

## 1. Teória vedenia tepla

### 1.1 Tepelná kapacita

Teplo potrebné na ohriatie nejakého telesa o  $1^\circ$  teploty sa nazýva jeho tepelnou kapacitou

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (1.1)$$

Tepelná kapacita jednotkovej hmotnosti danej látky sa nazýva merná tepelná kapacita a označuje sa  $c$  [ $J.kg/K$ ]. Určíme ju pomocou vzťahu  $c = C/m$ , kde  $m$  je hmotnosť daného materiálu.

Vo všeobecnosti tepelná kapacita, a preto aj merná tepelná kapacita telesa, sú funkciou jeho teploty. Teplo prijaté telesom pri zväčšení jeho teploty z  $T_1$  na  $T_2$  je preto

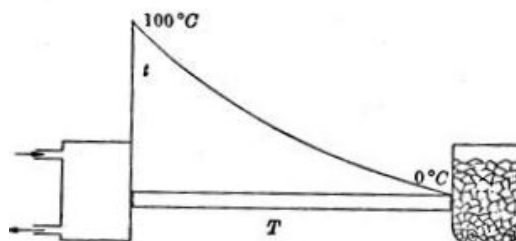
$$Q = \int_{T_1}^{T_2} C dT = \int_{T_1}^{T_2} mc dT. \quad (1.2)$$

Ak je merná tepelná kapacita telesa konštantná v meranom intervale teplôt môžeme vzťah (1.2), za predpokladu konštantnej hmotnosti telesa, pre teplo prijaté telesom vyjadriť nasledovne:

$$Q = mc (T_2 - T_1). \quad (1.3)$$

### 1.2 Vedenie tepla

Ak udržujeme na koncoch tyče, alebo medzi plochami dosiek stály rozdiel teplôt  $T_1 - T_2$ , pozorujeme prechod tepla z konca telesa s vyššou teplotou na koniec telesa s nižšou teplotou a po určitej dobe pozorujeme ustálený stav, ako možno pozorovať napr. na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Postup tepla pozdĺž tyče [1]

Množstvo tepla  $Q$  prechádzajúceho cez ktorýkoľvek prierez tyče za čas  $t$  je priamo úmerné tomuto času, rozdielu teplôt  $T_1$  a  $T_2$  obidvoch koncov tyče a veľkosti prierezu tyče  $S$  a nepriamo úmerné dĺžke tyče  $l$ ,

$$Q = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{l} t. \quad (1.4)$$

Konštanta úmernosti  $\lambda$  sa nazýva tepelnou vodivosťou materiálu tyče.

Ak stotožníme os  $X$  s osou tyče a orientujeme ju napríklad súhlasne rovnobežne so smerom klesania teploty, pokles teploty pripadajúci na jednotku dĺžky tyče, čiže tzv. tepelný spád  $\frac{T_1 - T_2}{l}$ , môžeme vyjadriť vo všeobecnosti výrazom  $-\frac{dT}{dx}$ . Vzťah (1.4) potom prejde na tvar

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dx} t. \quad (1.5)$$

Tento vzorec vyjadruje teplo prechádzajúce cez prierez tyče v každom mieste, aj keď tepelný spád nie je rovnomerný pozdĺž tyče.

Pri vedení tepla, teplo prechádzajúce za jednotku času cez plošnú jednotku, ktorá je na smer postupu tepla kolmá, nazýva sa hustota tepelného toku  $q$ . Pre túto hustotu zo vzorca (1.5) dostávame

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}. \quad (1.6)$$

Hustotu tepelného toku je výhodné definovať ako vektor  $q$ , ktorého smer je so smerom postupu tepla súhlasne rovnobežný. Vynásobením rovnice (1.6) jednotkovým vektorom v smere osi  $x$  dostávame  $x$ -ovú zložku vektora tepelného toku, ktorý sa dá vo všeobecnosti vyjadriť vzťahom:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } T. \quad (1.7)$$

Vzorec (1.7) vyjadruje základný zákon vedenia tepla v izotropných telesách, podľa ktorého vektor hustoty tepelného toku je úmerný gradientu teploty a má však opačný smer.

Podľa vzorca (1.7) cez plošný element plochy  $dS$ , ktorej sme priradili plošný vektor  $d\vec{S}$ , za čas  $dt$  z vnútra plochy na jej vonkajšiu stranu prechádza množstvo tepla  $dQ = \vec{q} \cdot d\vec{S} dt = -\lambda d\vec{S} \cdot (\text{grad } T) dt$ . Cez celý povrch plochy za čas  $dt$  opúšťa teda jej vnútro tepelné množstvo

$$Q = -\oint \lambda dt (\text{grad } T) \cdot d\vec{S} = -dt \int \lambda (\text{div grad } T) dV = -dt \int \lambda \Delta T dV .$$

