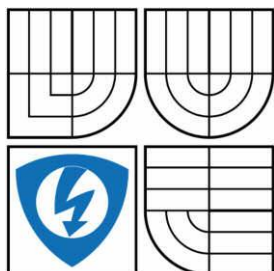


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# STANOVENÍ NEJISTOTY NEPŘÍMÉHO MĚŘENÍ KOEFIČIENTU VÍCEOTVOROVÉ RYCHLOSTNÍ SONDY

DETERMINATION UNCERTAINTIES OF INDIRECT MEASUREMENT COEFFICIENT  
MULTI-PORT AVERAGING PROBE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Maňák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Automatizační a měřicí technika**

**Student:** Jan Maňák

**ID:** 115225

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Stanovení nejistoty nepřímého měření koeficientu víceotvorové rychlostní sondy**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Nastudujte problematiku výpočtu nejistoty nepřímého měření. Dále proveďte literární rešerši v oblasti víceotvorových rychlostních sond, které slouží pro měření průtoku tekutin.
- 2) Proveďte měření na měřicí trati pro testování víceotvorových rychlostních sond pro stanovení nejistoty typu A, nejistoty typu B a rozšířené nejistoty pro měření objemového průtoku pomocí sondy a pomocí normalizované clony.
- 3) Navrhněte metodiku stanovení nejistot nepřímého měření koeficientu víceotvorové rychlostní sondy a tuto metodiku experimentálně ověřte pro dva typy víceotvorových rychlostních sond.
- 4) Dosažené výsledky zhodnoťte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NĚMEČEK, P.: Nejistoty měření. Česká společnost pro jakost, Praha, 2008, 98 stran, ISBN 978-80-02-02089-9.

[2] PALEŇČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: Nejistoty v měření I. až IV. (cyklus článků). Automa, 2001.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 28.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá problematikou nejistot měření, zejména pak měření nepřímých. Tato problematika je zde ukázána na stanovení nejistoty koeficientu víceotvorové rychlostní sondy Annubar 485 a upravené sondě MQS.

## **Klíčová slova**

Nejistota měření, citlivostní koeficient, víceotvorová rychlostní sonda, Annubar, MQS

## **Abstract**

The bachelors thesis is engaged with problem of measurement uncertainty especially for indirect measurement. This issue is shown here on determination uncertainties measurement of coefficient multiport averaging probe Annubar 485 and modified MQS probe.

## **Keywords**

Uncertainty of measurement, sensitivity coefficient, multiport probe, Annubar, MQS

### **Bibliografická citace:**

Maňák, J. *Stanovení nejistoty nepřímého měření koeficientu víceotvorové rychlostní sondy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 53s. Vedoucí bakalářské práce byla Ing. Soňa Šedivá Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Stanovení nejistoty nepřímého měření koeficientu víceotvorové rychlostní sondy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **24. května 2012**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **24. května 2012**

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Chyby měření .....	10
2.1	Nahodilé chyby.....	10
2.2	Systematické chyby .....	11
2.3	Hrubé chyby .....	11
3	Nejistoty měření .....	12
3.1	Zdroje nejistot.....	12
3.2	Nejistoty přímých měření .....	13
3.2.1	Nejistota typu A .....	13
3.2.2	Nejistota typu B.....	14
3.2.3	Kombinovaná nejistota.....	17
3.2.4	Rozšířená nejistota .....	17
3.3	Nejistoty nepřímých měření .....	17
3.3.1	Určení kovariance $u(x_i, y_j)$ metodou typu A .....	18
3.3.2	Určení kovariance $u(x_i, y_j)$ metodou typu B .....	19
4	Víceotvorové rychlostní sondy.....	21
4.1	Sonda Annubar 485 .....	22
4.2	Upravená sonda MQS.....	23
5	Měřicí trať .....	24
6	Měření a zpracování dat .....	25
6.1	Průběh měření.....	25
6.2	Průtok vzduchu v měřicí trati .....	26
6.3	Výpočet koeficientu sondy Annubar 485 podle katalogového listu .....	27
6.4	Výpočet koeficientu sondy Annubar 485 z naměřených hodnot .....	28
6.5	Výpočet nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pro frekvenci ventilátoru 25 Hz .....	29
6.5.1	Nejistoty typu A .....	29
6.5.2	Nejistota typu B pro použité přístroje .....	30
6.5.3	Celková nejistota teploty a diferenčních tlaků clony a sondy Annubar 485 .....	33
6.5.4	Celková nejistota koeficientu sondy Annubar 485.....	34
6.5.5	Rozšířená nejistota koeficientu sondy Annubar 485 .....	38
6.6	Výpočet koeficientu upravené sondy MQS .....	39
6.7	Výpočet nejistoty koeficientu upravené sondy MQS pro frekvenci ventilátoru 25 Hz .....	40

6.7.1	Nejistota typu A .....	40
6.7.2	Nejistota typu B pro použité přístroje .....	40
6.7.3	Celkové nejistoty jednotlivých veličin a koeficientu .....	41
6.7.4	Rozšířená nejistota .....	43
6.8	Rozšířená nejistota v celém frekvenčním rozsahu měniče .....	43
7	Závěr.....	46
8	Literatura .....	47

# 1 ÚVOD

V současné době, kdy je vyžadována stále větší a větší přesnost výroby, se v oblasti metrologie taktéž vyžaduje dokonalejší vyjádření výsledku měření. Dřívější teorie chyb měření již pro splnění dnešních požadavků nestačí, proto se začíná stále více uplatňovat teorie nejistot měření.

Tato bakalářská práce poskytne čtenáři základní informace o nejistotách měření a určení jejich velikosti při přímém i nepřímém měření. Ve čtvrté kapitole je uveden stručný popis principu měření průtoku vzduchu pomocí víceotvorových rychlostních sond a představeny sondy Annubar 485 a upravená sonda MQS, které jsou použity v praktické části bakalářské práce.

V praktické části práce je uveden postup měření probíhajícího za účelem experimentálního stanovení hodnot koeficientů obou sond. Následně je vypočtena nejistota stanovení těchto koeficientů a provedeno zhodnocení výsledků práce.

