



# Měření průtoku vzduchu

Prezentace měřených hodnot a výsledků

Prezentující VÁCLAV HORÁČEK  
Spolupracovník JAN HOLÍK,

Brno, 18. 11. 2025

1. Změřit převodní charakteristiky pro průtokoměry
  - Škrtící člen (clona) o průměru 12mm
  - Vírový průtokoměr EGGS DELTA PULSE FLP15-2PA
  - Termoanemometr IST FS5.A
  - Kalorimetrický průtokoměr HONEYWELL AWM 720P1
2. Změřit tlakové ztráty snímačů na průtoku
3. Změřit tlakové ztráty v závislosti na pozici hadičky dif. tlakoměru na trubici
4. Porovnat naměřené údaje s informacemi od výrobce
  - Měřící rozsahy
  - Citlivost snímače
  - ...
5. Vyhodnotit nejistotu citlivosti vírového průtokoměru EGGS

# Teorie ke cloně

Rovnice rychlosti média při průchodou clonou

$$v = k \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}; \text{Pa}, \text{m}^{-3} \cdot \text{kg}]$$

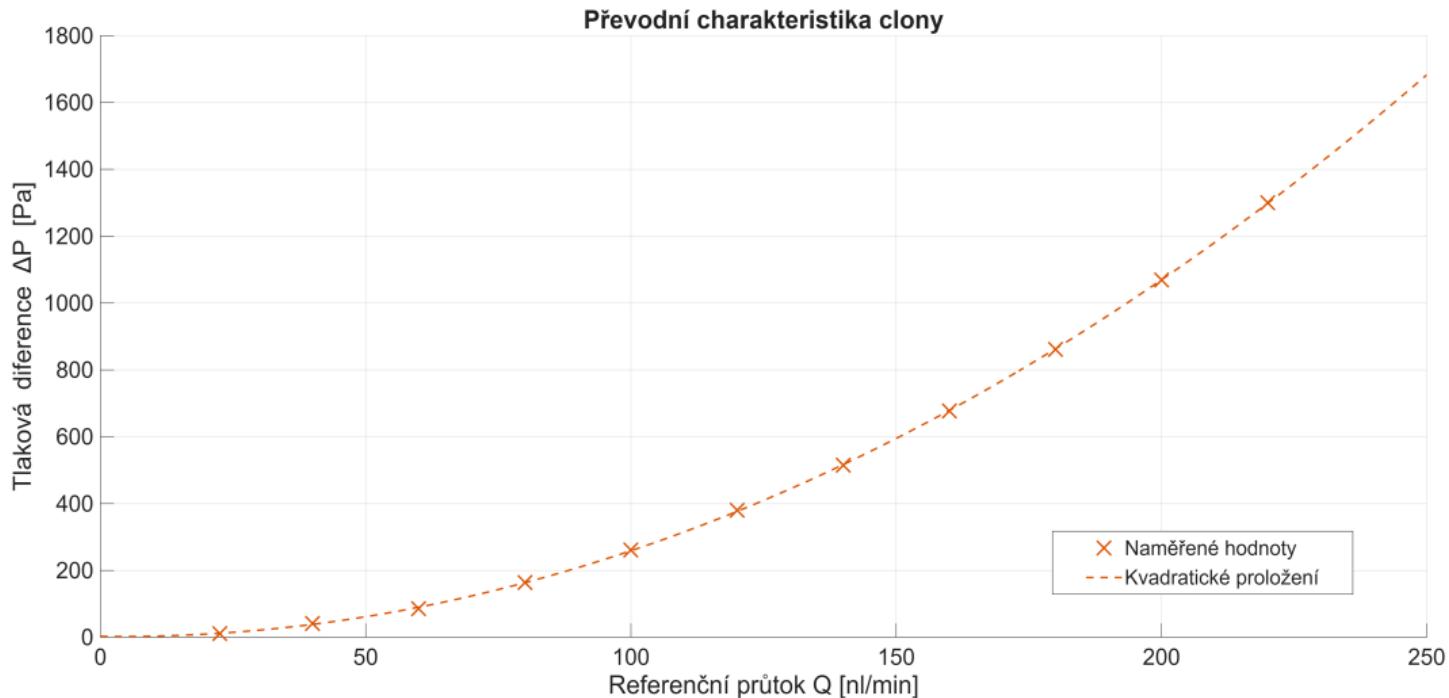
- Po úpravách rovnice lze získat vztah.