Ak súčasný pokles teploty objemových elementov  $dV$  vo vnútri plochy je  $-dT$ , teplo  $Q$  je

$$Q = \int -\rho c dV dT = \int -\rho c dT dV ,$$

kde  $\rho$  je hustota telesa a  $c$  je merná tepelná kapacita. Porovnaním obidvoch vyjadrení tepla  $Q$  dôjdeme k tvaru rovnice

$$-dt \int \lambda \Delta T dV = \int -\rho c dT dV ,$$

ktorú môžeme po jej úprave prepísať do tvaru:

$$\rho c dT = \lambda \Delta T dt .$$

Keďže je teplota funkciou nielen miesta, ale aj času môžeme predošlú rovnicu prepísať do výsledného tvaru daného rovnicou:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \Delta T . \quad (1.8)$$

Rovnica (1.8), ktorá už na rozdiel od rovnice (1.7) neobsahuje nijaké tepelné množstvo, je základnou diferenciálnou rovnicou vyrovnávania teplôt v izotropnom telese. V prípade jednorozmerného vedenia tepla sa zjednodušuje na tvar

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} , \quad (1.9)$$

kde  $a$  je koeficient teplotnej vodivosti, definovaný nasledovne:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} . \quad (1.10)$$

Pričom:

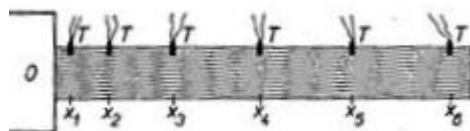
$c$  - merná tepelná kapacita,

$\lambda$  - koeficient tepelnej vodivosti,

$\rho$  - hustota materiálu.

### 1.2.1 Vedenie tepla tyčou s tepelne neizolovaným plášťom

Na meranie tepelnej vodivosti sa používajú aj tenké tyče, ktoré sú umiestnené v prostredí stálej teploty. Jeden koniec je udržiavaný ohrievačom na teplote  $T_1$ , ostatok tyče je ponechaný voľne v obklopujúcom prostredí o teplote  $T_0$  a je na ňom na viacerých miestach, ich vzdialenosť je od ohrievača  $x_1, x_2, x_3, \dots$  meraná teplota. Pre vedenie tepla potom platí vzťah (1.5).



Obr. 1.3 Meranie teploty v tyči s tepelne neizolovaným plášťom [2]

Ak je množstvo tepla  $Q$  prechádzajúcou tyčou, úmerné gradientu teploty  $\frac{dT}{dx}$ , mení sa pozdĺž tyče nie len gradient teploty, ale aj hodnota tepla  $Q$ . Gradient teploty i teplo šíriace sa tyčou sú funkciou premennej veličiny  $x$ .

Ak teplo prejdené prierezom tyče za jednotku času definujeme ako  $q = \frac{Q}{t}$  a rovnicu (1.5) zderivujeme podľa  $x$ , dostaneme rovnicu

$$\frac{dq}{dx} = -\lambda S \frac{d^2T}{dx^2} . \quad (1.13)$$

Z tejto rovnice určíme teplotnú vodivosť  $\lambda$  tak, že zmeriame pokles teploty pozdĺž tyče a  $\frac{dq}{dx}$ .

Určením poklesu teploty pozdĺž tyče získame funkciu  $T = f_1(x)$ , z nej odvodíme  $\frac{d^2T}{dx^2}$ .

Derivácia  $\frac{dq}{dx}$  udáva, ako sa pozdĺž tyče mení množstvo tepla, ktoré prechádza za jednotku času jednotlivými prierezmi. Pretože v ustálenom stave sa nemôže teplo v tyči hromadiť, udáva výraz  $-\frac{dq}{dx}$  množstvo tepla, ktoré za jednotku dĺžky tyče odvedie za jednotku času do okolia.

Teplo odvedené z tyče do okolia, určíme tak, že okrem merania naznačeného na obrázku 1.3, prevedieme ešte jedno meranie. Kratšiu tyčku z rovnakej látky a rovnakého prierezu ohrejeme na teplotu ohrievača  $T_1$  a necháme chladnúť v prostredí, ktoré má rovnakú teplotu ako v predchádzajúcom prípade. Zmeriame závislosť teploty tyčky na čase a tým získame funkciu  $T = f_2(t)$ . Ak je  $c$  merná tepelná kapacita,  $\rho$  hustota,  $S$  prierez, a  $l$  dĺžka

tyče, je pri zmene teploty z pôvodnej hodnoty  $T_1$  na hodnotu  $T$  teplo  $Q$  odvedené do okolia daná vzťahom

$$Q = c\rho lS(T_1 - T) . \quad (1.14)$$

Ak zanedbáme odvod tepla z čiel tyčky, vypočítanej z rovnice (1.14) teplo odvedené z jednotky dĺžky tyče za jednotku času do okolia ako  $\left(\frac{1}{l}\right)\left(\frac{dQ}{dt}\right)$ . Následne dostaneme vzťah

$$\frac{dq}{dx} = -\frac{1}{l} \frac{dQ}{dt} = c\rho S \frac{dT}{dt} . \quad (1.15)$$

