyšší nebo nižší teplotou termistoru. Jako nejpravděpodobnější příčina se však jeví dynamické proudění vzduchu uvnitř klimatické komory, které je při měření disipačního faktoru nežádoucí. Proudění bylo omezeno plastovým víkem umístěným mezi ventilátor a měřené vzorky. Nicméně toto krytí nebylo úplné a byla zde místa, kudy proudící vzduch mohl proniknout k měřeným vzorkům. Tento vliv odpovídá faktu, že byly naměřeny vyšší hodnoty disipačního faktoru, než které jsou uvedeny v technických listech. Proudící vzduch svým působením jednotlivé vzorky ochlazoval, což vedlo k nutnosti použít vyšší hodnotu elektrického proudu k dosažení vyšší teploty a tím dostatečného snížení elektrického odporu odpovídající teplotě $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hodnoty výsledků disipačního faktoru pro tištěné vzorky se pohybovaly od $0,005\text{ mW}/^{\circ}\text{C}$ do $11,5\text{ mW}/^{\circ}\text{C}$, kde u hodnot dvojic stejného druhu dochází pouze k mírným odchylkám. Variační koeficient výsledků se typicky pohyboval v řádech desetin procenta, tzn. změřené výsledky vykazovaly relativně velmi malou variabilitu. Velice široké spektrum hodnot disipačního faktoru mezi jednotlivými skupinami tištěných vzorků lze vysvětlit rozdílnou materiálovou formulací jednotlivých vzorků spolu s odlišným způsobem zapouzdření termo-senzitivní vrstvy. Při porovnání tištěných a referenčních vzorků lze konstatovat, že bylo dosaženo konkurenceschopných hodnot.

Velice zajímavých výsledků bylo dosaženo při měření časové odezvy tištěných termistorů, která byla popsána za pomoci časové konstanty a doby teplotní odezvy. V technických listech referenčních termistorů je pro popis časové odezvy uvedena pouze časová konstanta. Hodnota časové konstanty je stejně jako u hodnoty disipačního faktoru pouze přibližná, bez uvedené tolerance a pro oba termistory shodná. Hodnota časové konstanty pro vzorky REF_TKS_30K a

REF ATC_100K je rovna 5 s. Postupem použitým v této práci bylo pro REF TKS_30K naměřeno cca. 2,13 s a pro REF ATC_100K naměřeno cca. 1,28 s. V normách [8, 9] není pevně stanoveno, zda měření musí probíhat ve statickém nebo dynamickém prostředí. Pouze je doporučeno, aby spolu s uvedenou hodnotou popisující časovou odezvu termistoru byly popsány i přesné podmínky prostředí, za kterých měření probíhalo. V technických listech je zmíněno, že měření probíhalo za stacionárních podmínek okolního prostředí. V případě měření provedeného v této práci bylo obtížné v použité klimatické komoře vytvořit stacionární podmínky vzhledem k chodu ventilátoru, který klimatická komora nutně potřebuje pro svou správnou funkci. Z toho důvodu byly všechny vzorky měřeny v dynamickém prostředí proudícího vzduchu, který měl do jisté míry vliv na rozdíl mezi naměřenými hodnotami a hodnotami uvedenými v technických listech referenčních termistorů. Proudící médium svým pohybem v okolí vzorku podněcuje k rychlejší tepelné výměně. Z toho důvodu lze konstatovat, že hodnota časové odezvy v dynamickém prostředí bude menší oproti hodnotě časové odezvy v prostředí stacionárním. Tato úvaha však platí pouze pro způsob měření časové konstanty použitý v této práci, tj. měření při ochlazování po samozahřívání. Výsledek této práce předchází tvrzení pouze potvrzuje. Mezi další činitele rozdílu může být považována do jisté míry i použitá metoda měření časové konstanty. V normách [8, 9] jsou zmíněny dva korektní způsoby jak měřit časovou konstantu. V prvním případě se jedná o měření časové konstanty při změně okolní teploty – termistor je umístěn do prostředí o vyšší teplotě a druhým způsobem je měření časové konstanty při ochlazování po samozahřívání – termistor je zatížen vyšším proudem než měřicím, který je následně vystřídán proudem nižším, tj. proudem měřicím. V technických listech není uveden způsob měření, a proto lze polemizovat nad tím, zda byly použity postupy shodné, či nikoliv. Postup měření, ať už zahříváním nebo ochlazováním, má vliv na dynamické chování termistoru. Toto chování je popsáno a empiricky dokázáno v normě [10]. Nelze tedy vyloučit, že způsobený rozdíl může být zapříčiněn právě rozdílným postupem měření. Při měření časové odezvy tištěných vzorků bylo zjištěno, že některé materiálové formulace reagují na skokovou změnu teploty příliš rychle na to, aby bylo vůbec proveditelné s dostupnou laboratorní aparaturou změřit časovou konstantu. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že tyto ultrarychlé vzorky (materiálové formulace: *NTC 1.0*, *NTC 1.1*, *NTC 2*), které dosahují ihned po skokové změně teploty cca. 98-99 % ustálené hodnoty, bude nutné popsat dobou teplotní odezvy deklarovanou na 99,9 % ustálené hodnoty termistoru. S ohledem na tyto výsledky bylo provedeno měření doby teplotní odezvy i pro pomalejší vzorky, které již byly popsány časovou konstantou. Hodnoty časové konstanty pro vzorky TERM 81 a TERM 87 dosahovaly rozpětí od 1,8-3,7 s. Tyto hodnoty jsou při srovnání s referenčními termistory srovnatelné. Hodnoty

doby teplotní odezvy deklarované na 99,9 % dosahovaly od 12-28 s. Tyto hodnoty jsou napříč vzorky velice různorodé a vykazují velkou směrodatnou odchylku vyjádřenou procentuálně prostřednictvím variačního koeficientu. Slouží tedy spíše jako orientační hodnoty pro srovnání různorodě se chovajících vzorků.

Závěr

V předkládané práci byly definovány dynamické vlastnosti plně tištěných termistorů na flexibilním substrátu a byly popsány jejich vzájemné vztahy. Mezi klíčové dynamické vlastnosti se řadí především disipační faktor, tepelná kapacita a časová konstanta/doba teplotní odezvy. Tyto parametry mají zásadní vliv na dynamické chování termistorů a jsou závislé jak na konstrukčních vlastnostech termistoru (materiálové struktuře, velikosti, geometrickém uspořádání atd.), tak i na prostředí na termistor působící (směr změny, velikost změny, tepelné vlastnosti prostředí/média atd.). Proto je zcela zásadní při měření dynamických vlastností přesně definovat podmínky po celou dobu měření.

Pro charakterizaci podmínek okolního prostředí a sestavení postupu měření dynamických vlastností termistorů byly využity normy tuzemských a zahraničních institucí. Znalosti získané studiem norem byly využity pro sestavení měřicího postupu v dostupných laboratorních podmínkách.

Správnost a přesnost vytvořeného postupu byla ověřena po měření dynamických parametrů konvenčních termistorů a následném srovnání výsledků s hodnotami uvedenými v jejich technických listech. Poté proběhlo měření dynamických vlastností tištěných termistorů. Naměřené výsledky tištěných a konvenčních termistorů byly porovnány s cílem zjistit konkurenceschopnost tištěných termistorů s jejich konvenčními ekvivalenty.