Rovnice tlakové ztráty

$$\Delta p = \frac{\rho}{2k^2} v^2 = \frac{\rho}{2A^2 k^2} Q^2 \quad [\text{Pa}; \text{m}^{-3} \cdot \text{kg}, \text{m}^2, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Předpokládaná charakteristika je tedy **kvadratická**.

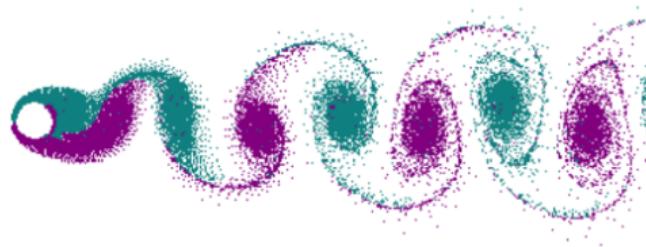
# Převodní charakteristika clony



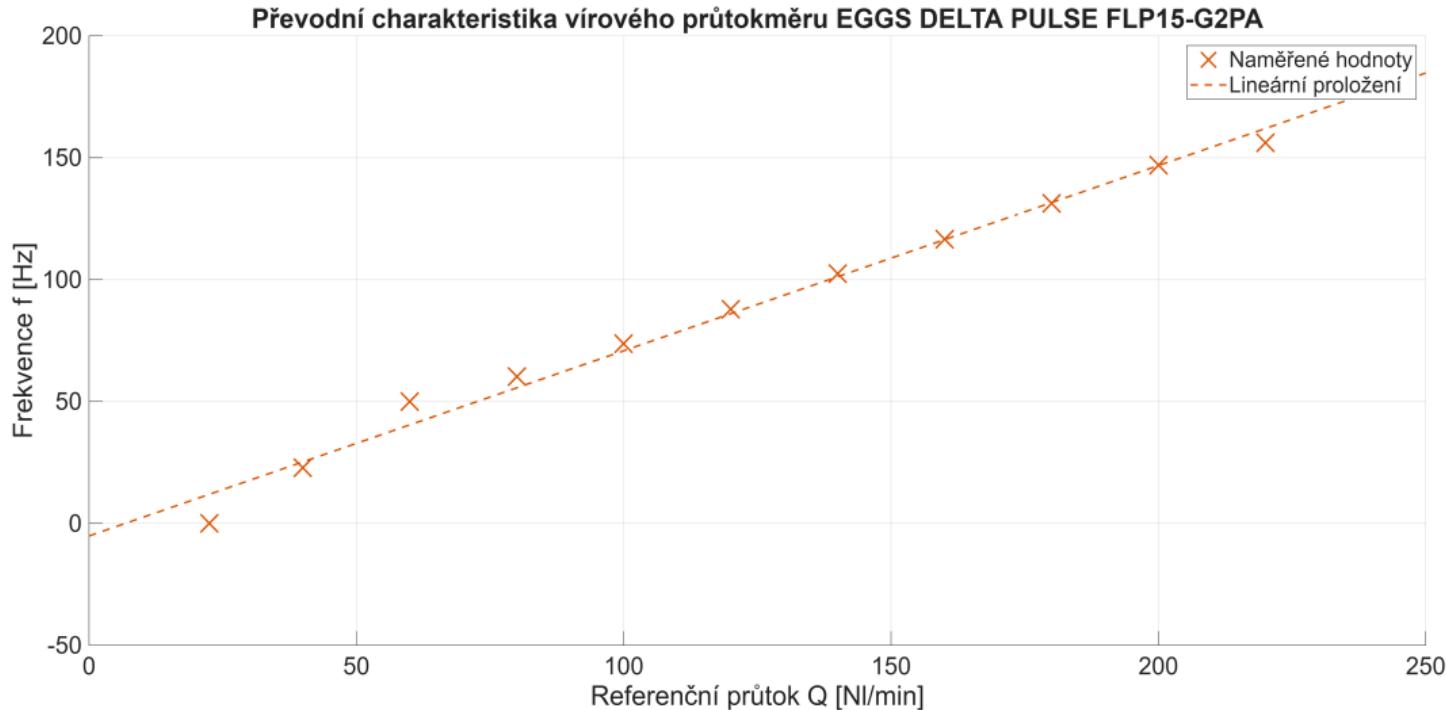
## Rovnice rychlosti média při průchodou clonou

$$f = Sr \frac{v}{a} \quad [\text{Hz; m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}]$$

- Rovnice je přímá úměra, tudíž lze předpokládat **lineární** převodní charakteristiku.