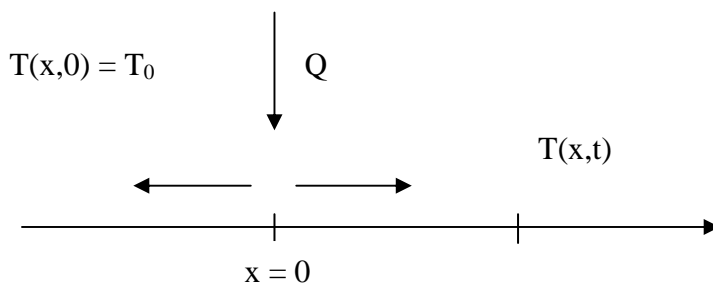
Dosadením z tejto rovnice do vzťahu (1.13), dostaneme pre tepelnú vodivosť vzťah

$$\lambda = -c\rho \frac{\frac{dT}{dt}}{\frac{d^2T}{dx^2}} . \quad (1.16)$$

Zo vzťahu (1.16) môžeme vypočítať  $\lambda$  na základe zmeraných funkcií  $T=f_1(x)$  a  $T=f_2(t)$  za predpokladu, že poznáme  $c$  a  $\rho$ .

### 1.3 Meranie koeficientu teplotnej vodivosti impulznou metódou

Majme nekonečne dlhý tepelný vodič teploty  $T(x,0)=T_0$ . V mieste  $x=0$  a v čase  $t_0=0$  dodáme do vodiča určité množstvo tepla (Obr. 1.4).



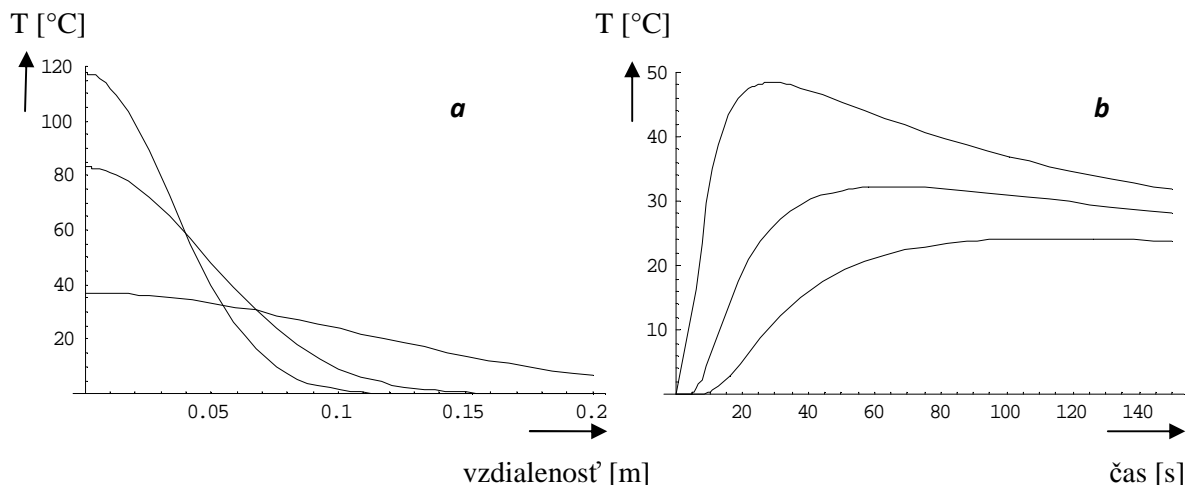
Obr. 1.4 Šírenie tepla v nekonečne dlhej tyči

Dodané teplo sa bude vodičom šíriť z miesta  $x=0$  na obidve strany, v dôsledku čoho sa stane teplota vodiča funkciou súradnice  $x$  a času  $t$ . Tento proces popisuje rovnica vedenia tepla, pre

jednorozmerný prípad (1.9). Riešením tejto rovnice je za uvedených podmienok teplotná funkcia

$$T(x, t) = \frac{A}{2\sqrt{\pi a t}} \exp\left\{-\frac{x^2}{4 a t}\right\}, \quad (1.17)$$

ktorá popisuje rozloženie teploty pozdĺž vodiča v ľubovoľnom časovom okamihu (obr.1.5a).



Obr. 1.5 Priebeh funkcie (1.17) v závislosti na čase **a**) pre danú dĺžku tyče  
a mieste **b**) v danom rozsahu časov

Závislosť teploty na čase ľubovoľnom mieste vodiča (1.5b). Teplotná funkcia (1.17) má teplotný extrém, daný podmienkou

$$\frac{\partial T(x_0, t)}{\partial t} = 0. \quad (1.18)$$

Riešením rovnice (1.18) po dosadení teplotnej funkcie v tvare (1.17) dostaneme pre čas teplotného maxima výraz

$$t_m = \frac{x_0^2}{2a}. \quad (1.19)$$

Vzťah (1.19) je dôležitý pre meranie koeficientu teplotnej vodivosti. Ak v bode  $x = x_0$  zmeriame čas maxima teploty  $t_m$ , môžeme koeficient teplotnej vodivosti vypočítať pomocou vzťahu

$$\lambda = c\rho \frac{x_0^2}{2 t_m}. \quad (1.20)$$

Rovnica vedenia tepla (1.9) pre nekonečne dlhý tepelný vodič platí za predpokladu, že je vodič tepelne izolovaný (Obr. 1.2) a teplo sa šíri iba vo vnútri vodiča. V praxi však túto podmienku nie je možné dodržať, a tak vždy dochádza k odvodu tepla z povrchu vodiča do okolia (Obr. 1.3). Keď uvažujeme aj tento odvod tepla, rovnica (1.9) prejde na tvar