Tištěné termistory při porovnání s referenčními (konvenčními) termistory vykazují řádově srovnatelné, a v některých případech dokonce i nižší (tj. lepší), hodnoty disipačního faktoru, časové konstanty a doby teplotní odezvy. Tyto výsledky nasvědčují tomu, že tištěné termistory lze použít mimo jiné jako alternativu v aplikacích, kde se běžně používají konvenční termistory. Velký potenciál skýtají skupiny tištěných termistorů tvořené materiálovou formulací typu NTC1.0, NTC1.1 a NTC3 vykazující ultrarychlou reakci na skokovou změnu teploty. Této vlastnosti lze využít například pro regulaci teploty systémů, u nichž je nutná krátká reakční doba z důvodu hrozícího poškození systému přehřátím.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications*. Springer International Publishing Switzerland, 2016. ISBN 9783319193038. DOI:10.1007/978-3-319-19303-8
- [2] JOHN G. WEBSTER, Halit Eren. *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement: John G. Webster, Halit Eren*. 2014. ISBN 9781439848890.
- [3] BRÝDL, Z. *Automatizace a automatizační technika 2: Automatické řízení*. Brno: CP Books a.s., 2005. ISBN 80-251-0796-5.
- [4] HRUŠKA, František. *Senzory. Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití*. druhé, roz. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [5] PETER R. N. CHILDS. *Practical Temperature Measurement*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0 7506 5080 X.
- [6] SIMON, M. Sze a KWOK, K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd vyd. New York: John Wiley&Sons, 1981.
- [7] ČSN EN 600751. *Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [8] MIL-PRF-23648F AMENDMENT 2. *Resistors, thermal (thermistors) insulated, general specification*. B.m.: Departments and Agencies of the Department of Defense. 2009
- [9] ČSN EN 60539. *Přímo ohříváné termistory se záporným teplotním součinitelem - Část 1 Kmenová specifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2016
- [10] VDI/VDE 3522. *Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern Grundlagen und Kennwerte*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2014. ISBN 8310983001201
- [11] *Jensen Tools + Supply, Inc.* [online]. 2018 [vid.2018-02-07]. Dostupné z: <https://www.jensentools.com/keithley-2612b-sourcemeter-smu-instrument-2-channel/p/479-321>

Seznam příloh

Příloha A

Zatěžovací charakteristika referenčních termistorů REF TKS 30K.

Příloha B

Zatěžovací charakteristika referenčních termistorů REF ATC 100K.

Příloha C

Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 39.

Příloha D

Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 47.

Příloha E

Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 68 a TERM 75.

Příloha F

Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 81.

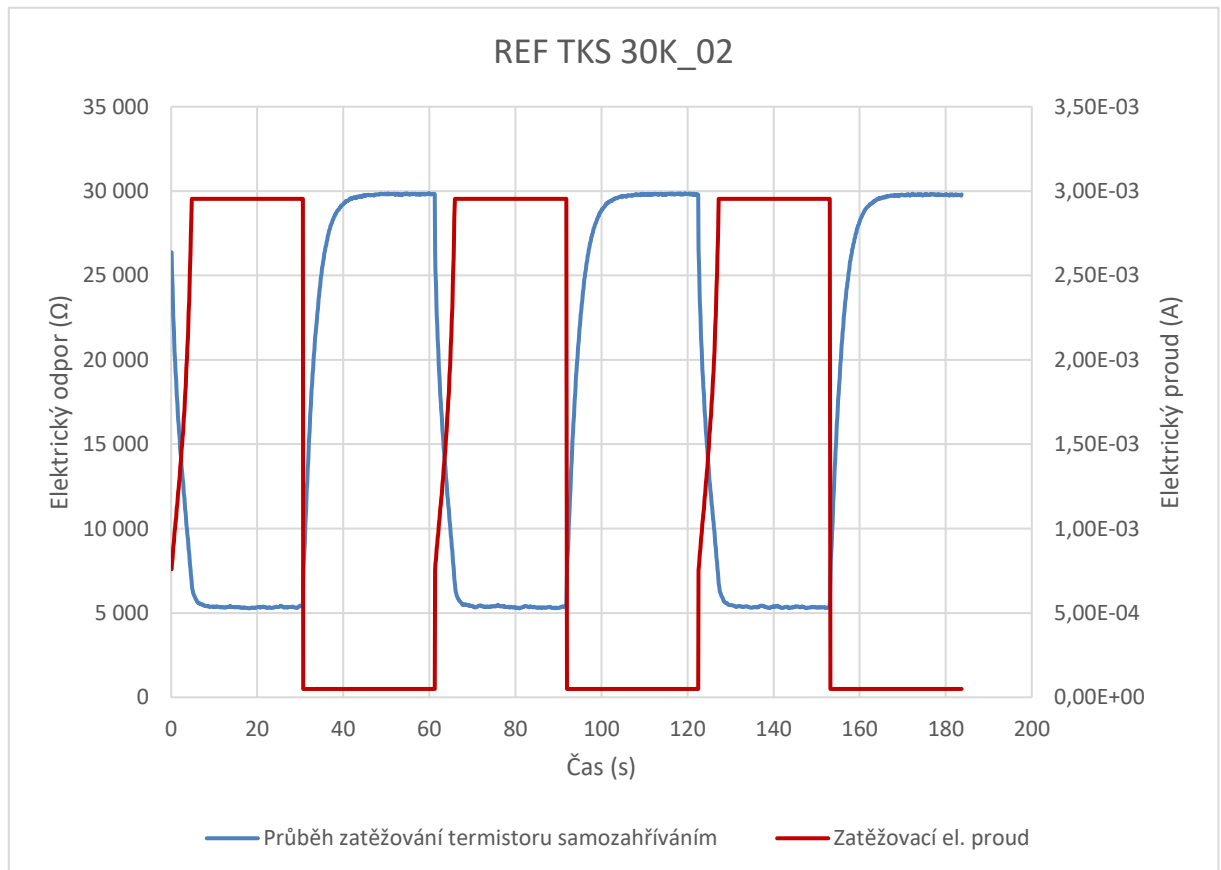
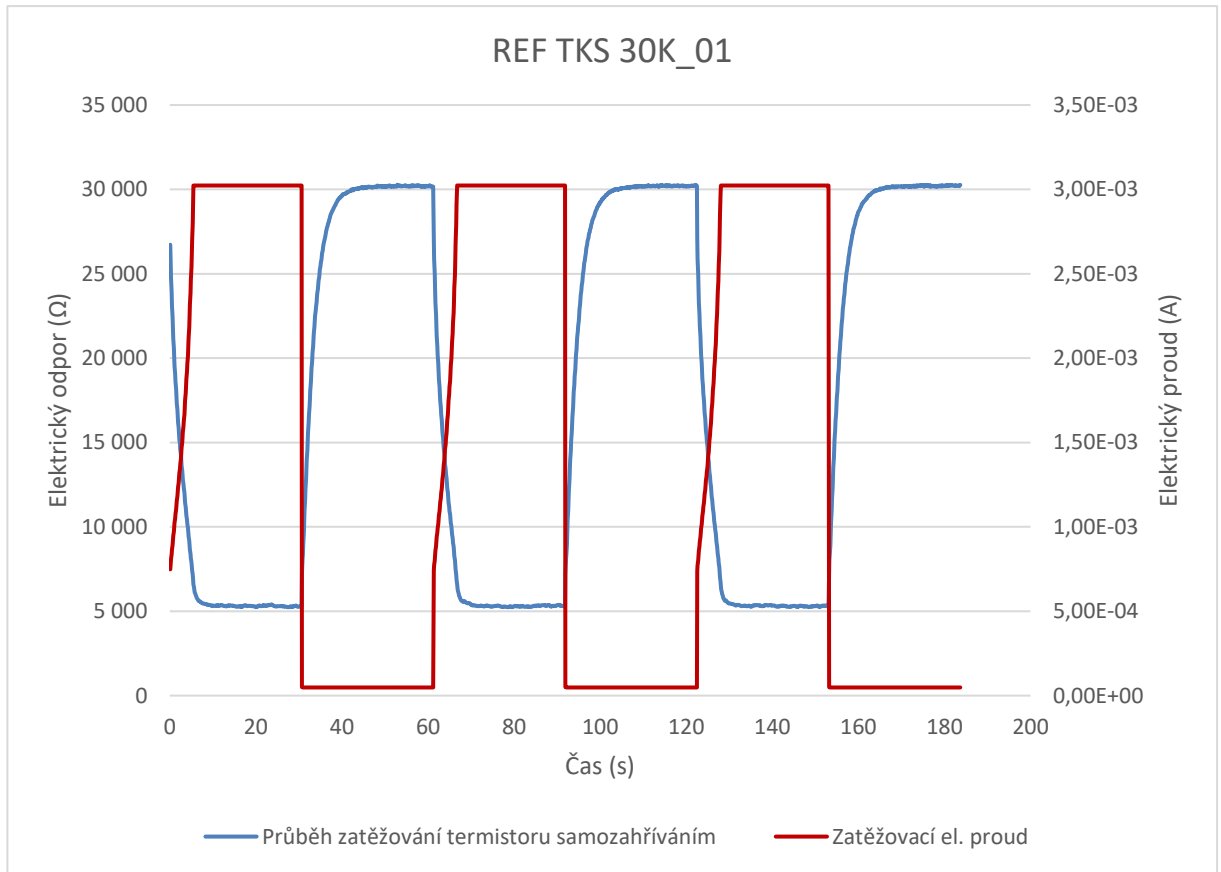
Příloha G

Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 87.

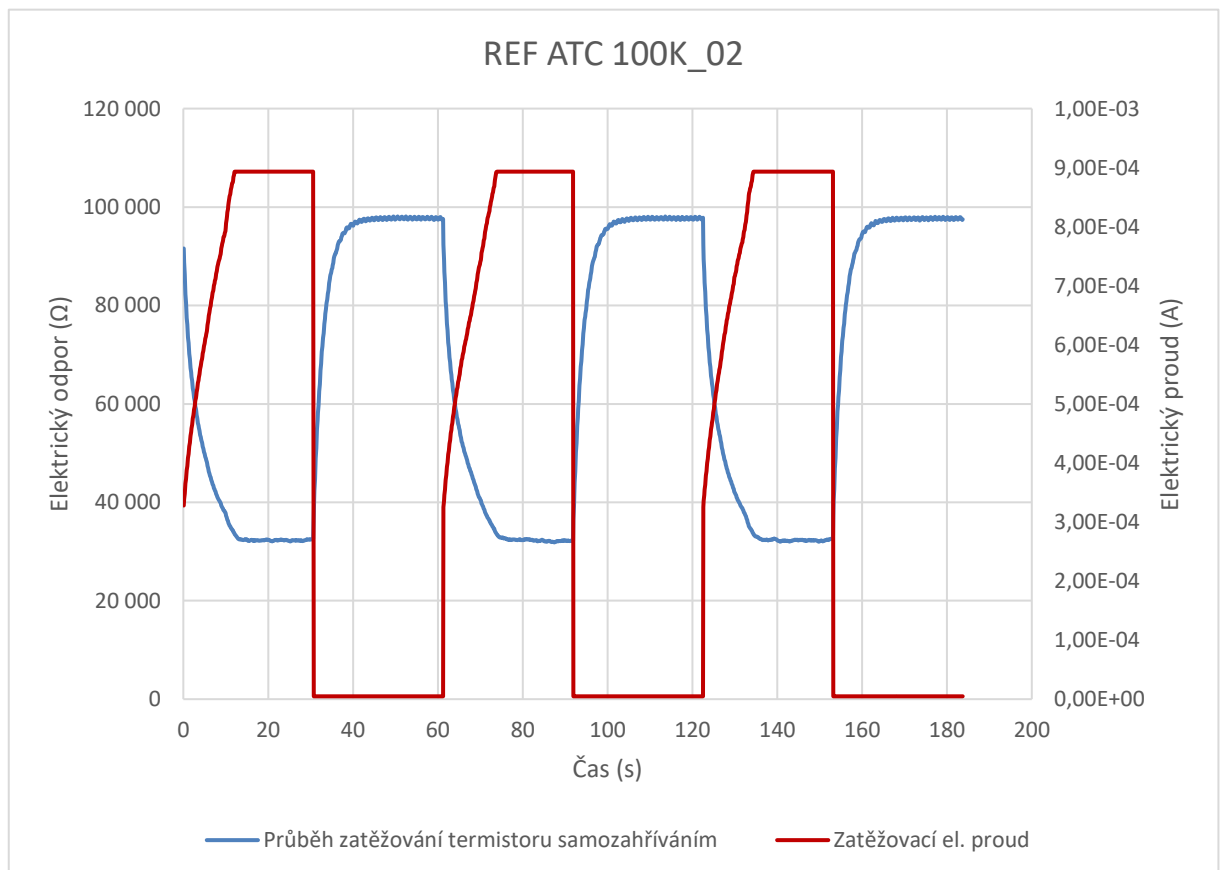
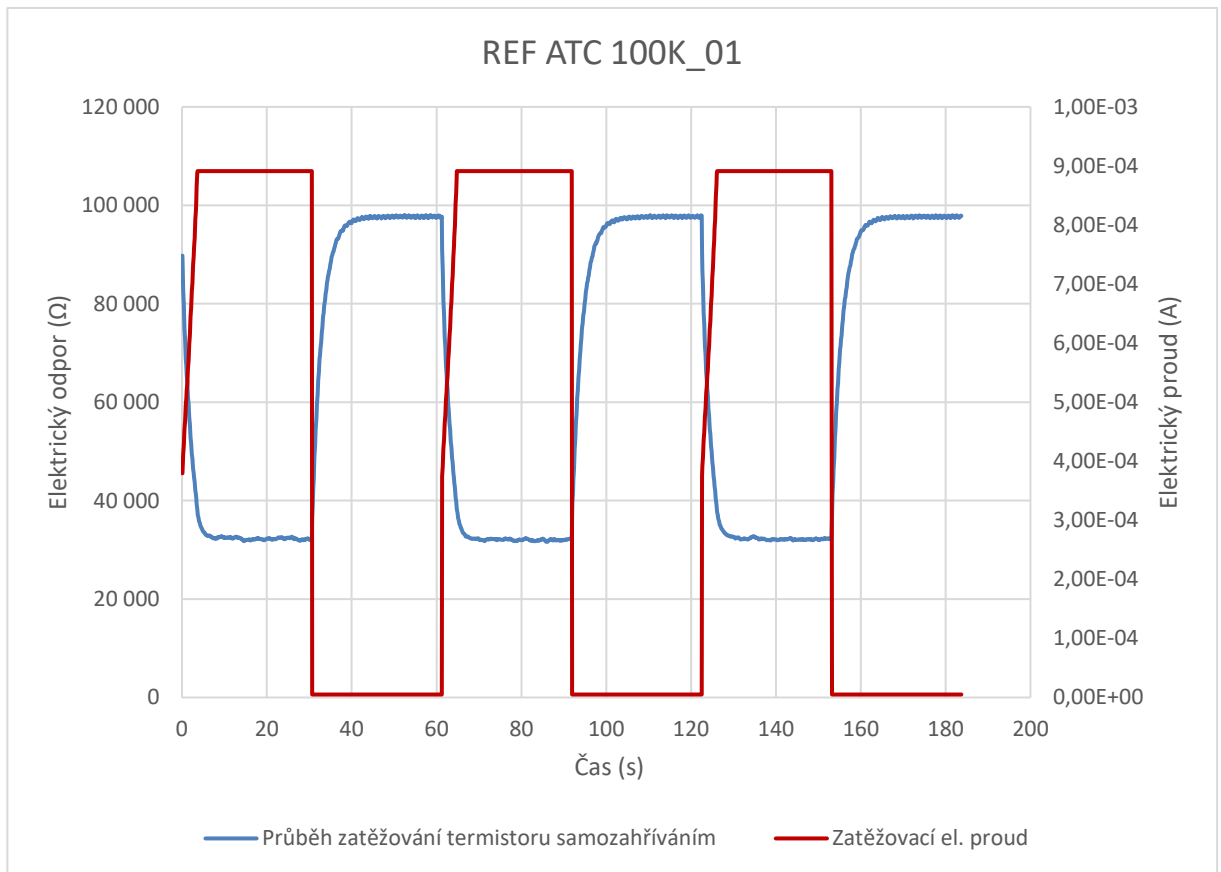
Příloha H

Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 99.

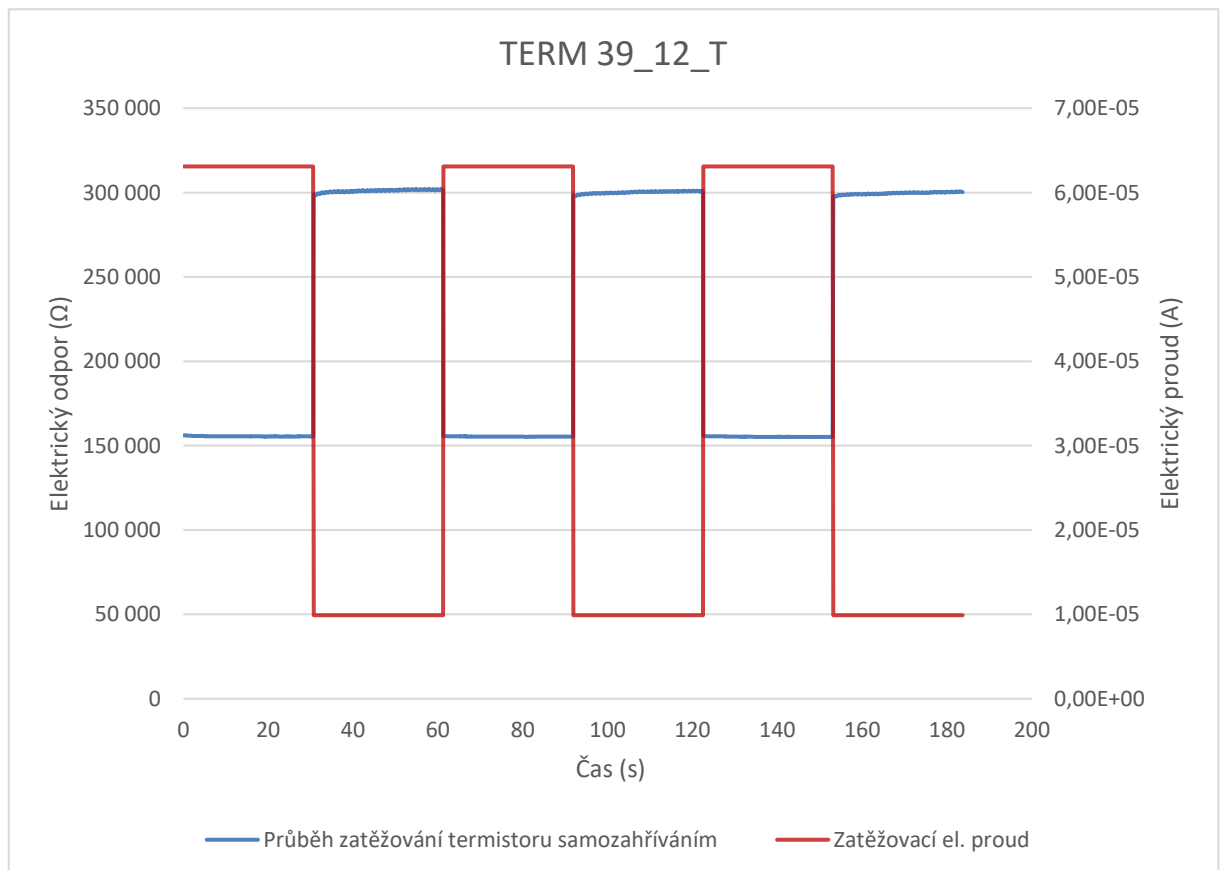
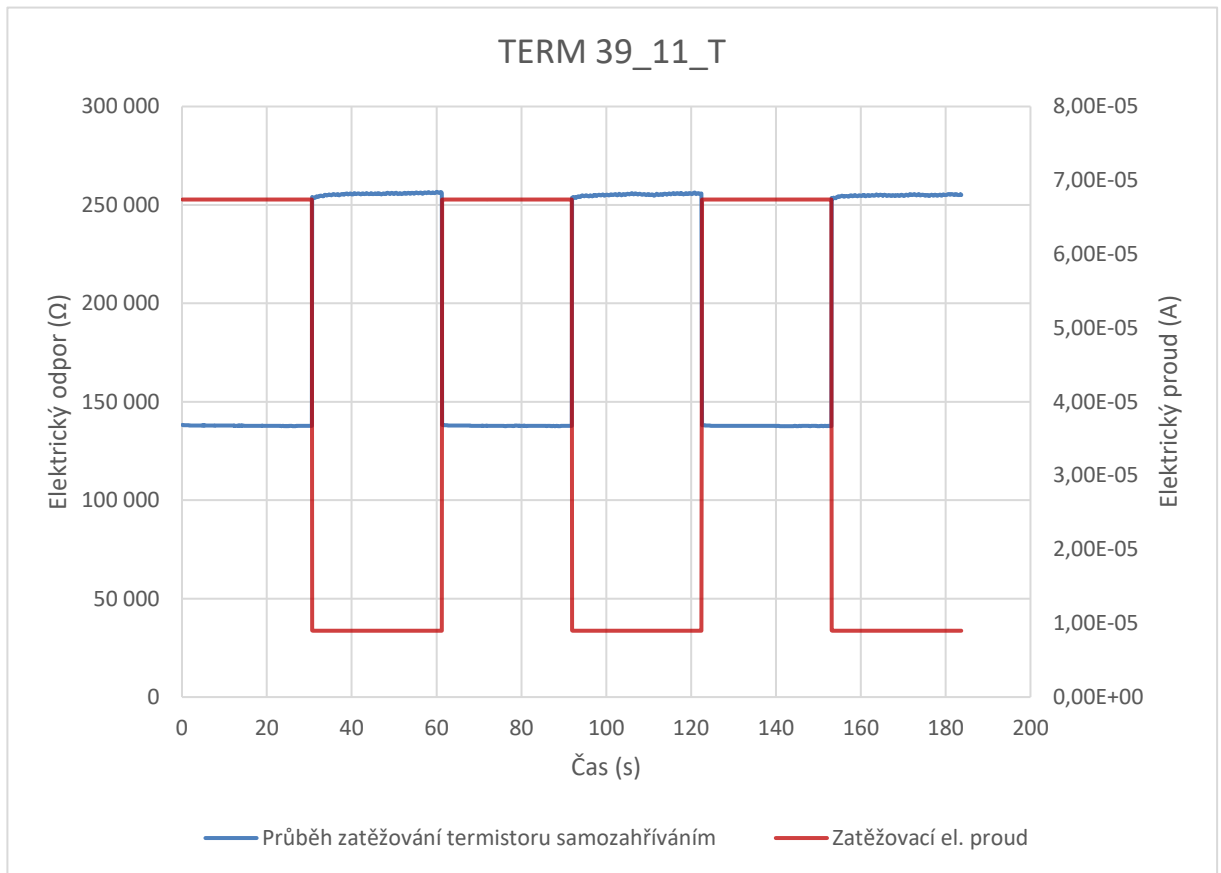
Příloha A – Zatěžovací charakteristika referenčních termistorů REF TKS 30K.