## 2 CHYBY MĚŘENÍ

Tato kapitola vychází ze zdrojů [1] a [6]. Na každé měření působí mnoho nejrůznějších vlivů, které odchylojí výsledek měření od skutečné hodnoty měřené veličiny. Tuto odchylku nemůžeme zcela odstranit, tudíž zjistit přesně skutečnou hodnotu měřené veličiny nelze. Můžeme se k ní však přiblížit tím, že se snažíme tuto odchylku od skutečné hodnoty minimalizovat. Z hlediska výsledku měření nás bude zajímat určitý interval hodnot, ve kterém se bude pohybovat naše hledaná skutečná hodnota měřené veličiny  $x_s$ .

Za hlavní původce chyb se považují chyby metody, přístroje a chyby pozorovatele.

- Chyby metody vznikají z přílišného zjednodušení vztahu pro výpočet nebo přímo ze zvolené měřicí metody.
- Chyby přístrojů vycházejí z nepřesností měřicích přístrojů vzniklých jejich nedokonalostí či opotřebením.
- Chyby pozorovatele jsou všechny chyby, kterými ovlivňuje měření pozorovatel. Jsou to např. špatné odečítání z měřicího přístroje či nepřesnosti při provádění experimentu.

Chyby měření se vyjadřují jako chyby absolutní a relativní. Absolutní chyba se vyjadřuje jako rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou podle vztahu (1).

$$\Delta_x = x_m - x_s \quad (1)$$

Relativní chybu získáme, když podělíme absolutní chybu skutečnou hodnotou podle vztahu (2).

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \quad (2)$$

Podle toho, jak chyby ovlivňují výsledek měření, se dělí na 3 tři typy:

- chyby nahodilé
- chyby systematické
- chyby hrubé

### 2.1 Nahodilé chyby

Náhodné chyby jsou čistě náhodné co se týče velikosti i znaménka. Působí zcela nahodile a nelze je žádným způsobem eliminovat. Jelikož nabývají kladných i záporných hodnot, mohou se při opakovaných měřeních vykompenzovat. Při jejich

určování se používají statistické metody příslušného pravděpodobnostního modelu. Nejčastěji se používá Gaussovo (normální) rozdělení. Odhadnutí skutečné hodnoty se provádí pomocí aritmetického průměru z hodnot získaných z  $n$  měření podle vztahu (3). Náhodná chyba se nejčastěji určuje jako směrodatná odchylka výběrového souboru  $s$  podle vztahu (4) nebo jako směrodatná odchylka aritmetického průměru  $s_{\bar{x}}$  podle vztahu (5).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{xi}^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

## 2.2 Systematické chyby

Tyto chyby jsou za stálých podmínek konstantní. Při opakovaných měřeních zatěžují výsledek vždy stejnou odchylkou, jak velikostně tak i znaménkově. Jejich velikost se určí lehce za použití vztahu (1). Kvůli kompenzaci nahodilých chyb se použije jako naměřená hodnota  $x_m$  aritmetický průměr z více naměřených hodnot viz vztah (3).

Systematické chyby mohou být aditivního i multiplikativního charakteru. Systematické chyby jsou většinou známé nebo snadno zjištělné. Jejich větší část jde vyloučit pomocí korelace nebo kompenzace.

## 2.3 Hrubé chyby

Jsou takové chyby, které svou velikostí znehodnotí výsledek měření. Měření zatížené takovouto chybou nemůžeme považovat za správné, proto hodnoty, které se výrazně odlišují od průměru vyloučíme ze souboru naměřených hodnot. Hrubým chybám se můžeme vyhnout dodržováním postupů a vlastní pozorností při měření.

## 3 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Tato kapitola vyhází ze zdrojů [2], [3], [4], [5]. Každé měření je, jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, zatíženo celou řadou nejrůznějších chyb. Ačkoliv se snažíme jich co nejvíce odhalit a nějakým způsobem vyloučit, nikdy nenalezneme všechny. Právě tyto nenalezené chyby jsou zdrojem nejistot v měření. Proto už nám při měření nestačí pouhá teorie chyb, ale byla zavedena teorie nejistot měření. Teorie nejistot měření se začala projednávat na zasedání Mezinárodního výboru pro váhy a míry (CIPM) v letech 1981 a 1985. V roce 1990 vyšel dokument Západoevropského kalibračního sdružení WECC č. 19, který udává obecný návod pro posuzování nejistot měření. V roce 1993 byla vydána Mezinárodní organizací pro normalizaci (ISO) směrnice pod názvem Guide to Expression of the Uncertainty of Measurement, kde jsou již definovány základní pojmy a vztahy teorie nejistot měření. U nás se nejistotami měření zabývají technické předpisy metrologické TPM řady 005x.

Používání nejistot měření je podporováno v normách např. ČSN EN ISO/IEC 17 025, ČSN EN ISO/IEC 10012, EAL – G23, EA 4/02. Tyto normy v některých oblastech přímo vyžadují používání nejistot. Jsou to oblasti vrcholové metrologie, obory bezpečnosti a ochrany zdraví při práci ovlivňující životní a pracovní prostředí nebo také v akreditovaných měřicích laboratořích. Více o předpisech týkajících se nejistot měření viz zdroj [10].

Obecně lze o nejistotě měření říct, že je to, tak jako u chyb měření, interval v okolí odhadnuté hodnoty zjišťované veličiny, ve kterém se s určitou pravděpodobností nachází její skutečná hodnota.

Výsledná kombinovaná nebo pak také rozšířená nejistota měření se skládá ze dvou složek.