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{2\alpha}{\rho cr} T = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1.21)$$

kde:  $\alpha$  – koeficient odvodu tepla z tyče,  
 $r$  – polomer tyče,  
 $a$  – koeficient tepelnej vodivosti materiálu tyče.

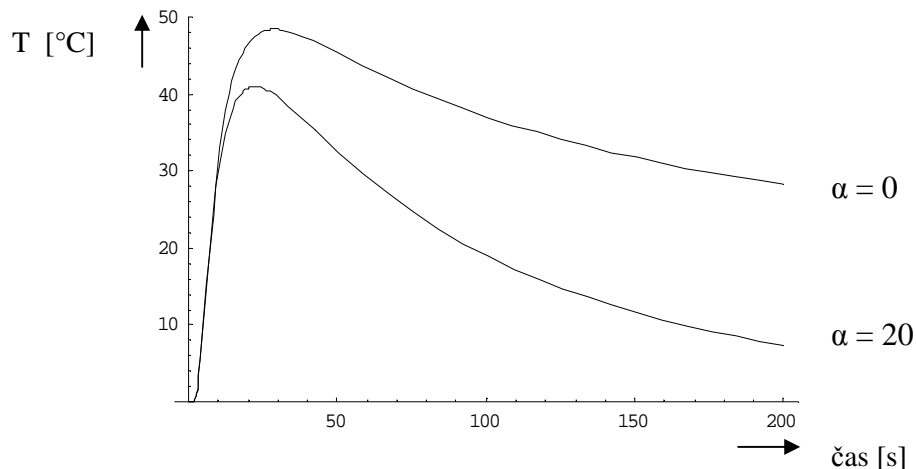
Rovnici (1.21) vyhovuje teplotná funkcia

$$T(x, t) = \frac{A}{2\sqrt{\pi a t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4kt} - bt\right), \quad (1.22)$$

kde

$$b = \frac{2\alpha}{\rho cr}, \quad (1.23)$$

je relatívny úbytok teploty vodiča za jednotku času v dôsledku odvodu tepla do okolia.



Obr. 1.6 Priebeh funkcie (1.22) vo vybranom mieste v závislosti na čase pre rôzne  $\alpha$

Funkcia (1.22) sa zhoduje s funkciou (1.17), ak neexistuje odvod tepla. Ako je z obrázku 1.6 vidieť, v prípade odvodu tepla sledujeme rýchlejší pokles teploty, oproti tepelne izolovanému materiálu. Rýchlejší pokles je zapríčinený unikom tepla do okolia.

Podmienka teplotného maxima funkcie (1.22) vedie k vzťahu

$$a = \frac{x_0^2}{2t_m} * \frac{1}{1+bt_m}. \quad (1.24)$$

Rovnicu (1.24) môžeme prepísať do nasledovného tvaru:

$$2ab t_m^2 + 2 a t_m - x_0^2 = 0. \quad (1.25)$$

Tento tvar sa dá využiť na určenie koeficientov  $a$  (1.10) a  $b$  (1.23), za predpokladu že v danej vzdialenosti  $x_0^2$  budeme merať čas príchodu tepelného impulzu. Zo znalosti týchto koeficientov si vieme následne určiť koeficient tepelnej vodivosti  $\lambda$  a odvodu tepla  $\alpha$ .

## 1.4 Ochladenie tyče

Koeficient odvodu tepla z tyče do okolia, určíme nasledovne. Kratšiu tyčku z rovnakej látky a rovnakého prierezu ohrejeme na teplotu ohrievača  $T_1$  a necháme chladnúť v prostredí, ktoré má rovnakú teplotu ako v predchádzajúcom prípade. Zmeriame závislosť teploty tyčky na čase a tým získame funkciu  $T(t)$ . Pokles teploty môžeme popísať parciálnou diferenciálnou rovnicou (1.21), pričom neuvažujeme šírenie tepla v smere osi  $x$ ,  $T \neq f(x)$ , a daná rovnica potom nadobudne tvar:

$$\frac{2\beta}{\rho c r} T = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (1.26)$$

Ktorej riešením je

$$T(x, t) = T_0 \exp\left(-\frac{2\alpha}{\rho c r} t\right) = T_0 \exp(-bt). \quad (1.27)$$

Z nameraného časového priebehu teploty tyče  $T(t)$  pri jej chladení a zo znalosti teoretického priebehu danej teploty (1.27) si vieme určiť koeficient  $b$  a následne pomocou vzťahu (1.23) aj koeficient odvodu tepla  $\alpha$  do okolia. Koeficient  $\alpha$  je vo všeobecnosti veľmi zložitou funkciou viacerých parametrov: materiálu tyče, jej priemeru, teploty okolitého prostredia, spôsobu chladenia a ďalších parametrov.