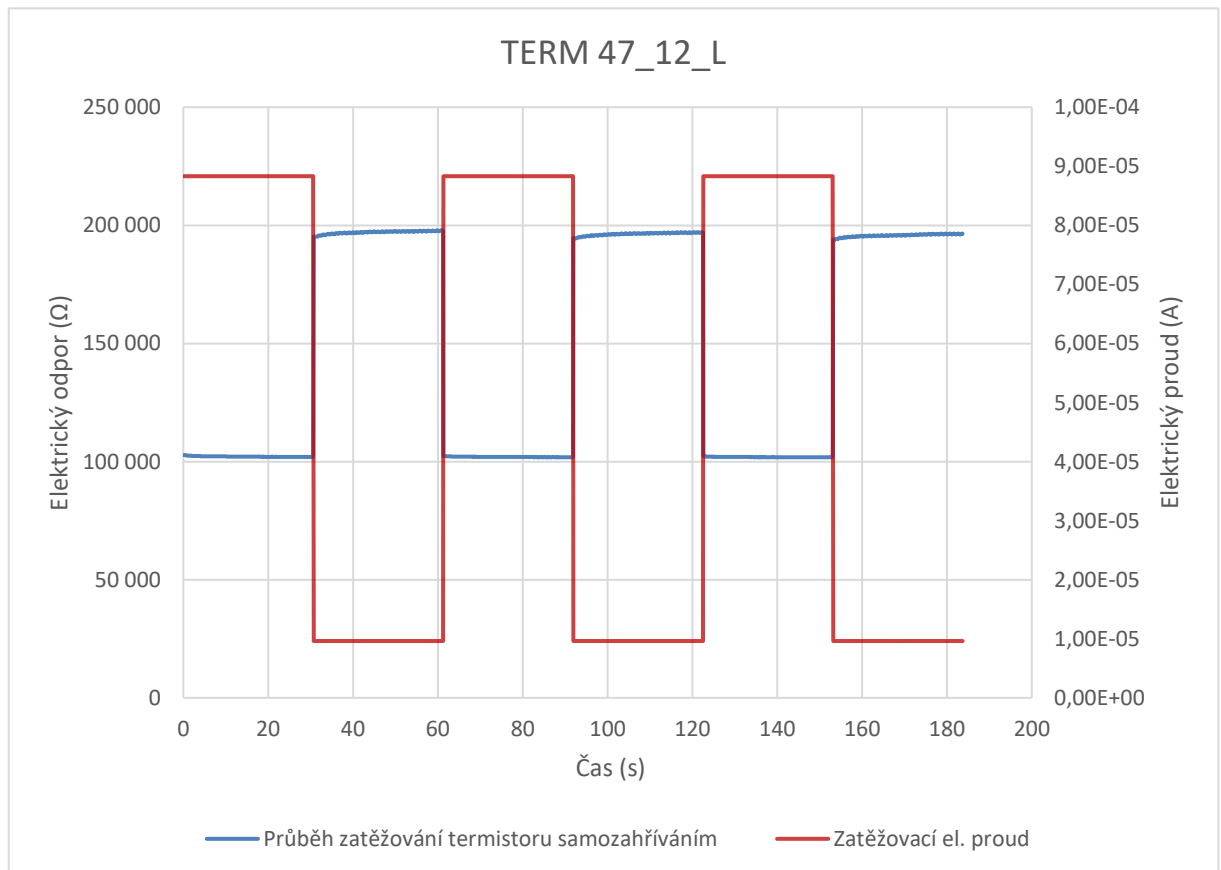
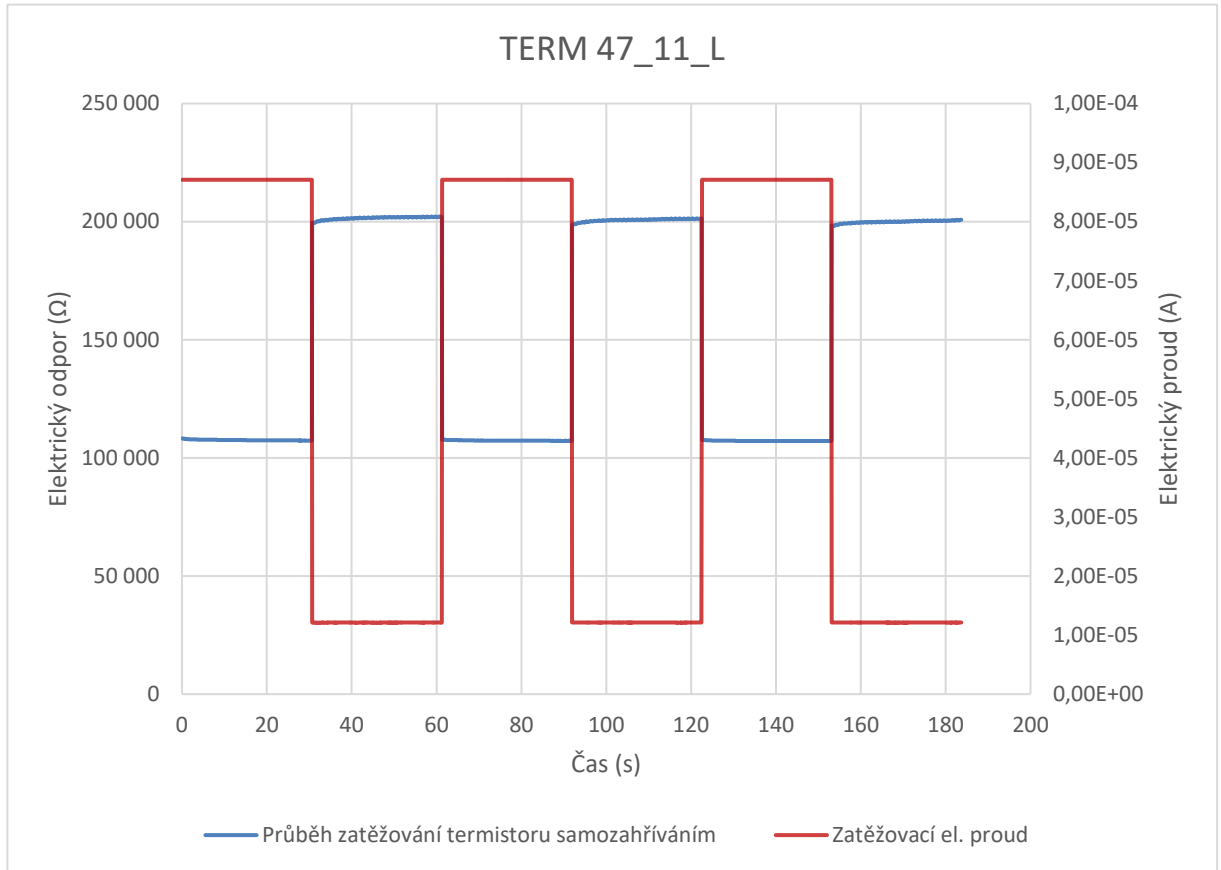
Příloha B – Zatěžovací charakteristika referenčních termistorů REF ATC 100K.