- Standardní nejistota Typu A
- Standardní nejistota Typu B

### 3.1 Zdroje nejistot

Za zdroje nejistot lze považovat všechno, co je příčinou negativního ovlivnění výsledku měření. Pro určení zejména nejistoty typu B je třeba, abychom znali zdroje těchto nejistot ovlivňujících měření. Zdroje nejistot nejsou vždy stejné. Budou se lišit podle typu měření. Některé ovlivňují nejistotu typu A, některé nejistotu typu B a některé mohou ovlivňovat obě tyto nejistoty. Některé hlavní zdroje nejistot mohou pocházet z:

- **Měřicího přístroje** – způsobeny jsou nedokonalostí a stárnutím přístrojů, tyto chyby jsou uvedeny v dokumentaci přístroje
- **Prostředí** – projevuje se vliv teplot, tlaku, magnetického pole atd. na průběhu měření

- **Laboranta** – nepřesné odečítání hodnot, chybným prováděním měření, nesoustředění
- **Vyhodnocení výsledků** – použitím zjednodušených vztahů, linearizace, aproximace
- **Zvolené metody** – projevují se nedokonalostí zvolené metody, nevhodné výběry přístrojů (špatná rozlišovací schopnost atd.)
- **Měřené veličiny** – její případná nestabilita, její nedokonalá či neúplná definice

Pokud známe velikost a vliv konkrétní chyby, můžeme na výsledek měření aplikovat korekci a tím zpřesnit výsledek. Pro zjišťování zdrojů nejistot můžeme využít údajů od výrobce použitých měřicích přístrojů, zkušeností z předcházejících měření, jakožto i jejich výsledků a v neposlední řadě také dokonalou znalostí měřicí metody a měřené veličiny.

## 3.2 Nejistoty přímých měření

Přímé měření je takové měření, kde se z měřicího přístroje odečítá přímo hodnota hledané veličiny.

### 3.2.1 Nejistota typu A

Výpočet standardní nejistoty typu A je založen na statistickém zpracování naměřených hodnot. Podmínkou je, aby jednotlivá měření byla na sobě nezávislá a byla uskutečněna za stejných podmínek. K vyhodnocení této nejistoty se předpokládá, že uskutečníme alespoň 10 takovýchto měření. Pro výpočet nejistoty typu A se využívá vztahů uvedených pro výpočty nahodilých chyb z kapitole 2.1. Standardní nejistota typu A se rovná směrodatné odchylce aritmetického průměru naměřených hodnot viz. vztah (6).

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (6)$$

Při menším počtu měření ( $n < 10$ ) je nejistota vypočítaná podle vztahu (6) málo spolehlivá. V případě že známe průřezový rozptyl  $s_{pr}^2$ , charakterizující rozptyl hodnot lépe než směrodatná odchylka určená z menšího počtu hodnot, můžeme pro výpočet nejistoty použít vztah (7).

$$u_A(x) = \frac{s_{pr}}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

### 3.2.2 Nejistota typu B

Určování nejistoty typu B je založeno na jiných než statistických metodách. Pro správné určení této nejistoty musíme poznat všechny zdroje nejistot ovlivňujících měření viz kapitola 3.1. Při určování nejistoty typu B musíme určit standardní nejistoty všech zdrojů nejistot a pak s využitím zákona šíření nejistot vypočítat nejistotu  $u_B(x)$ .

#### 3.2.2.1 Zákon šíření nejistot

V této kapitole předpokládáme nekorelované vstupní veličiny. Výpočty s korelovanými vstupními veličinami budou popsány v kapitole 3.3.

Výstupní veličina je funkcí  $m$  veličin a dá se zapsat ve tvaru

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (8)$$

jestliže  $x_1 - x_m$  jsou odhady vstupních veličin  $X_1 - X_m$ , dá se odhad výstupní veličiny  $y$  napsat jako

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (9)$$

Nejistota typu B odhadu výstupní veličiny se určí podle vztahu (10). Předpokládá se zde, že odhady  $x_1 - x_m$  jsou nekorelované.

$$u_B(y) = \sqrt{\sum_{q=1}^m A_q^2 u_{Bq}^2(x)} \quad (10)$$

Kde:

$u_{Bq}(x)$  – nejistoty jednotlivých zdrojů

$A_q$  – koeficienty citlivosti vypočítané parciálními derivacemi ze vztahu (8)

$$A_q = \left. \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_q} \right|_{X_1=x_1, \dots, X_m=x_m} \quad (11)$$

#### 3.2.2.2 Nejistota digitálního měřicího přístroje

U vyhodnocení nejistoty tohoto přístroje se používá model rovnoměrného rozložení pravděpodobnosti v intervalu rozlišovací schopnosti daného přístroje  $\delta(z_j)$ . Pro nejistotu digitálního přístroje tedy platí

$$u_B(z_j) = \frac{\delta(z_j)}{2\sqrt{3}} \quad (12)$$

U přístrojů kde výrobce udává maximální chybu měření ve tvaru ( $\pm p\%$  z naměřené hodnoty  $\pm n$  digitů), kde  $n$  digitů je  $n$ -násobek rozlišovací schopnosti přístroje. Tak se nejistota určí podle vztahu (12) s tím rozdílem, že se za  $\delta(z_j)$  dosadí  $2 \cdot (p\%$  z naměřené hodnoty  $+n$  digitů) viz. vztah(13).

$$u_B(z_j) = \frac{p\% \text{ z nam. hod.} + n \text{ digitů}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

### 3.2.2.3 Nejistota analogového měřicího přístroje

U analogového měřicího přístroje je rozlišovací schopnost určena hlavně hodnotou dílku na stupnici. Nejistota pro tento přístroj se určí podle vztahu (12), kde  $\delta(z_j)$  bude zmíněná hodnota jednoho dílku na stupnici.

