

# THERMAL FLOW METER

Albert Mlčoch

Bachelor Degree Programme (3), FEKT VUT

E-mail: xmlcoc11@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Petr Beneš

E-mail: benesp@feec.vutbr.cz

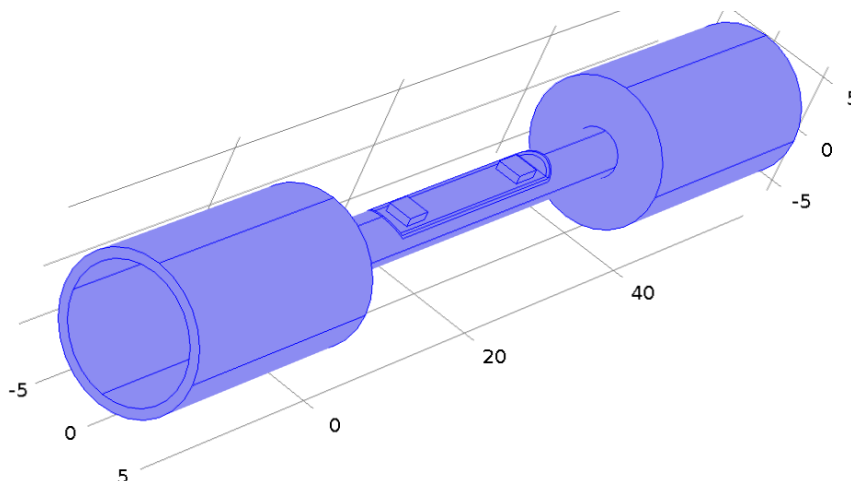
**Abstract:** The paper deals with verification of mathematical model of thermoanemometric sensor of water flow according to King's equation. The model and measuring apparatus are briefly described. The paper deals mainly with measurement and its evaluation. The model is gradually modified depending on the measured data. The conclusion summarizes the current knowledge and measurement accuracy of a modified sensor model.

**Keywords:** flow measurement, heat measurement, King equation, mathematic model

## 1 ÚVOD

Cílem výzkumu je vyvinout jednoduchý a na údržbu nenáročný snímač průtoku tekutin založený na principu tepelného anemometru, tedy měření výkonových ztrát na vyhříváném prvku. Ztráty na vyhříváném prvku jsou funkcí průtoku tekutiny. Požadovaný rozsah snímače je do 5 kg/min (pro vodu) s chybou měření 0,5%. Pro snímač bylo nutné vybrat vhodný matematický model a stanovit jeho parametry. Z důvodu netypického geometrického uspořádání snímače bylo nutné model značně upravit.

Snímač je v provedení tenké nerezové trubičky s plochým prolisem. Na prolisu jsou umístěny dva platinové snímače teploty, jeden jako vyhříváný element, druhý měří teplotu tekutiny.



**Obrázek 1:** Model snímače P1K0/050 se šroubením (v měřítku, rozměry v milimetrech)

## 2 MATEMATICKÝ MODEL SNÍMAČE

Předpokládaná závislost výkonových ztrát na snímači vychází z tepelných ztrát prouděním [1]:

$$P = K \cdot \lambda \cdot Pr^m \cdot Re^n \cdot S \cdot \Delta T \quad (1)$$

kde  $P$  je ztrátový výkon,  $K$  je geometrická konstanta průtokoměru,  $\lambda$  je tepelná vodivost prostředí,  $Pr$  je Prandtlovo číslo a  $Re$  je Reynoldsovo číslo,  $m$  a  $n$  jsou experimentálně získané konstanty,

$S$  je průřez průtokové trubice a  $\Delta T$  je rozdíl teplot. Po zahrnutí ztrát vedením vede rovnice (1) na Kingovu rovnici [2]. Tu můžeme vyjádřit například ve tvaru:

$$P = \Delta T \cdot (A + B \cdot \sqrt{v}) \quad (2)$$

kde  $P$  je ztrátový výkon na vyhříváním rezistoru [W]

$\Delta T$  je rozdíl teploty tekutiny a teploty vyhřívajícího prvku [°C]

$A$  jsou tepelné ztráty na vyhříváním prvku způsobené vedením tepla (tedy za nulového průtoku) [ $\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$B$  je parametr pro ztráty způsobené prouděním média [ $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \text{s}^{1/2} \text{m}^{-1/2}$ ]

$v$  je rychlost proudění tekutiny [m/s]