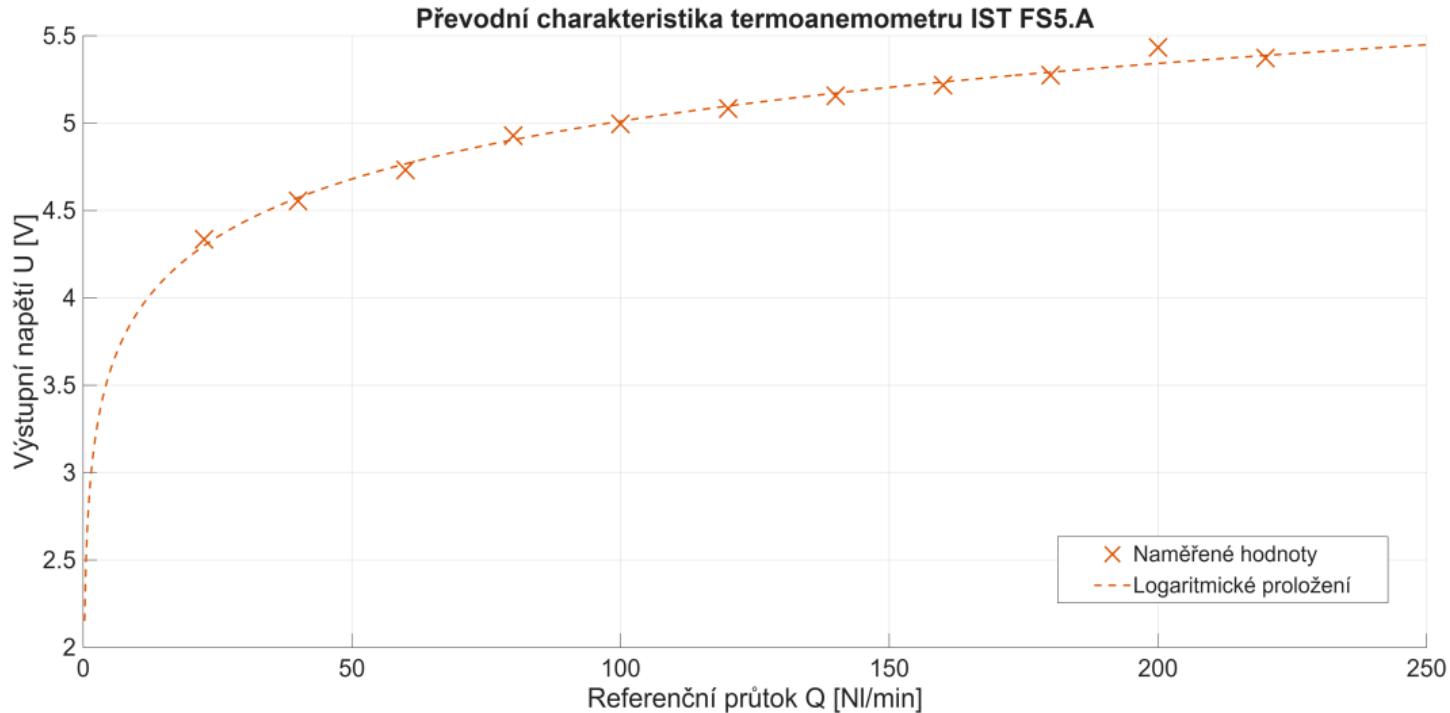
Obr. 1: Karmanovy víry



# Teorie k termoanemometru a kalorimetrickému průtokoměru



- Oba průtokoměry využívají tepelných jevů spojených s prouděním kapalin
- Termoanemometr se snaží udržet dva rozdílné odpory při stejné teplotě a kompenzační proud je snímán jako výstup snímače
- Kalorimetrický průtokoměr vytvoří tepelné symetrické tepelné rozložení, které je poté působením média deformováno, z čehož se dá určit jeho rychlosť





# Výsledné převodní charakteristiky

Clona

$$\Delta p = f(Q) = 0.02772 \cdot Q^2 - 0.2096 \cdot Q + 2.65$$

Vírový průtokoměr EGGS

$$f = f(Q) = 0.7597 \cdot Q - 5.154 \rightarrow K = \frac{df(Q)}{dQ} = 0.7597 \text{ Hz} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$$