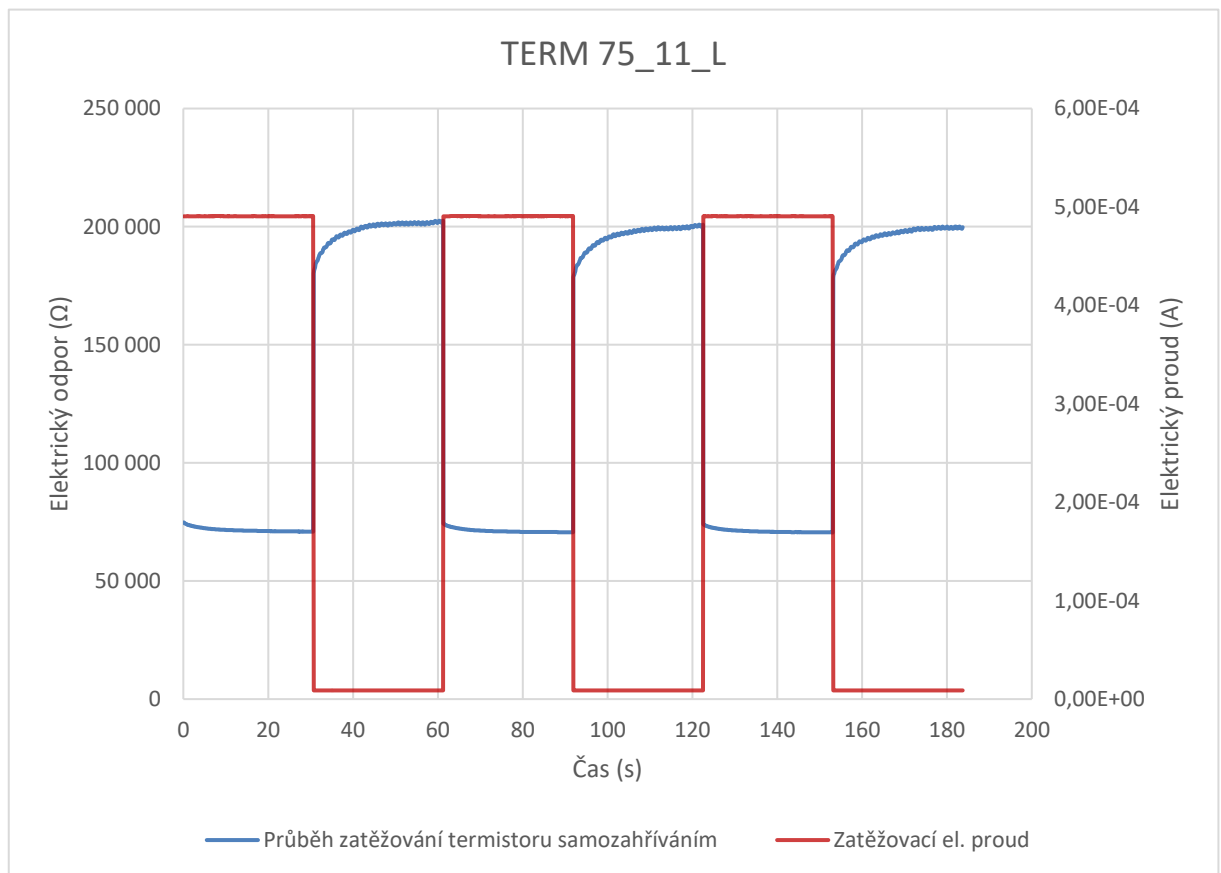
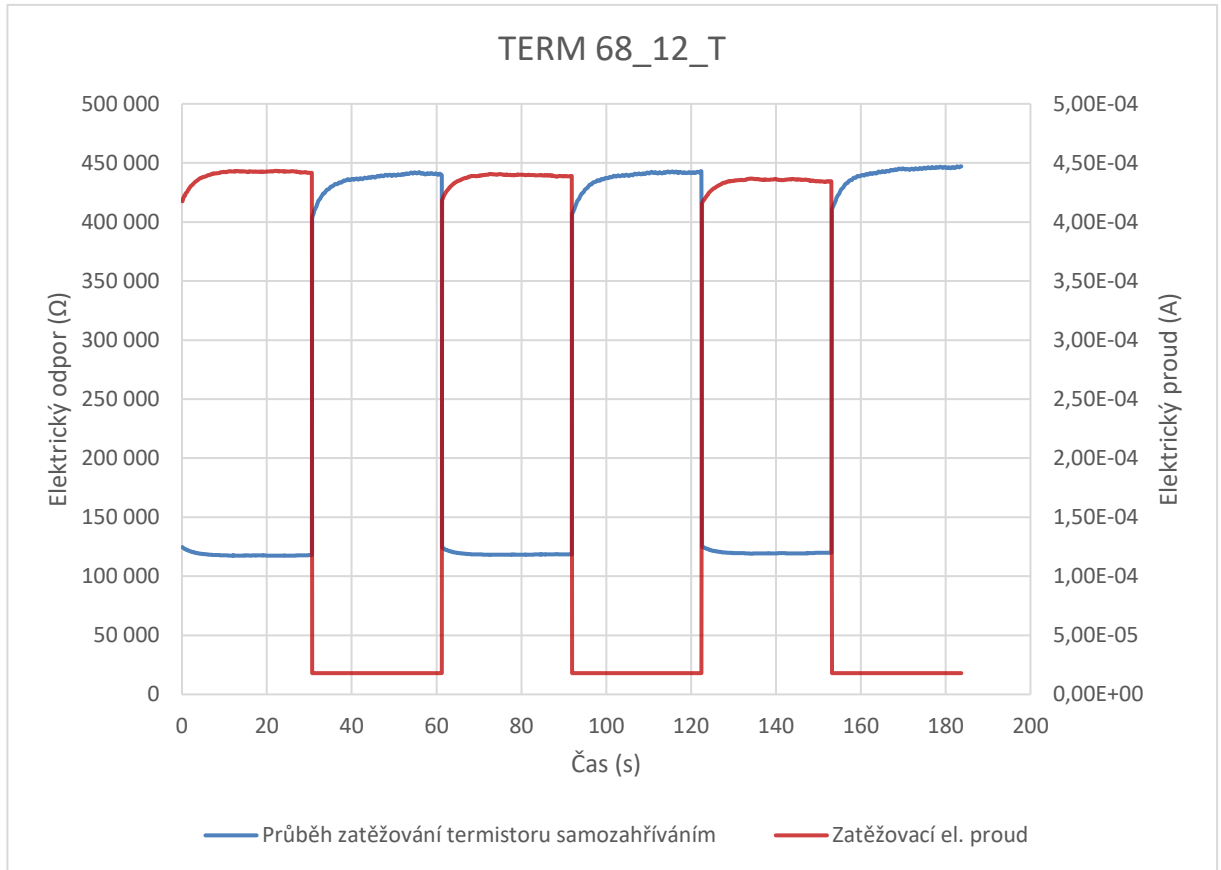
Příloha C – Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 39.