Po dosazení hmotnostního průtoku  $Q_m$  do rovnice (2) dostáváme vztah pro tento průtok:

$$Q_m = \rho \cdot S \cdot \left( \frac{P - \Delta T \cdot A}{\Delta T \cdot B} \right)^2 \quad (3)$$

kde  $Q_m = v \cdot \rho \cdot S$  je hmotnostní průtok [kg/s]

$\rho$  je hustota tekutiny [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

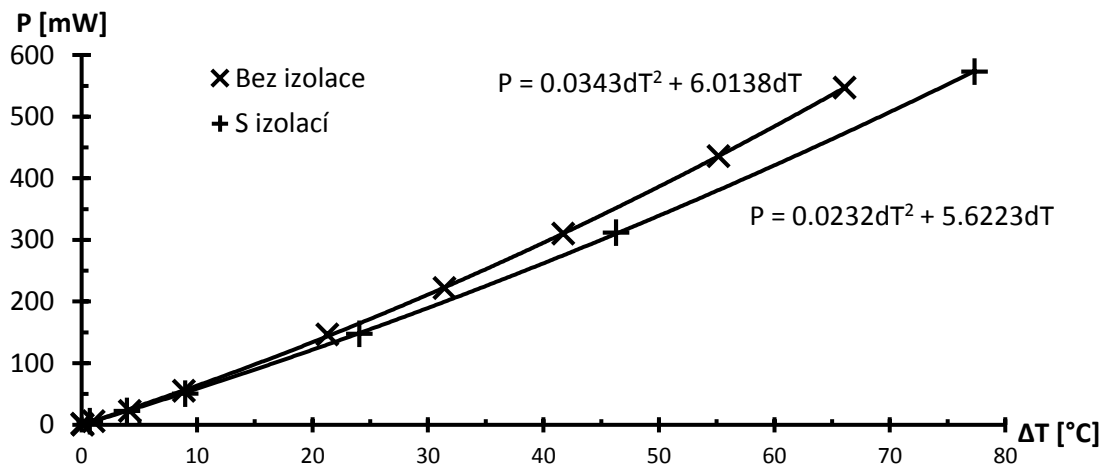
$S$  je průřez trubky, v našem případě  $8 \text{ mm}^2$  [ $\text{mm}^2$ ]

### 3 MĚŘICÍ APARATURA A ZPŮSOB MĚŘENÍ

Měřený přípravek P1K0/050 byl zapojen do uzavřeného vodovodního okruhu s čerpadlem a regulačním ventilem. V sérii s měřeným přípravkem byl zapojen referenční průtokoměr Sitrans F C MASS2100 s možností měření hmotnostního průtoku, teploty a hustoty kapaliny. Před a za snímačem byl měřen diferenční tlak. Těsně před snímačem byla měřena teplota vody referenčním snímačem KTG2/C-30 (Pt 1000, dvou vodičově ohmovou metodou). Hodnoty ze snímačů teploty na trubice P1K0 (Pt 1000, chladný snímač) a P0K05 (Pt 50, vyhřívání snímač) byly měřeny čtyřvodičově ohmovou metodou.

### 4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MODELU

Za nulového průtoku vody byl měřen parametr  $A$ . Z matematického modelu vychází, že parametr  $A$  je roven směrnicí závislosti odebíraného výkonu na rozdílu teplot. Předpokladem bylo, že je tato závislost lineární, což se měřením nepotvrdilo, jak je znázorněno na obrázku 2.