Termoanemometr IST

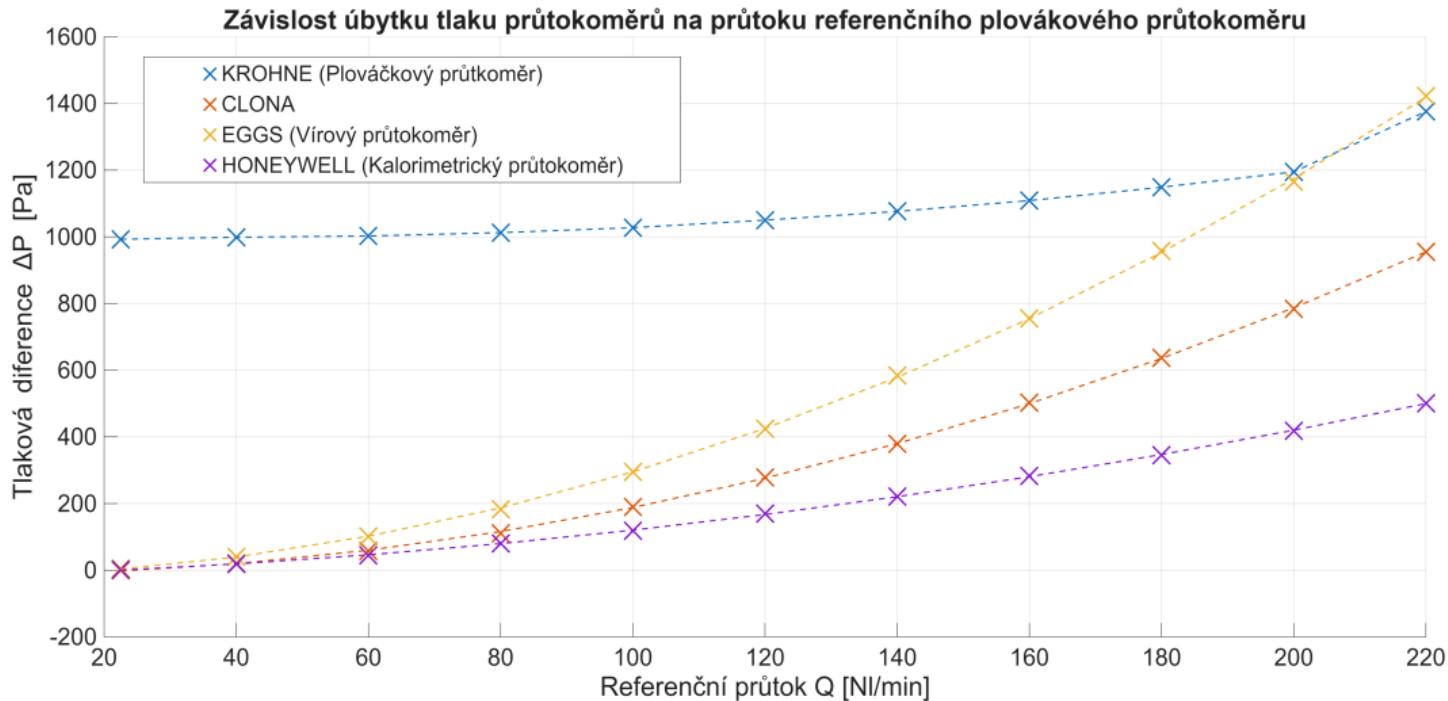
$$U = f(Q) = 0.4774 \cdot \ln(Q) + 2.813$$