U analogových měřicích přístrojů se přesnost vyjadřuje pomocí třídy přesnosti TP. Je to maximální relativní chyba přístroje při plné výchylce ručičky přístroje. Nejistotu analogového přístroje můžeme vyjádřit podle vztahu

$$u_B(z_j) = \frac{(\text{rozsah přístroje}) \cdot \frac{TP}{100}}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

### 3.2.2.4 Stanovení nejistot při znalosti určitých parametrů

Známe-li z certifikátů, dokumentací nebo z jiných pramenů rozšířenou nejistotu  $U$  a koeficient jejího rozšíření  $k_r$ , můžeme standardní nejistotu  $u_B(z_j)$  pocházející ze zdroje  $Z_j$  určit ze vztahu

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k_r} \quad (15)$$

Pokud je nám známé rozpětí intervalu  $2U$  a pravděpodobnost se kterou se v něm nachází skutečná hodnota dané veličiny, můžeme standardní nejistotu  $u_B(z_j)$  pocházející ze zdroje  $Z_j$  určit podle vztahu

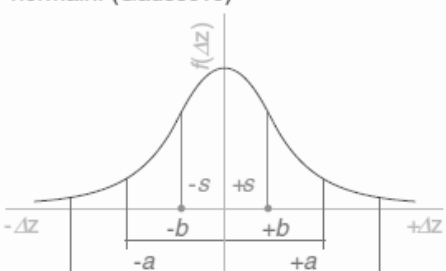
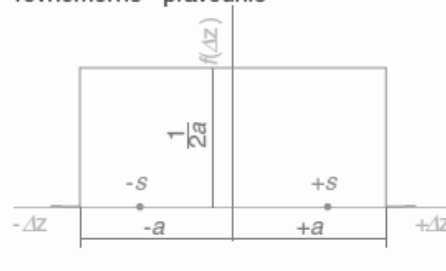
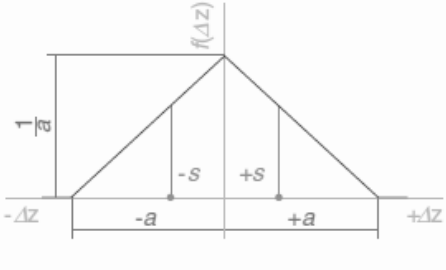
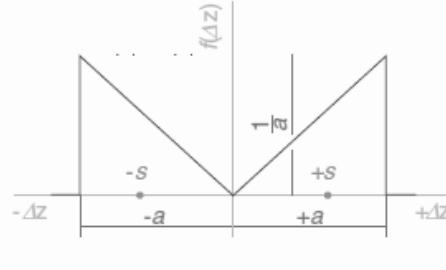
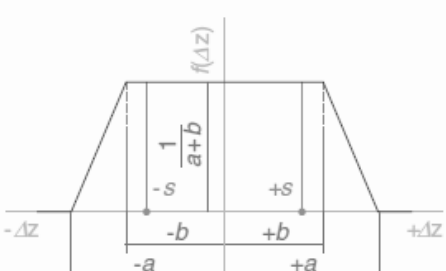
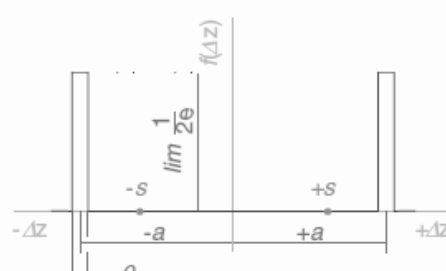
$$u_B(z_j) = \frac{U}{k_p} \quad (16)$$

kde  $k_p$  je koeficient rozšíření pro danou pravděpodobnost a rozdělení pravděpodobnosti. Pro normální rozdělení například ( $k_p = 1,96$  pro  $P = 95\%$ ,  $k_p = 2,58$  pro  $P = 99\%$ ,  $k_p = 3$  pro  $P = 99,7\%$ ).

Pokud není možné odhadnout interval, ve kterém se hodnoty měřené veličiny nacházejí vlivem působení daného zdroje na téměř 100%, odhadneme zdroje nejistot  $Z_1-Z_j$  a pokud známe maximální odchylku  $j$ -tého zdroje nejistoty  $z_{jmax}$ , určíme nejistotu  $u_B(z_j)$  podle vztahu

$$u_B(z_j) = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (17)$$

kde  $k$  je koeficient příslušný k aproximaci zvoleného rozdělení pravděpodobnosti.

Rozdělení	$Z_{max}$	$k$	Rozdělení	$Z_{max}$	$k$
<b>normální (Gaussovo)</b> 	$a$	3	<b>rovnoměrné - pravouhlé</b> 	$a$	$\frac{\sqrt{3}}{1,73}$
<b>trojúhelníkové (Simpsonovo)</b> 	$a$	$\frac{\sqrt{6}}{2,45}$	<b>bimodální (trojúhelníkové)</b> 	$a$	$\frac{\sqrt{2}}{1,41}$
<b>lichoběžníkové</b> 	$a$	2,32 při $b = \frac{a}{3}$	<b>bimodální (Diracovo)</b> 	$a$	1
	$a$	2,19 při $b = \frac{a}{2}$			
	$a$	2,04 při $b = \frac{2a}{3}$			

Obrázek 1: Typy rozdělení pravděpodobnosti

### 3.2.3 Kombinovaná nejistota

Ve většině případů potřebujeme společně vyjádřit efekt obou typů nejistot. Výslednou kombinovanou nejistotu  $u_c$  vypočítáme jako odmocninu ze součtu čtverců obou předchozích typů nejistot A a B. Pro její velikost tedy platí

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (18)$$

### 3.2.4 Rozšířená nejistota

Kombinovaná nejistota nám udává interval hodnot ve kterém se skutečná hodnota dané veličiny nachází asi se 68% pravděpodobností. Snahou rozšířené nejistoty je rozšířit tento interval hodnot, abychom dosáhli větší pravděpodobnosti výskytu skutečné hodnoty v tomto intervalu. Rozšířenou nejistotu  $U$  spočítáme podle vztahu

$$U = k_r \cdot u_c \quad (19)$$

kde  $k_r$  je koeficient rozšíření, který závisí na typu rozdělení pravděpodobnosti a na požadované pravděpodobnosti výskytu skutečné hodnoty dané veličiny v intervalu hodnot daném rozšířenou nejistotou. Nejčastějším případem je 95% pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty veličiny v intervalu  $y \pm U$  u normálního rozdělení pravděpodobnosti. V takovémto případě je hodnota  $k_r = 2$ . V případě požadované 99% pravděpodobnosti u normálního rozdělení bude  $k_r = 3$ .