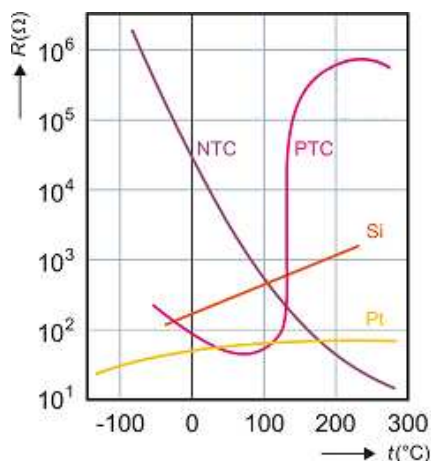
## 2. Meranie tepelnej závislosti odporu termistora

### 2.1.1 Termistory

Termistor (z angl. *thermally sensitive resistor* – tepelne citlivý rezistor) predstavuje odporový snímač teploty vytvorený z keramických látok. Vo všeobecnosti sa používajú



sintrované oxidy zo skupiny železných kovov (chróm, mangán, nikel, kobalt, železo). Termistory pokrývajú teplotný rozsah od  $-100\text{ °C}$  do  $+350\text{ °C}$ , určité typy sa môžu používať už od teploty  $2\text{ K}$  (oxid ruténia). Väčšina polovodičov má záporný teplotný koeficient odporu. Platí to aj pre termistory. Preto sa termistory niekedy nazývajú aj termistory NTC alebo len krátko NTC (z angl. *Negative Temperature Coefficient*). Existujú však aj termistory s kladným teplotným koeficientom odporu – PTC. Závislosť odporu od teploty pre niektoré typy odporových snímačov teploty znázorňuje obr. 2.6.



Obr. 2.6 Charakteristiky rôznych odporových snímačov [5]

V našom prípade sa budeme zaoberať len meraním a kalibrovaním termistora NTC, teda termistora so záporným teplotným koeficientom. Teplotnú zmenu odporu termistora NTC môžeme vyjadriť vzťahom:

$$R(T) = R(T_0)e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (2.4)$$

kde:

$R(T_0)$  je odpor pri referenčnej teplote  $T_0$  (zvyčajne  $25\text{ °C}$ ),

$B$  je konštanta závisiaca od typu NTC.

Hodnota odporu termistora pri referenčnej teplote závisí od materiálu, typu a koncentrácie prímiesí, rozmerov a geometrie samotného termistora. Dovoľená chyba termistorov dosahuje  $\pm 1\text{ °C}$  v prípade štandardných typov a  $\pm 0,2\text{ °C}$  pre vysoko presné typy.

Veľmi presnú aproximáciu charakteristík termistora uvádza tzv. **Stenihart-Hartova** rovnica.

$$\frac{1}{T} = A + B * \ln R + C(\ln R)^3 \text{ [K]} \quad (2.5)$$

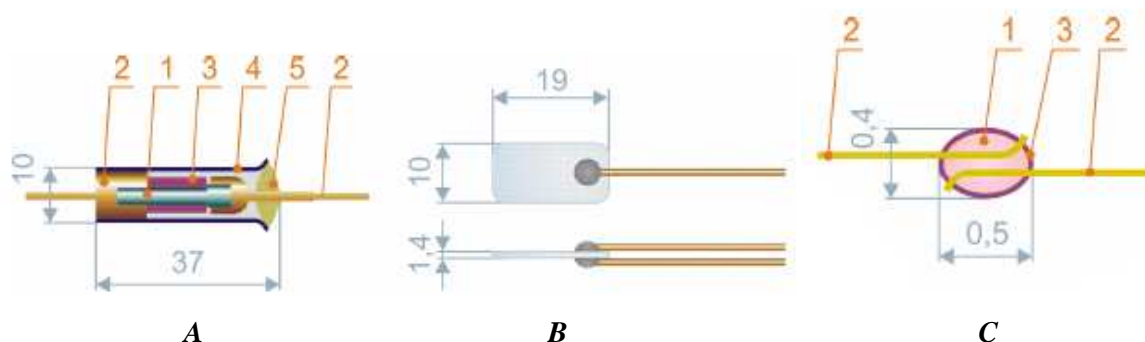
Konštanty  $A$ ,  $B$ ,  $C$  sa dajú určiť z troch rovníc, ktoré vyplývajú z troch meraní pri troch rôznych teplotách:

$$R1 = R(T1), R2 = R(T2) \text{ a } R3 = R(T3).$$

Okrem toho treba splniť tieto podmienky:

- a)  $-40 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T1$ ,
- b)  $T2, T3 \leq 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a
- c)  $(T2 - T1) \leq 50 \text{ }^{\circ}\text{C}; (T3 - T2) \leq 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- d) teploty  $T1, T2, T3$  majú byť rovnomerne odstupňované.