Kalorimetrický průtokoměr Honeywell

$$U = f(Q) = 0.9564 \cdot \ln(Q) - 0.3625$$

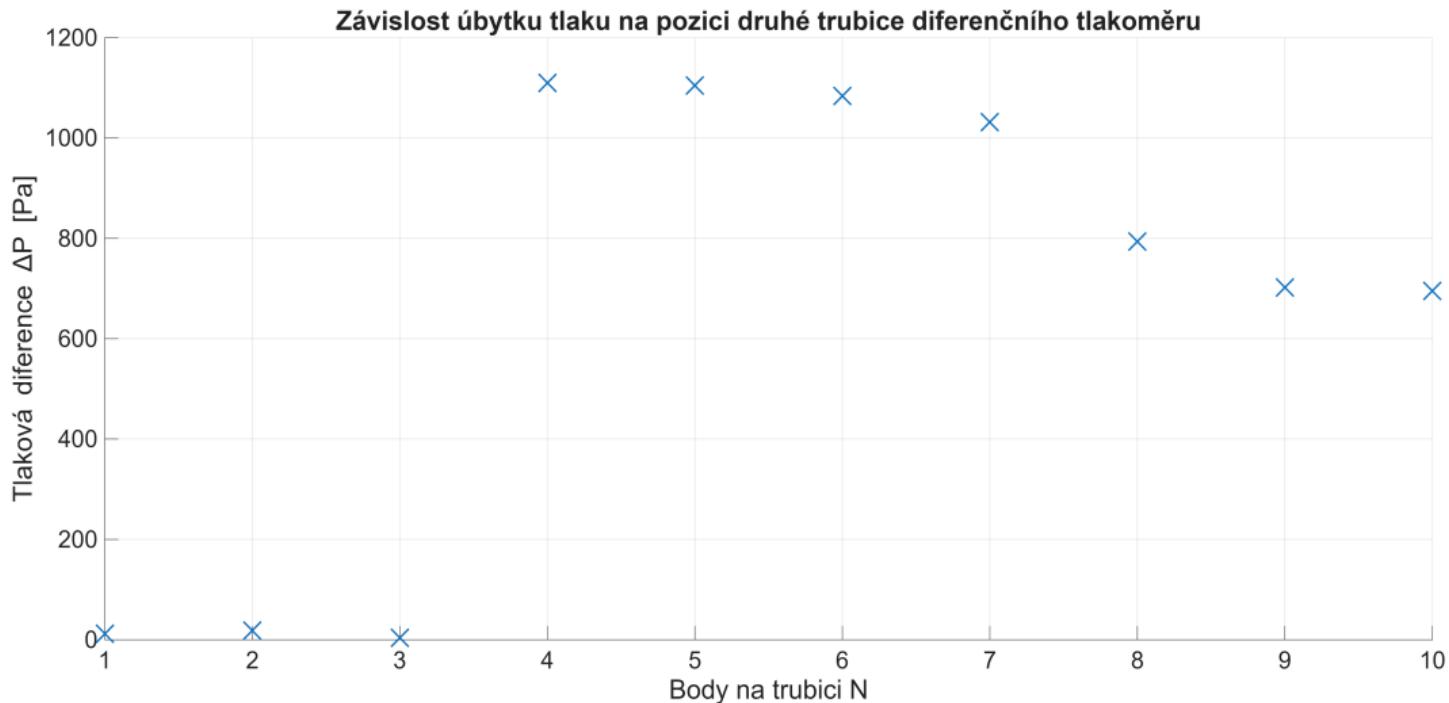
# Tlakové ztráty průtokoměrů

- Každý snímač v obvodu vytváří tlakovou diferenci, která je závislá na typu snímače.
- Cílem úkolu je experimentálně zjistit, jaké jsou rozsahy těchto differencí a jakou závislost mají na referenčním průtoku plováčkového průtokoměru KROHNE.



- Očekává se, že clona vytvoří tlakovou diferenci, nicméně je potřeba zjistit, jaké tlakové diference lze naměřit v její blízkosti.
- Předpokládaný průběh je téměř konstantní tlak před trubicí, prudký nárůst tlakové diference za ní a postupné klesání při vzdalování se od clony.

# Tlakové ztráty trubice



# Porovnání hodnot s výrobcem

## ■ GREISINGER GDH 200-07

- Přístroj má měřicí rozsah 0 - 1999 Pa (přibližně 0 až 19,99 mbar)
- Naměřené hodnoty nabývají 11 až 1300 Pa.
- Z toho lze usoudit, že měřicí rozsah přístroje je dostačující pro naše měření

## ■ EGGS DELTA PULSE FLP15-G2PA

$$LPM = NLPM \cdot \frac{T_{gas}}{273,15} \cdot \frac{14,696}{P_{gas}} = 22.5 \cdot \frac{297.35}{273.15} \cdot \frac{14.696}{14.427} = 25 \text{ l/min}$$

- Kalibrace námi používaného přístroje byla provedena pro údaje uvedené v datasheetu pro nominální velikost 15 mm
- Pro tuto nominální hodnotu bylo z datasheetu zjištěno, že rozsah měření je 55 - 283 l/min
- Z toho plyne proč při průtoku 22,5 NI/min (25 l/min) byla získaná nulová frekvence.
- Maximální dosažitelná hodnota je 200 Hz

# Porovnání hodnot s výrobcem

## ■ IST FS5.A

- Z datasheetu lze vyčíst, že výstupní napětí přístroje nabývá 2,7 - 6 V
- Naměřené hodnoty napětí se pohybují v rozmezí 4,335 - 5,433 V a leží tedy v měřicím rozsahu přístroje. V grafu v datasheetu je vidět, že s rostoucí rychlostí proudění má logaritmicky narůstat i výstupní napětí
- Toto chování je patrné i z naměřených hodnot, kde hodnoty napětí zpočátku rostou rychle a poté se růst zpomaluje