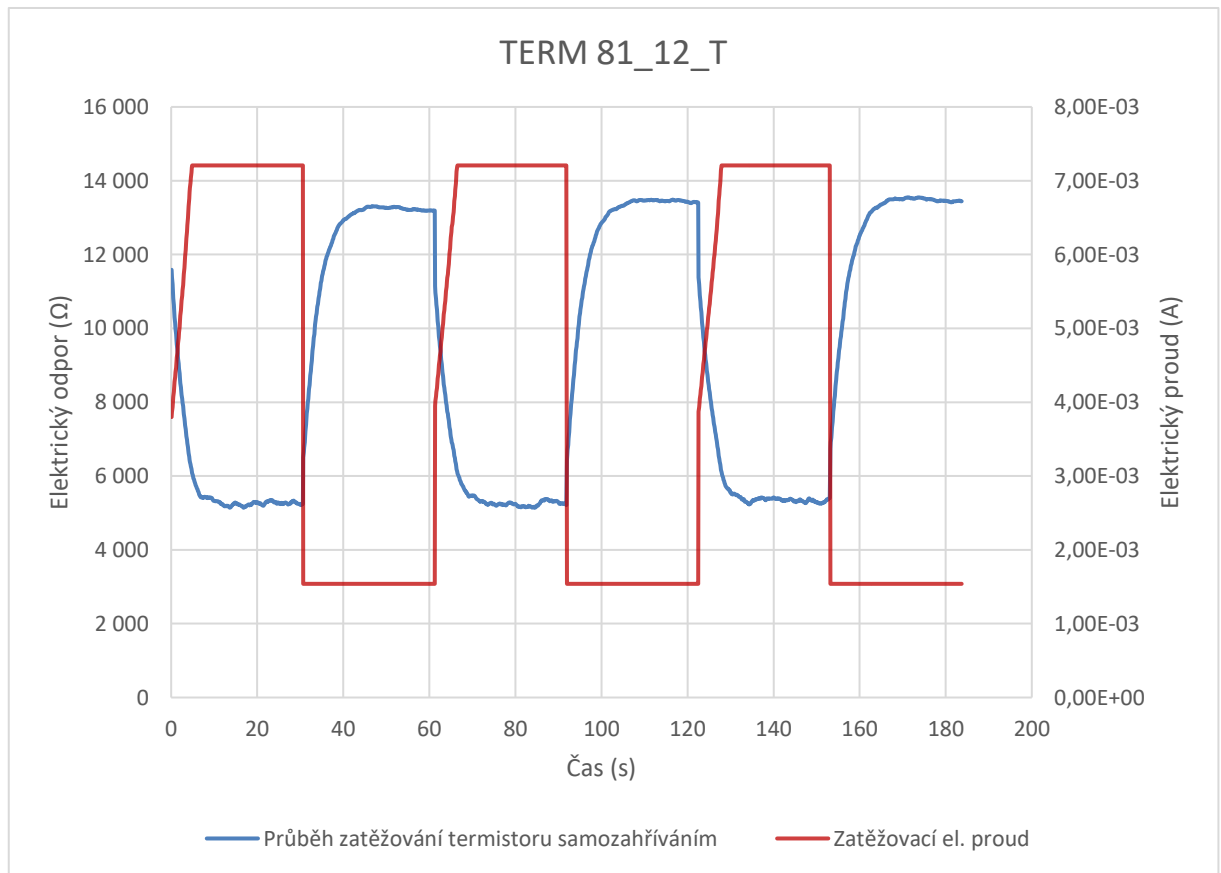
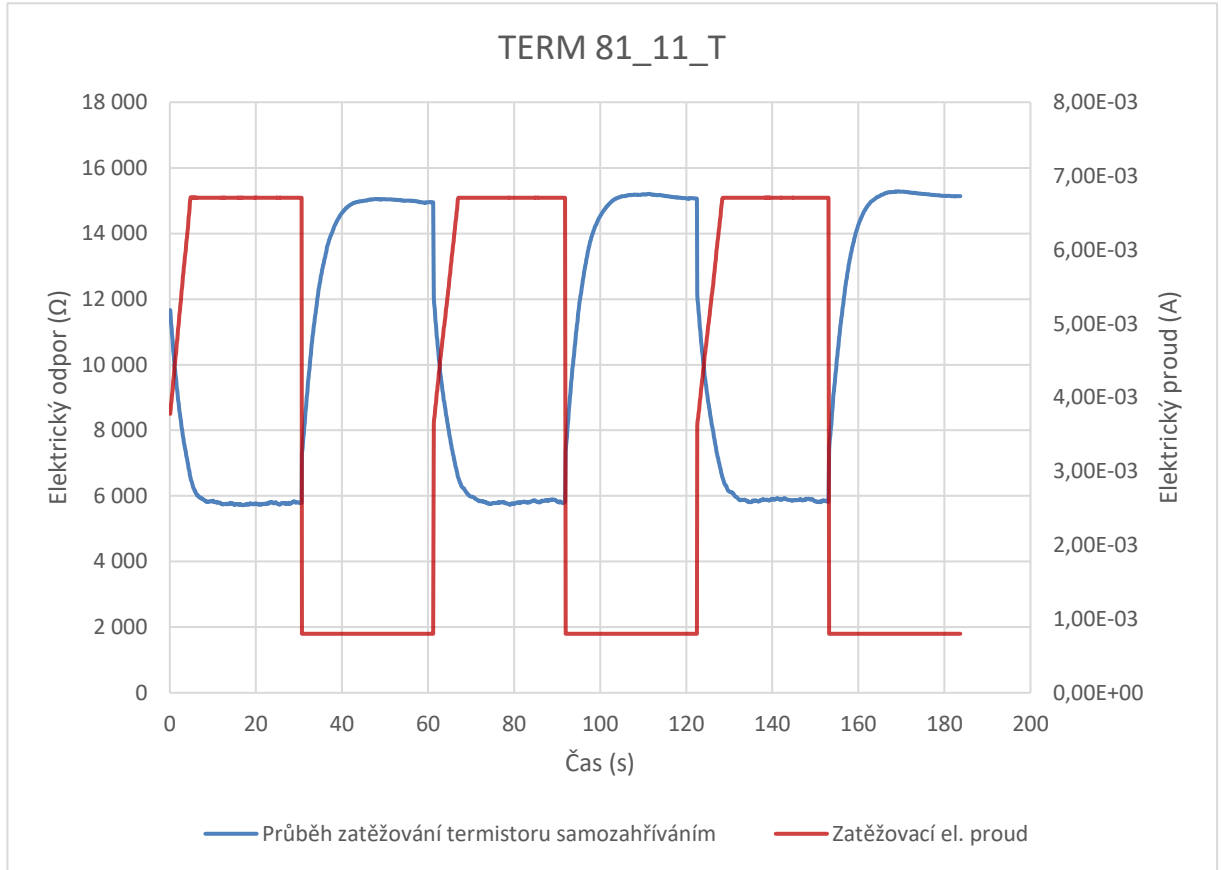
Příloha D – Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 47.