## 3.3 Nejistoty nepřímých měření

Nepřímým měřením se myslí takové měření, kdy je námi hledaná hodnota funkcí vstupních hodnot, které odečítáme přímo z měřicích přístrojů. Vypočtením vztahu po dosazení naměřených hodnot získáme námi hledanou veličinu, ale s chybou, na které se podílí všechny námi měřené hodnoty vstupující do funkce.

Výstupní veličina je funkcí  $m$  vstupních veličin a dá se napsat jako

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (20)$$

Odhad výstupní veličiny  $y$  můžeme napsat jako

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (21)$$

kde  $x_1 - x_m$  jsou odhady vstupních veličin  $X_1 - X_m$  odečítané přímo z měřicích přístrojů.

Předpokládejme že vstupní veličiny  $X_1 - X_m$  jsou korelované, jsou tedy na sobě závislé. Ve výpočtu nejistoty výstupní veličiny musíme tyto vztahy zohlednit, protože tvoří další složku nejistoty. Pro výpočet takovéto nejistoty platí vztah

$$u_B(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j<i}^{m-1} A_i A_j u(x_i, x_j)} \quad (22)$$

Koeficienty citlivosti se vypočítají jako parciální derivace vstupní funkce podle vztahu

$$A_i = \left. \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1, \dots, X_m=x_m} \quad (23)$$

$u(x_i, y_j)$  ve vztahu (19) je kovariance mezi dvěma odhady vstupních hodnot, mezi nimiž existuje korelační vazba. Kovariance mezi odhady dvou náhodných veličin určují, jak jsou tyto odhady ovlivněny společnými zdroji nejistot. Zdroje nejistot mohou na dva odhady vstupních veličin působit buď souhlasně nebo protichůdně, podle toho mohou také kovariance výslednou nejistotu zvětšit nebo také zmenšit. Kovariance  $u(x_i, y_j)$  můžeme určit podobně jako standardní nejistotu dvěma způsoby:

- Metodou typu A
- Metodou typu B

### 3.3.1 Určení kovariance $u(x_i, y_j)$ metodou typu A

Obdobně jako u stanovení standardní nejistoty typu A se tato metoda k určení kovariance používá tehdy, pokud máme k dispozici  $n$  naměřených hodnot obou vstupních veličin  $X_i$  a  $X_j$ . Odhady těchto veličin  $x_i$  a  $x_j$  budeme považovat jako aritmetické průměry  $\bar{x}_i$  a  $\bar{x}_j$ . Kovariance se potom vypočítá podle vztahu (24).

$$u_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j) \quad (24)$$

### 3.3.2 Určení kovariance $u(x_i, y_j)$ metodou typu B

Určení kovariance  $u_B(x_i, y_j)$  metodou typu B se provádí odlišnými metodami než statistickými. Tuto kovarianci můžeme vyčíst v literatuře, certifikátech apod. Nebo ji můžeme určit výpočtem.

Po vytipování zdrojů korelací se určování kovariance výpočtem liší podle typu dané úlohy a množství známých informací o jednotlivých veličinách.

#### 3.3.2.1 Určení kovariance pomocí odhadu korelačního koeficientu

Pro výpočet kovariance se použije vzorec:

$$u_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j)u_B(x_i)u_B(x_j) \quad (25)$$

Kde  $r(x_i, x_j)$  je korelační koeficient, který vyjadřuje závislost mezi odhady vstupních veličin. Pohybuje se v intervalu od -1 po 1. Kolem 0 jde o slabou závislost, kolem hodnot  $\pm 1$  jde o silnou závislost. Tento korelační koeficient musíme odhadnout na základě pozorování a zkušeností.

#### 3.3.2.2 Vstupní veličiny jsou funkcemi nezávislých veličin

Jestliže jsou dvě vstupní veličiny  $X_1, X_2$  funkcemi nezávislých veličin  $Z_1 - Z_m$  můžeme je vyjádřit vztahy (26).

$$X_1 = g_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_m) \quad (26)$$

$$X_2 = g_2(Z_1, Z_2, \dots, Z_m)$$

Výsledná kovariance  $u_B(x_1, x_2)$ , kde  $x_i$  a  $y_j$  jsou odhady vstupního hodnot, se určí podle vztahu (27).

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_i) \quad (27)$$

Kde  $A_{1i}, A_{2i}$  jsou koeficienty citlivosti funkcí  $g_1$  a  $g_2$ . Pro jejich výpočet využijeme vztah (23).

#### 3.3.2.3 Vstupní veličiny jsou funkcemi závislých veličin

Jestliže jsou dvě vstupní veličiny  $X_1, X_2$  funkcemi závislých veličin  $Z_1 - Z_m$  můžeme je opět vyjádřit vztahy (26). V tomto případě se kovariance určí podle vzorce (28).

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m A_{1i} A_{2j} u_B(z_i, z_j) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m A_{1i} A_{2j} u_B(z_i, z_j) \quad (28)$$

V tomto případě se předpokládá znalost  $u_B(z_i, z_j)$ , což je kovariance mezi odhady  $z_i$  a  $z_j$ .

### 3.3.2.4 Určení maximální hodnoty nejistoty

Pokud nemůžeme použít ani jeden ze tří výše zmíněných postupů pro určení kovariance, určíme maximální vliv korelace na výslednou nejistotu. Určíme tedy horní hranici nejistoty odhadu měřené veličiny. Předpokládejme že vstupní veličiny  $X_1$  a  $X_2$  jsou korelované a ostatní vstupní veličiny nejsou korelované. Pak pro nejistotu odhadu  $y$  platí vztah (29).

$$\begin{aligned} u_B^2(y) &\leq \left[ |A_1 u_B(x_1)| + |A_2 u_B(x_2)| \right]^2 + \sum_{i=3}^m A_i^2 u_B^2(x_i) = \\ &= A_1^2 u_B^2(x_1) + A_2^2 u_B^2(x_2) + 2|A_1 A_2| u_B(x_1) u_B(x_2) + \sum_{i=3}^m A_i^2 u_B^2(x_i) = \quad (29) \\ &= \sum_{i=1}^m A_i^2 u_B^2(x_i) + 2|A_1 A_2| u_B(x_1) u_B(x_2) \end{aligned}$$

Pokud tedy nemáme dostatek informací pro určení kovariance, můžeme uvádět horní hranici nejistoty.