Obrázek 2: Měření parametru  $A$  s neizolovaným a izolovaným snímačem

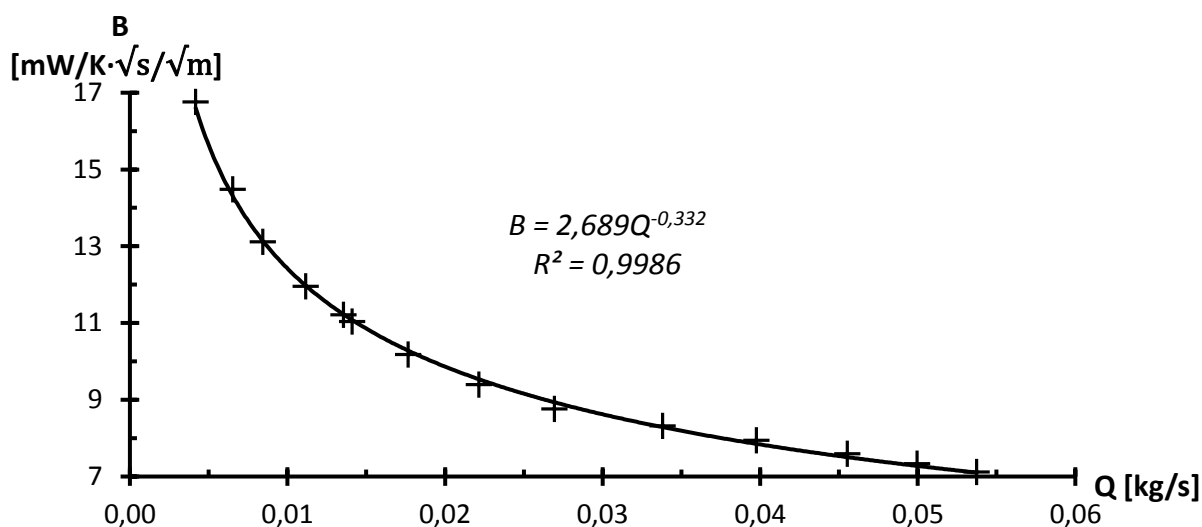
Parametr A byl tedy nahrazen polynomem:

$$A = A_1 \cdot \Delta T + A_0 = A_0 \left( \frac{A_1}{A_0} \cdot \Delta T + 1 \right) = A_0 (A_\alpha \cdot \Delta T + 1) \quad (4)$$

Toto chování lze vysvětlit změnou tepelné vodivosti vody a okolního vzduchu při změně jejich teploty, případně i prouděním vzduchu okolo zahřáté trubičky snímače.

Při měření parametru B se za držení konstantní teploty zvyšoval průtok tekutiny. Předpokladem bylo, že parametr B zůstane pro všechny průtoky konstantní, nelinearita odebrání tepla prouděním je v rovnici (1) vyjádřena odmocninou rychlosti. Ani tento předpoklad se pro tuto geometrii snímače nepotvrdil. Měření proběhlo pro rozdíly teplot  $dT = 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38$  a  $51^\circ\text{C}$ , parametr B se měnil pro všechny měřené rozdíly teplot, jak je vidět na obrázku 3. Průběh parametru B lze aproximovat následující mocninou funkcí:

$$B = B_k \cdot Q^{-B_{exp}} \quad (5)$$



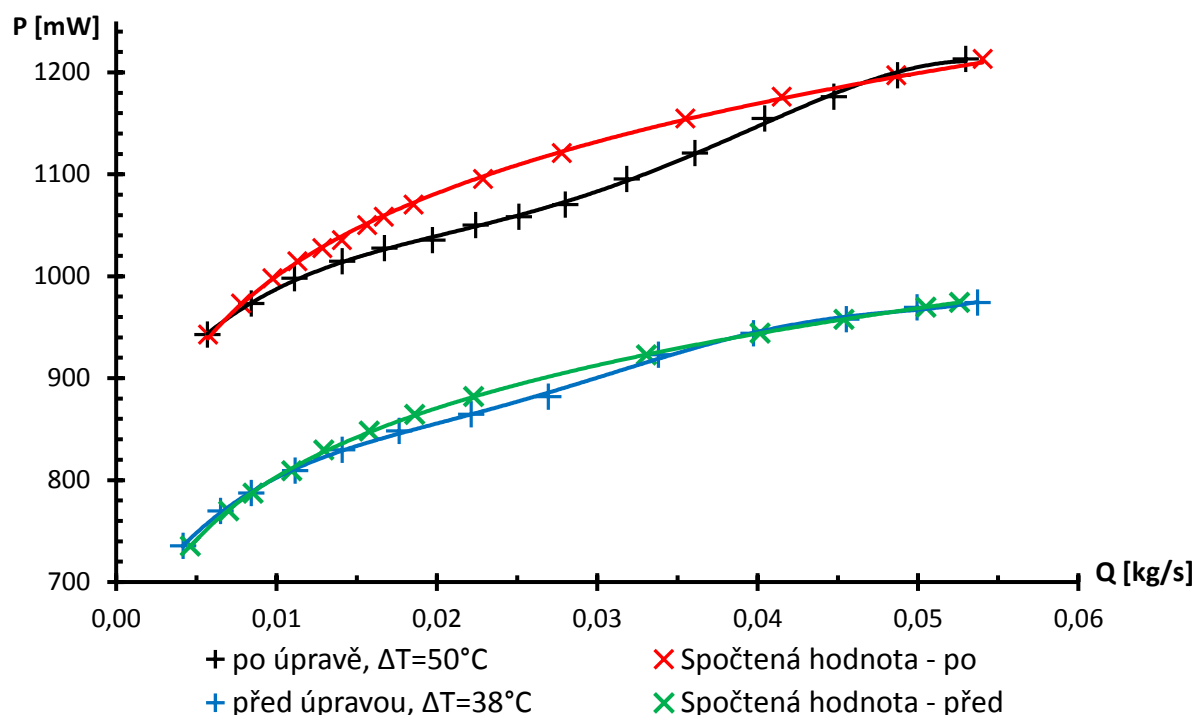
**Obrázek 3:** Velikost parametru B v závislosti na průtoku pro  $dT = 38^\circ\text{C}$