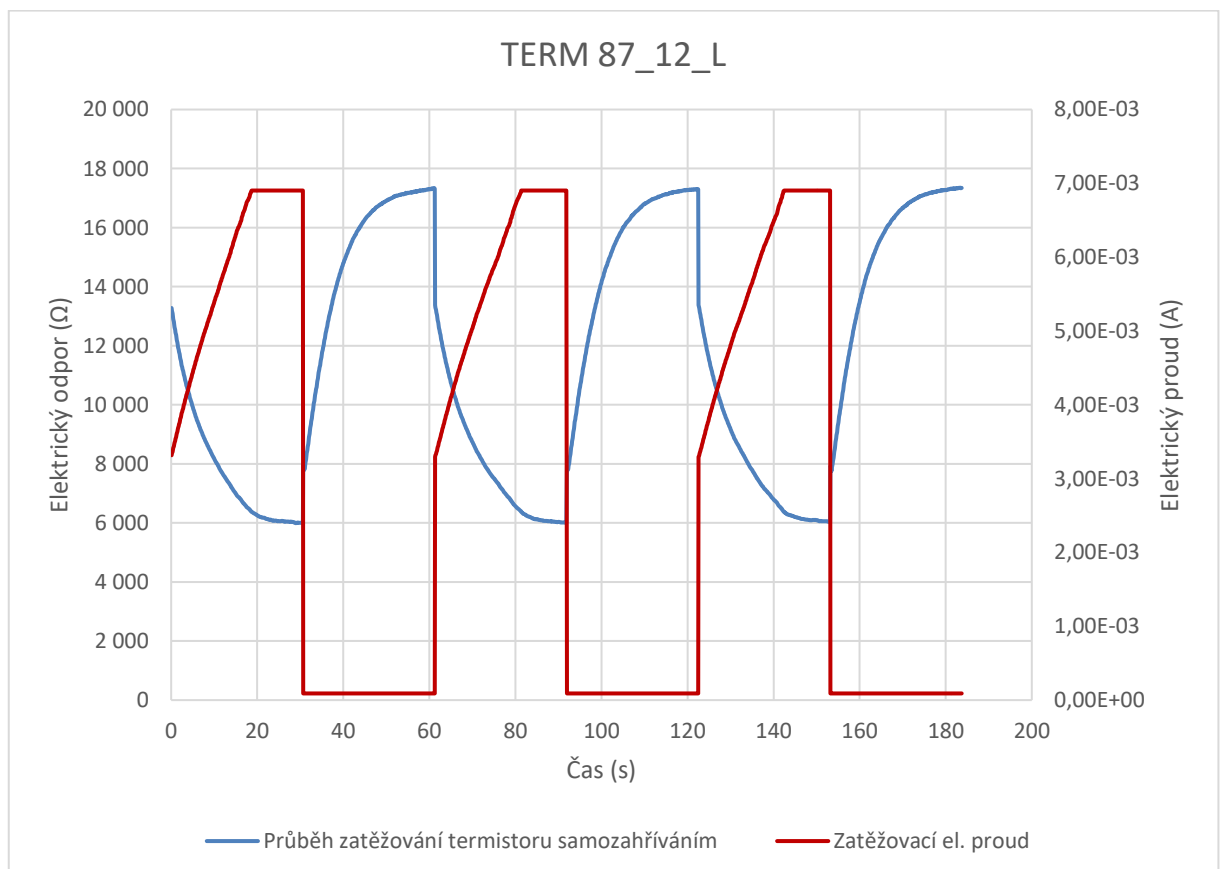
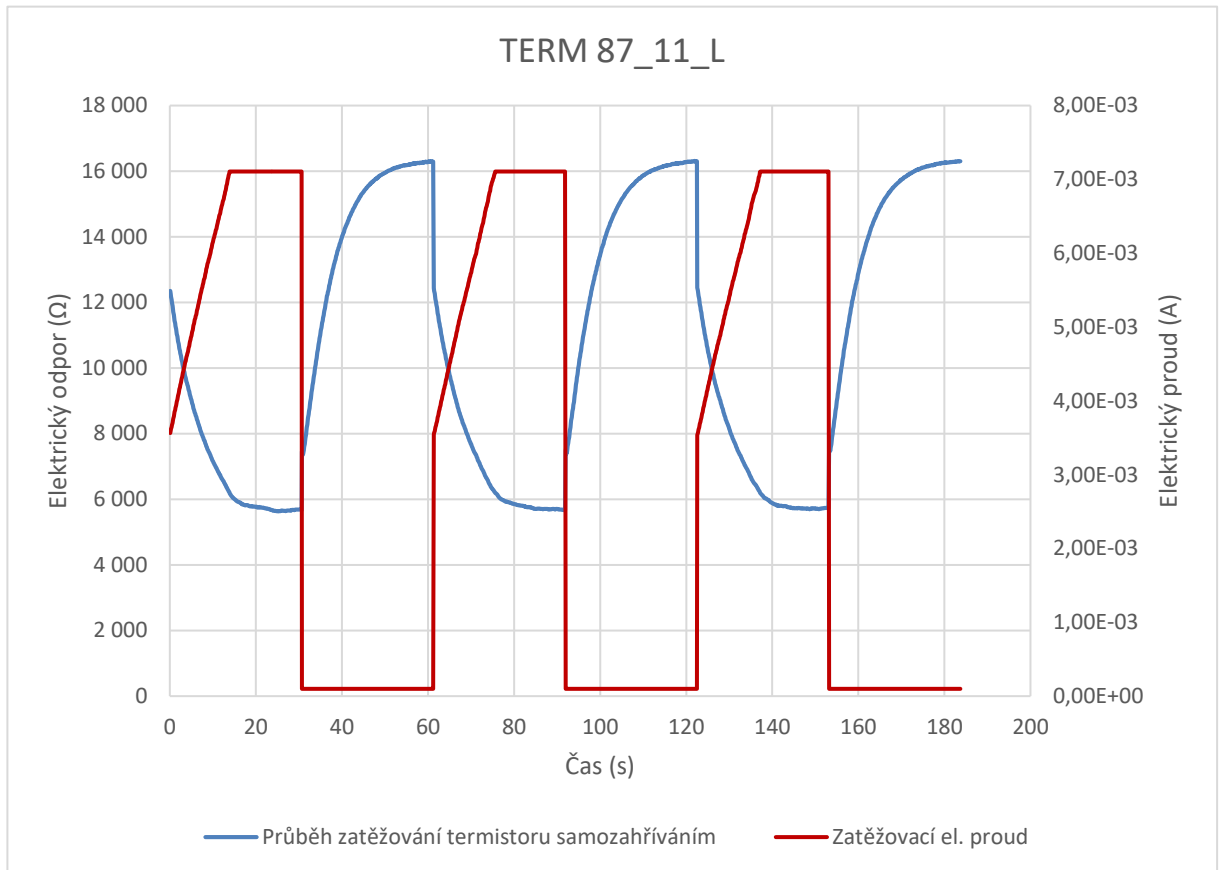
Příloha E – Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 68 a TERM 75.



Příloha F – Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 81.



Příloha G – Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 87.



Příloha H – Zatěžovací charakteristika plně tištěných termistorů TERM 99.