## 4 VÍCEOTVOROVÉ RYCHLOSTNÍ SONDY

Tato kapitola vychází ze zdrojů [8] a [11]. Víceotvorové rychlostní sondy vycházejí z Pitotovy trubice. Pitotova trubice je trubice zahnutá v pravém úhlu s rovinou ústí. Ústí trubice je nastaveno proti směru proudění. Snímá se celkový tlak  $p_c$  a statický tlak  $p_s$ . Ze znalosti hustoty kapaliny můžeme určit rychlost proudění kapaliny.

Víceotvorová sonda je trubka umístěná do potrubí, kolmo na směr proudění. Na náplavové straně má více otvorů, kterými se měří střední hodnota celkového tlaku. Na straně úplavu je otvor, kterým se snímá tlak v úplavu.

Princip výpočtu rychlosti proudění vychází z Bernoulliho rovnice zachování energie. Součet energie tlaku, potenciální energie a kinetické energie je v uzavřeném potrubí konstantní. V podstatě jde

o to, že vložení překážky do potrubí (sonda) se v tom místě zmenší průřezová plocha, sníží se tlak a zvýší se rychlost proudění. Při znalosti rozdílu tohoto diferenčního tlaku a koeficientu sondy můžeme vypočítat rychlost proudění podle vzorce (30).

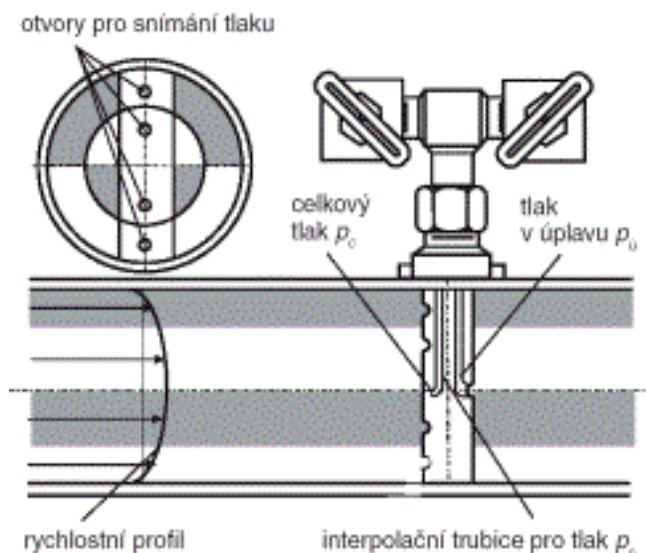
$$\bar{v} = k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (30)$$

Kde  $\Delta p$  je diferenční tlak [Pa],  $k$  je koeficient sondy [-] a  $\rho$  je hustota tekutiny [ $\text{kg/m}^3$ ].

Objemový průtok se vypočte podle vztahu (31).

$$Q_v = S \cdot \bar{v} = S \cdot k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (31)$$

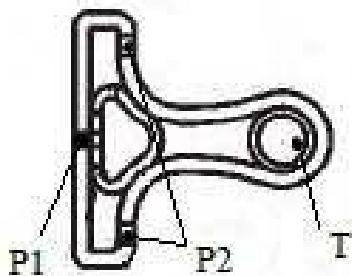
Kde  $S$  je průřez potrubí [ $\text{m}^2$ ].



Obrázek 2: Víceotvorová rychlostní sonda v potrubí

## 4.1 Sonda Annubar 485

Víceotvorovou rychlostní sondu Annubar 485 vyrábí firma Rosemount. Je vyrobena z nerezové oceli. Má specifický průřez ve tvaru T. Náplavový tlak se neodebírá v bodech, ale ve dvou podlouhlých obdélníkových průřezech na náplavové straně, umístěných uprostřed sondy nad sebou. Na obrázku 4 je to otvor P1. Tlak v úplavu se snímá z otvorů po obou stranách, jak je vidět na obrázku (3), jsou označeny jako otvory P2. Sonda má v sobě zabudovanou teploměrnou jímku pro snímač teploty Pt100. Na obrázku 4 označena jako T. Na výstupu sondy je diferenční tlak  $\Delta p$ .



Obrázek 4: Průřez sondy Annubar 485



Obrázek 3: Sonda Annubar 485

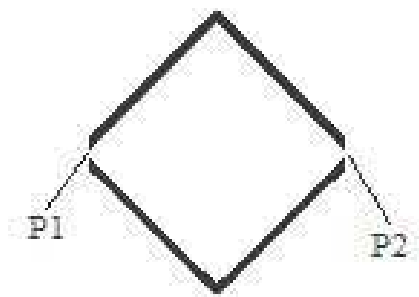
Výhody sondy:

- Tlakové ztráty jsou daleko menší než u jiných typů průřezových průtokoměrů.
- Konstrukce s teploměrnou jímku umožňuje měřit hmotnostní průtok pouze přes jeden otvor v potrubí.
- Snadná montáž – do potrubí stačí navrtat otvor, kam se zasune sonda. Potrubí se ani při montáži nemusí odstavovat z provozu.
- Minimální nároky na údržbu – konstrukce sondy napomáhá tomu aby většina nečistot sondu obeplula, takže nedochází k jejímu zanášení.
- Vychýlení do 7° vyvolá změnu diferenčního tlaku pouze v rozmezí 1%
- Malé provozní náklady.

Hlavní nevýhodou sondy Annubar a i všech snímačů založených na snímání diferenčního tlaku je, že jsou použitelné pouze v plně zaplněném potrubí.