Základnou časťou termistora je polovodičový prvok – rez keramického materiálu s pokoveným povrchom na pripojenie elektrických kontaktov. Zariadenie je zapuzdrené v obale z tepelne vodivého epoxidu na zaistenie mechanickej ochrany a s malým tepelným odporom k objektu merania. Existujú rôzne tvary – kotúč, sklená guľôčka, sonda, úprava pre montáž na povrchu (SMD). Najmenšie termistory sú menšie ako 1 mm .



Obr. 2.7 Rôzne tvary termistorov [5]

A) tyčinkový termistor (1-citlivá tyčinka, 2- držiak, 3- ochranná fólia, 4- ochranný kryt, 5-izolačná látka) B) plochy termistor C) perličkový termistor (1- jadro, 2- pripojovacie vodiče, 3- ochranný kryt)

## 2.1.2 Termistor NTC

Pri kalibrácii bol použitý termistor série 640, ktorého základné parametre sú uvedené v tab. 2.4.

Tab. 2.4 Parametre použitého termistora

<b>Doba odozvy</b>	1,2 s
<b>Teplotný rozsah</b>	-40 °C až 125 °C

<b>Stratový výkon</b>	0,5 W
<b>Odpor pri teplote 25 °C</b>	14 kΩ až 470 kΩ

Aproximáciu charakteristiky termistora (Graf 2.3) dosiahneme použitím tzv. Steinhart-Hartovej rovnice (vzťah 2.5). V mojom prípade nebolo potrebné konštanty A, B, C určiť meraním, nakoľko ich hodnoty som dostal fitnutím nameraného priebehu na Grafe 2.3, pomocou krivky definovanej vzťahom (2.5).

Výsledný vzťah pre výpočet teploty v °C má tvar:

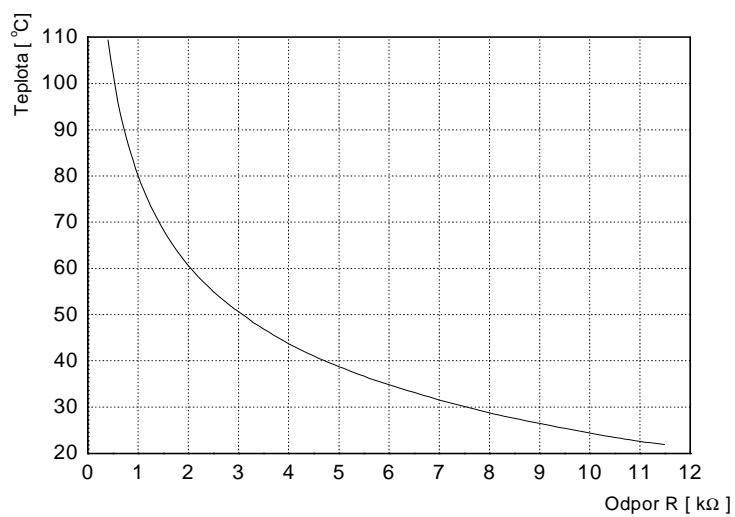
$$T = \frac{1}{A+B*\ln R+C(\ln R)^3} - 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]} , \quad (2.8)$$

kde konštanty pre náš meraný termistor NTC majú hodnotu:

$$\begin{aligned} A &= 0,00109 && \pm 2,9 * 10^{-6} , \\ B &= 0,00026 && \pm 5,6 * 10^{-7} , \\ C &= -1,560*10^{-7} && \pm 3,0 * 10^{-9} . \end{aligned}$$

Po prepočte vzťahom (2.8) dostaneme hodnotu teploty okolitého priestoru. V mojom prípade teplotu vo vnútri kalibračnej piecky (Graf 2.3), v závislosti od hodnoty odporu termistora. Odchýlka údajov vypočítaných touto rovnicou od skutočnej teploty nepresahuje  $\pm 0,01$  °C.

Na tomto grafe je závislosť teploty termistora od jeho odporu. Možno veľmi pekne pozorovať zápornú charakteristiku NTC rezistora, t.j. s rastom teploty klesá hodnota jeho odporu.



Graf 2.3 Tepelná závislosť odporu termistora NTC

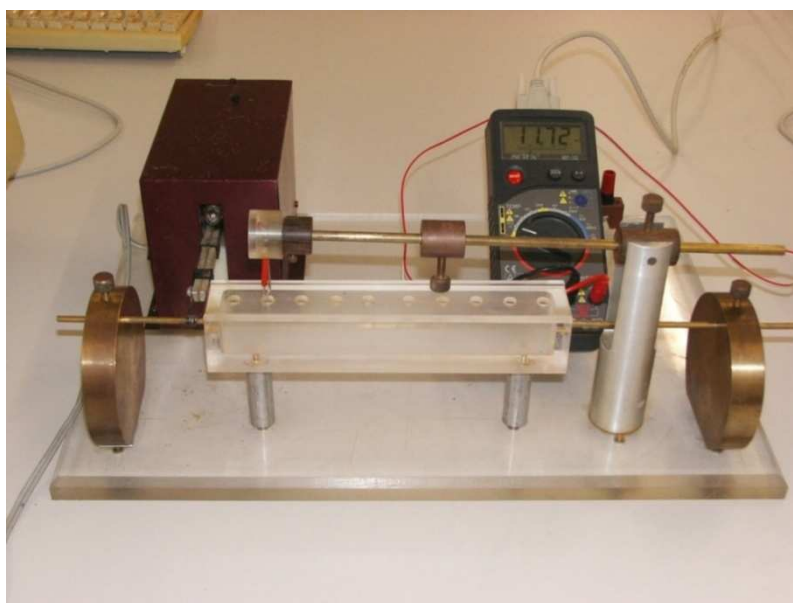
### 3. Meranie tepelnej vodivosti materiálov