## ■ HONEYWELL AWM 720P1

$$SLPM = NLPM \cdot \frac{294.26}{273.15} = 220 \cdot 1.077 = 237 \text{ SLPM} \quad (1)$$

- Senzor má maximální průtok 200 SLPM. Měření proběhlo až na hodnotě 220 NLPM (237 SLPM).
- Hodnoty nad 200 SLPM nejsou zaručeně správné.
- Z charakteristiky v datasheetu lze usoudit, že výstupní napětí senzoru roste s rostoucím průtokem logaritmicky. Toto chování odpovídá naměřenému průběhu.

# Porovnání hodnot s výrobcem

- KROHNE VA-40
  - Naměřená ztráta tlaku se pohybuje od 1000 - 1400 Pa. Maximální tlaková ztráta udávaná výrobcem je 800 Pa, což neodpovídá naměřeným hodnotám.
- ROSEMOUNT 3051C
  - Přístroj má pracovní pásmo 4 - 20 mA (0 - 2 kPa), ve kterém leží naměřené hodnoty.

Tab. 1: Hodnoty změřených frekvencí snímače EGGS pro  $Q=100 \text{ NL}\cdot\text{s}^{-1}$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_1[\text{Hz}]$	74.91	74.84	75.05	74.99	74.88	74.92	74.76	74.82	74.88	74.87

Tab. 2: Hodnoty změřených frekvencí snímače EGGS pro  $Q=100 \text{ NL}\cdot\text{s}^{-1}$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_2[\text{Hz}]$	74.91	74.84	75.05	74.99	74.88	74.92	74.76	74.82	74.88	74.87

- Nejistota typu A - frekvence

$$u_A(f_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (f_{1i} - \bar{f}_1)^2}{10(10 - 1)}} = 0.026 \text{ Hz}; \quad u_A(f_2) = 0.05 \text{ Hz}$$

- Nejistota typu B - frekvence (rozsah 200 Hz, chyba 3%)

$$u_B(f_1) = \frac{\Delta f_{1max}}{\chi} = \frac{0.03 \cdot 200}{\sqrt{3}} = 3.464 \text{ Hz} = u_B(f_2)$$

- Nejistota typu C - frekvence

$$u_C(f_1) = \sqrt{u_A^2(f_1) + u_B^2(f_1)} = \sqrt{0.026^2 + 3.464^2} = 3.464 \text{ Hz}$$
$$u_C(f_2) = 3.464 \text{ Hz}$$

- Citlivost senzoru

$$\bar{K} = \frac{\bar{f}_2 - \bar{f}_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{109.8 - 74.89}{150 - 100} = 0.698 \frac{Hz}{NI/min}$$

- Nejistota citlivosti (nepřímé měření)

$$\begin{aligned} u_K &= \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{K}}{\partial f_1} \cdot u_C(f_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{K}}{\partial f_2} \cdot u_C(f_2)\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-1}{Q_2 - Q_1} \cdot u_C(f_1)\right)^2 + \left(\frac{1}{Q_2 - Q_1} \cdot u_C(f_2)\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-1}{150 - 100} \cdot 3.464\right)^2 + \left(\frac{1}{150 - 100} \cdot 3.464\right)^2} = 0.098 \frac{Hz}{NI/min} \end{aligned}$$

- Rozšířená nejistota

$$U_K = u_K \cdot k = 2 \cdot 0.098 = 0.196 \frac{\text{Hz}}{\text{NI/min}}$$

- Výsledek

$$K = (0.698 \pm 0.196) \frac{\text{Hz}}{\text{NI/min}} \rightarrow K = (0.700 \pm 0.200) \frac{\text{Hz}}{\text{NI/min}}$$

- Naměřené převodní charakteristiky mají lineární, kvadratický nebo logaritmický průběh
- Tlakový pokles senzorů bývá kvadraticky závislý na průtoku
- Tlakový pokles ostře stoupne za clonou a poté pomalu klesá
- U většiny přístrojů byly dodrženy měřící rozsahy
- Hodnota citlivosti s nejistotou vyšla  $K = (0.700 \pm 0.200) \frac{Hz}{NI/min}$  z důvodu zvolení blízkých bodů v charakteristice

Děkuji za pozornost!