## 4.2 Upravená sonda MQS

Tato sonda je od firmy Vavra s.r.o. Je určena pro potrubí DN100. Na ústavu automatizace VUT jí byl postupně upraven průřez. V současné době má sonda kosočtvercový průřez se zkosenými hranami na náplavové i úplavové straně. Sonda je identická z obou stran. Má na každé straně 4 otvory, je tudíž jedno (na rozdíl od sondy Annubar 485) kterou stranou je natočena proti proudění. Otvory P1 a P2 na obrázku 6 se snímá tlak na náplavové nebo úplavové straně. Na výstupu sondy je opět diferenční tlak  $\Delta p$ .



**Obrázek 6: Průřez upravené sondy  
MQS**



**Obrázek 5: Upravená sonda  
MQS**

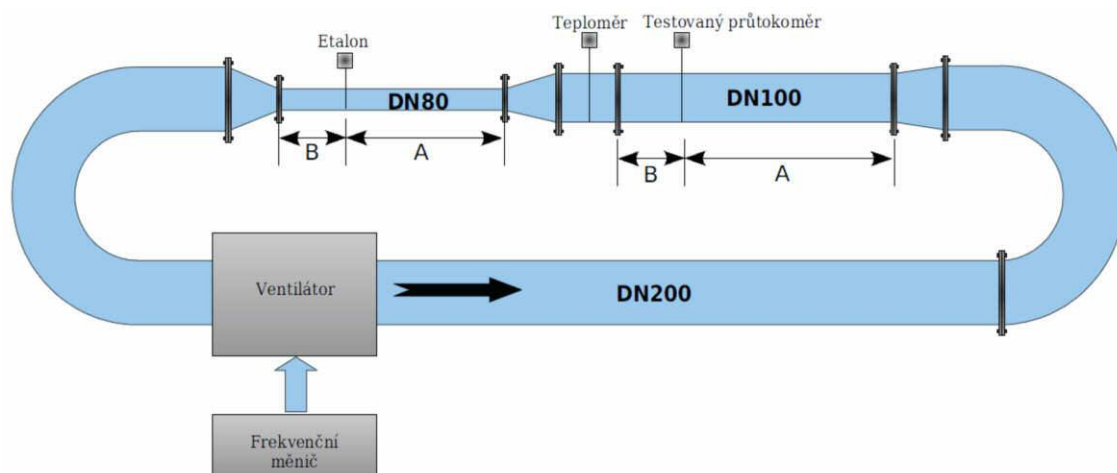
Tato upravená sonda vykazuje podobné vlastnosti jako sonda Annubar 485 popsaná v kapitole 4.1. Jejich výhody a nevýhody jsou tudíž stejné.

## 5 MĚŘICÍ TRATĚ

Měření se provádělo na měřicí trati na ústavu AMT. Její schéma je na obrázku 5-1. Trať je stavěna na testování víceotvorových rychlostních sond pro průměr potrubí 100mm. Uspořádání měřicí trati umožňuje ověřovat vliv délky uklidňovacího potrubí na vlastnosti sondy. Dále je možné sledovat také vliv pootočení sondy vzhledem ke směru proudění vzduchu, velikost trvalé tlakové ztráty a porovnávat vlastnosti průtokoměru s vlastnostmi etalonu.

Trať je tvořena ocelovým potrubím o průměru 200mm. V měřicí části je průměr 100mm v části testovaného průtokoměru a průměru 80mm v části se zabudovaným etalonem. Jako etalon slouží normalizovaná clona DN80. Pro měření teploty proudícího vzduchu je v trati zabudován teploměr Pt100. V potrubí není možné snímat tlak proudícího vzduchu, ale bylo ověřeno, že tlak vzduchu v potrubí se příliš neliší od okolního tlaku, tudíž pro výpočty můžeme používat hodnotu atmosférického tlaku.

Jako zdroj proudění vzduchu slouží středotlaký ventilátor RSH PK 123227. Rychlost proudění vzduchu je nastavována pomocí frekvenčního měniče. Je možné nastavovat rychlost proudícího vzduchu v rozsahu 0-20 m.s<sup>-1</sup>. Podrobnější popis trati je uveden ve zdroji [7]



Obrázek 7: Měřicí trať

## 6 MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

Měření bylo prováděno na měřicí trati, jejíž popis je uveden v kapitole 5. Trať je umístěna na ústavu AMT Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.

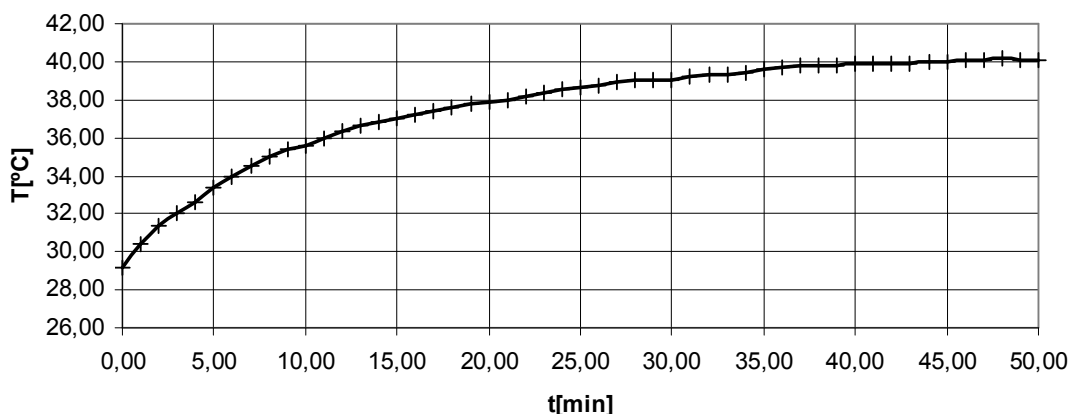
Použité přístroje:

- 2 x Multimeter METEX M-3890D v.č.: CI856820 a CI856854
- Multimeter Hung Chang M-3640D
- Stabilizovaný zdroj 881918 – AUL310
- Zdroj 755732062
- 2 x tlakoměr Rosemount 3051 v.č.: 7079598/1297 a v.č.7059597/1297
- Teploměr 9607 PT100
- Frekvenční měnič COMMANDER SE 23400400

### 6.1 Průběh měření

Rychlým prouděním vzduchu potrubím vzniká teplo, které postupně zahřívá jak samotné potrubí, tak i snímače uvnitř a vzduch v něm. Abychom měřili s co nejmenší chybou, musíme počkat na ustálení teploty v trati. Zahřívání měřicí trati jsem prováděl při plném výkonu ventilátoru.