Toto chování parametru B lze vysvětlit rozdílnou geometrií snímače oproti běžným anemometrům. Jedná se zejména o umístění vyhřívaného tělíska, které není v měřicí trubici, ale je pro jednoduchost konstrukce přilepeno zvenčí. Z těchto měření lze odvodit výslednou rovnici snímače:

$$Q_m = \left\{ \frac{S \cdot \rho(T)}{B_k^2 \cdot \Delta T^2} \cdot [A_0 \cdot \Delta T \cdot (A_\alpha \cdot \Delta T + 1) - P]^2 \right\}^{\frac{1}{1-2 \cdot B_{exp}}} \quad (6)$$

Už z aproximace pro parametr B na obrázku 3 je zřejmé, že v části průběhu okolo průtoku  $Q = 0,03 \text{ kg/s}$  neaproximuje měřená data dostatečně přesně. Po dosazení do výsledného vztahu je vidět výrazná odchylka od měřených dat ve střední části charakteristiky.

Pro objasnění odchylky v charakteristice byly učiněny následující úpravy měření: došlo ke kalibraci snímačů teploty, byly měřeny časové konstanty snímače, byla řízena teplota v laboratoři na konstantní hodnotu, snímač byl tepelně zaizolován keramickou vatou, byly změřeny tlakové ztráty na snímači pro podezření na turbulence v měřicím potrubí. Celá charakteristika byla měřena jedním referenčním průtokoměrem, který byl srovnán s ostatními průtokoměry, pro vyloučení možnosti chyby referenčního průtokoměru.



**Obrázek 5:** Naměřená a vypočtená charakteristiky před a po úpravě měření

Po zdokonalení měření je z obrázku 5 jasně vidět, že naměřená anomálie nebyla chybou měření, ani šumem. V charakteristice snímače dochází k zatím neidentifikovanému přechodovému jevu, který nelze proložit jednoduchou funkcí. Naměřené charakteristiky lze proložit polynomy vyšších řádů (4., 5., 6. řád), to ovšem nelze použít při reálném provozu snímače, a to zejména z důvodu složité kalibrace koeficientů a nemožnosti určit vliv jednotlivých jevů, například změnu okolní teploty, na velikost koeficientů polynomu. Tento jev způsobí odchýlení charakteristiky od předpokládané hodnoty. Prozatím se experimentálně ani teoreticky nepodařilo prokázat původce jevu. Při průchodu charakteristiky bodem zlomu nedochází ke změně tlakové ztráty. Určitým vysvětlením by mohl být vznik turbulentního proudění v oblasti zúžení potrubí.

## 5 ZÁVĚR

Snímač prozatím nedosahuje požadované přesnosti 0,5%, i po rozdělení na dvě navazující funkce před a za anomálií dosahuje přesnosti pouze 2%. Pro zvýšení přesnosti je nutné zvětšit průřez trubičky snímače, tím se docílí menší rychlosti tekutiny v trubičce, tedy i větší citlivosti. Charakteristika by se také mohla vyhnout nežádoucí anomálii. Zvětšením průřezu by umožnilo docílit požadovaného průtoku 5 kg/min (pro vodu) s nižšími tlakovými ztrátami. Určení nových rozměrů trubičky tak, aby výsledný snímač dosáhl požadovaných parametrů je předmětem aktuálního zkoumání a simulací.

## REFERENCE

- [1] Základní pojmy a definice: Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2005, s. 23-41. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-156-X.
- [2] Kingova rovnice: Olin, Ph.D, John G. A Standard for manufacturers of thermal dispersion mass flow meters. Sierra Instruments, Inc.: CEO, Founder. October 15, 2008.