#### 3.1 Meranie pomocou tepelného impulzu

Určovanie tepelnej vodivosti pomocou tepelného impulzu. Impulz je privádzaný na jeden koniec mosadznej pomocou hrotu pájkovačky. Pri rôznych meraniach sa používa rôzna dĺžka tepelného impulzu a poloha merania. Mosadzná tyč má nasledovné parametre:

$$\text{Mosadz:} \quad \rho_{Mo} = 7900 \text{ kg/m}^3 \quad c_{Mo} = 372 \text{ J.kg/K} \quad \lambda = 130 \text{ W/m.K}$$

Spoločné zapojenie pre nasledujúce merania znázorňuje obr. 3.1 .



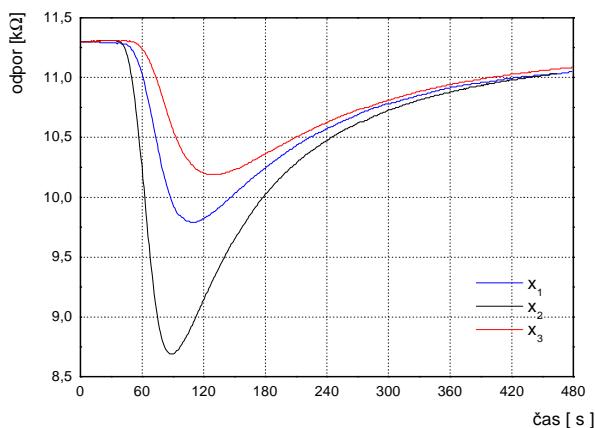
Obr. 3.1 Zapojenie pri meraní pomocou tepelného impulzu

##### 3.1.1 Meranie v rôznych polohách

V nasledujúcom meraní je ako merací prvok použitý termistor NTC. Meranie sa prevádza v troch bodoch ( $x_1, x_2, x_3$ ), vo vzdialenostiach od zdroja impulzu 50 mm, 75 mm a 100 mm. Privedený tepelný impulz dosahoval dĺžku 30 sekúnd.

V grafe 3.1 môžeme sledovať, ako sa odpor termistora menil v čase a v závislosti od vzdialenosti zdroja impulzu. Po privedení tepelného impulzu sa začala zvyšovať teplota materiálu. Odpor termistora začal rýchlo klesať a ako je z grafu vidieť, čím ďalej sa termistor od zdroja tepla nachádzal, tým bol pokles jeho odporu menší. To bolo zapríčinené tým, že

teplota sa nešírila len materiálom, ale aj do okolitého prostredia, čím dochádzalo k ochladzovaniu. Po skončení impulzu dochádza k exponencionálnemu nárastu odporu, ktorý je zapríčinený samovoľným ochladzovaním materiálu, až na teplotu okolitého prostredia. Tabuľka 3.2 obsahuje hraničné hodnoty odporu a čas v ktorom bol odpor najmenší.



Graf 3.1 Závislosť meniaceho sa odporu v čase t

Tab. 3.2 Min. hodnoty odporu a času v závislosti od polohy

bod	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
odpor [kΩ]	8,69	9,79	10,19
čas [s]	59	80	100

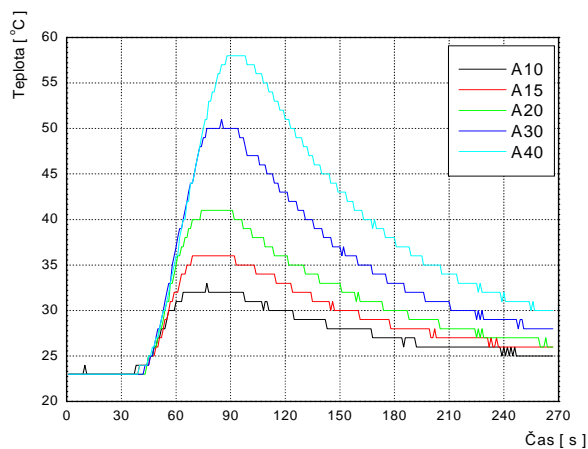
### 3.1.2 Impulzy rôznej dĺžky

V tejto časti je merá teplota pomocou termočlánku. Dodávané boli tepelné impulzy rôznej časovej dĺžky, pričom spoločný bod merania je 50 mm od zdroja impulzu. Z grafu 3.5 môžeme pozorovať, ako sa teplota zvyšovala podľa toho, ako sa zvyšovala dĺžka impulzu. Zároveň je vidieť, že termočlánok zaznamenal takmer lineárny nárast teploty nezávisle od dĺžky impulzu. Nezávisle od dĺžky tepelného impulzu nárast teploty v meranom bode nastal vždy 12 s po zapnutí ohrevu tyče.

Tab. 3.6 Hodnoty maximálnych teplôt s ich časmi

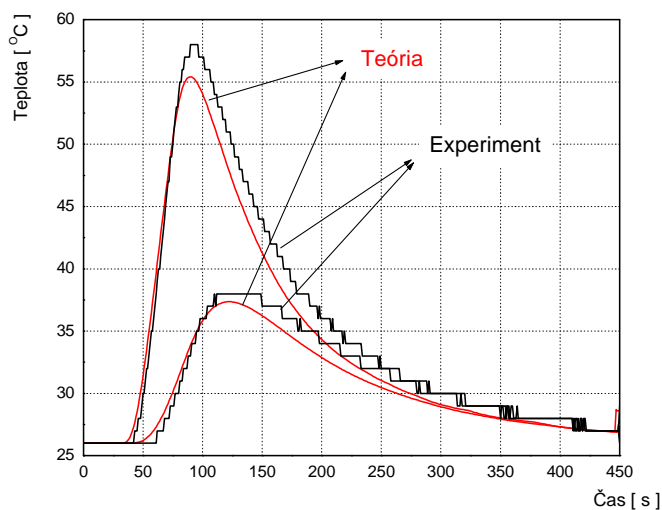
dĺžka impulzu [s]	10	15	20	30	40
čas maxima [s]	40	45	49	53	62
teplota T <sub>m</sub> [°C]	33	36	41	51	58
čas nábehu [s]	30	30	29	23	22

V tabuľke 3.6 sú hodnoty maximálnych teplôt s časmi, v ktorých sa tieto teploty namerali. Opäť je od časov odrátaný čas ustabilizovania termočlánku (30 sekúnd).



Graf 3.5 Hodnoty teploty namerané termočlánkom, pri rôznych dĺžkach impulzov

### 3.2 Porovnanie s teóriou



Graf 3.9 Porovnanie simulácie a nameraných hodnôt

Numerické riešenie parciálnej diferenciálnej rovnice (1.21), pomocou metódy sietí má tvar:

$$T_{i+1,j} = T_{i,j} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{\lambda}{\rho c} (T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}) - \frac{2\alpha}{\rho c r} (T_{i,j} - T_0), \quad (3.2)$$

kde:  $\Delta t$  čas záznamu (1 sekunda),

$\Delta x$  vychádza s podmienky konvergenencie a platí:  $\frac{a\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$ ,  
 $T_0$  teplota okolia.

Pomocou vzťahu (3.2), sa urobila simulácia, pre body merania 50 a 100 mm (40 sekundový impulz, mosadzná tyč), pri meraní termočlánkom. Ako už je z grafu (3.9) vidno, namerané hodnoty sa takmer rovnajú s hodnotami simulácie. V tab. 3.4 pre dané podmienky simulácie sú zapísané aj teoretické časy dosiahnutia maxima teploty, pre rôzne vzdialenosti od zdroja tepla. Ako je vidieť z danej tabuľky, experimentálne namerané časy maxima teploty sa veľmi dobre zhodujú s teoretickými, v rámci chyby merania.

## Použitá literatúra

- [1] Ilkovič, D.: Fyzika. Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, Bratislava, 1962. ISBN 63-056-62
- [2] Svoboda, E.: Termika a molekulová fyzika. Matfyzpress, Praha. ISBN 978-80-7378
- [3] [http://www.spsest.sk/sos/pdf/l\\_s.pdf](http://www.spsest.sk/sos/pdf/l_s.pdf)
- [4] [http://www.fluke.sk/index.php?show=eshop\\_zobraz\\_tovar&id=39&kategoria=111](http://www.fluke.sk/index.php?show=eshop_zobraz_tovar&id=39&kategoria=111)
- [5] Kureková E., Gabko P., Halaj M.: Technické meranie. Ing. Peter Juriga - Grafické štúdio, Bratislava, 2005. ISBN 80-89112-04-8
- [6] Guten M., Kúdelčík J., Šimko M.: Meracie prístroje a systémy elektrických a neelektrických veličín. Edis, Žilina, 2006. ISBN 80-8070-619-0
- [7] Lorenc, J.: Elektrotechnická měření v automatizační technice. SNTL–Nakladatelství technické literatury, Praha, 1985. ISBN 04-517-85
- [8] Horák Z., Krupa F., Šindelař V.: Technická fyzika. SNTL, Praha, 1958.
- [9] Štelina : Meranie koeficientu vodivosti impulznou metódou. Praktická úloha, ŽU – Elektrotechnická fakulta, Katedra fyziky.