**Průběh ustálení teploty v měřicí trati**



**Obrázek 8: Průběh teploty při zahřívání trati**

Teplota se ustálila na teplotě cca. 40 °C po 40 minutách od spuštění ventilátoru.

Po zahřátí trati jsem snížil frekvenci ventilátoru na 25 Hz a provedl 15 měření diferenčních tlaků normalizované clony, sondy Annubar 485. Při každém měření jsem zaznamenával i teplotu, která se při snížení výkonu ventilátoru snížila a lehce měnila v průběhu celého měření.

Provedl jsem také měření diferenčních tlaků a teploty od minimálního po maximální výkon ventilátoru. Stejně měření jsem provedl ještě s upravenou sondou MQS.

Vyhodnocení výsledků měření je uvedeno v následujících kapitolách

## 6.2 Průtok vzduchu v měřicí trati

Jako etalon pro určení objemového množství vzduchu protékajícího potrubím měřicí trati slouží normalizovaná clona DN80. Objemové množství protékajícího vzduchu  $Q_v$  se určí podle vztahu (32)

$$Q_v = \frac{1}{\rho} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (32)$$

Kde:

$\rho$  – hustota vzduchu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\Delta p$  – diferenční tlak na výstupu clony [Pa]

$C$  – součinitel průtoku [-]

$\varepsilon$  – součinitel expanze [-]

$\beta$  – poměr průměru clony ku průměru potrubí  $\beta = \frac{d}{D}$  [-]

$d$  – průměr otvoru clony [mm]

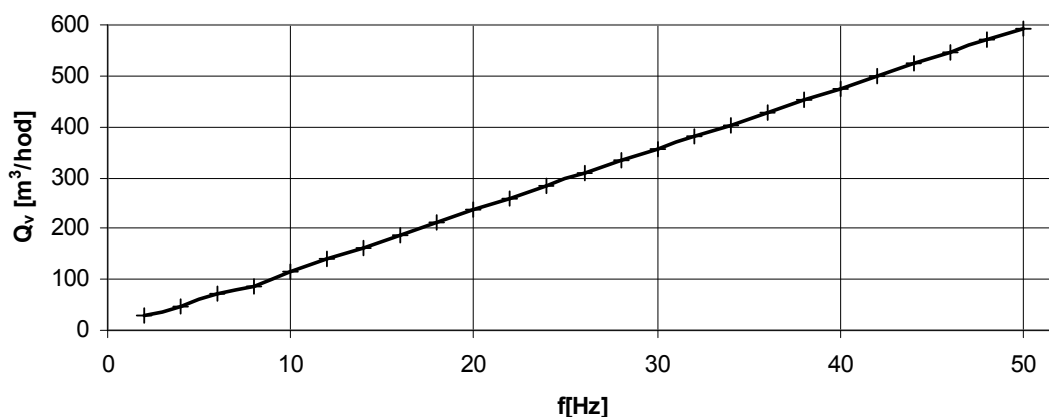
Hodnoty konstant jsou uvedeny v příloze 5.

Hustota vzduchu se mění spolu s teplotou. Jelikož teplota v průběhu měření nebyla konstantní musíme do vzorce pro výpočet objemového průtoku dosadit aktuální hustotu vzduchu. Vypočítáme ji podle vztahu (33).

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (33)$$

Kde  $p$  je atmosférický tlak vzduchu [Pa],  $R$  je plynová konstanta vzduchu [J/kg.K] a  $T$  je teplota [K]. V našem případě je  $p=102\text{kPa}$  a  $R=287,13 \text{ J/kg.K}$

### Závislost průtoku na frekvenci měniče



Obrázek 9: Průtok vzduchu v měřicí trati

Při frekvenci měniče 25Hz je objemový průtok  $Q_v=295,99 \text{ m}^3/\text{hod}$ .

Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v příloze 2.

## 6.3 Výpočet koeficientu sondy Annubar 485 podle katalogového listu

Výpočet je proveden podle vztahů uvedených v katalogovém listu sondy Annubar 485 [9]. V měřicí trati je umístěn senzor velikosti 1, tomu odpovídají hodnoty experimentálně zjištěných konstant  $C_1 = -1,515$  a  $C_2 = 1,4229$ . Pro výpočet koeficientu je použit vztah (34).

$$k = \frac{(1 - C_2 B)}{\sqrt{1 - C_1 (1 - C_2 B)^2}} \quad [-] \quad (34)$$

Kde  $B$  je koeficient bloku [-], vycházející z poměru plochy průřezu potrubí a plochy sondy v potrubí. Vypočítá se podle vztahu (35).

$$B = \frac{a}{A} = \frac{4d}{\pi D} \quad [-] \quad (35)$$

Kde  $d$  je šířka sondy [mm] v potrubí a  $D$  je vnitřní průměr potrubí [mm]. V našem případě je  $d=14,986 \text{ mm}$  a  $D=100\text{mm}$ . Dosazením konstant do vzorců dostaneme:

$$B = \frac{a}{A} = \frac{4d}{\pi D} = \frac{4 \cdot 14,986}{\pi \cdot 100} = 0,1908 \quad (36)$$

$$k = \frac{(1 - C_2 B)}{\sqrt{1 - C_1 (1 - C_2 B)^2}} = \frac{(1 - 1,4229 \cdot 0,1908)}{\sqrt{1 + 1,515 \cdot (1 - 1,4229 \cdot 0,1908)^2}} = 0,5424 \quad (37)$$

## 6.4 Výpočet koeficientu sondy Annubar 485 z naměřených hodnot

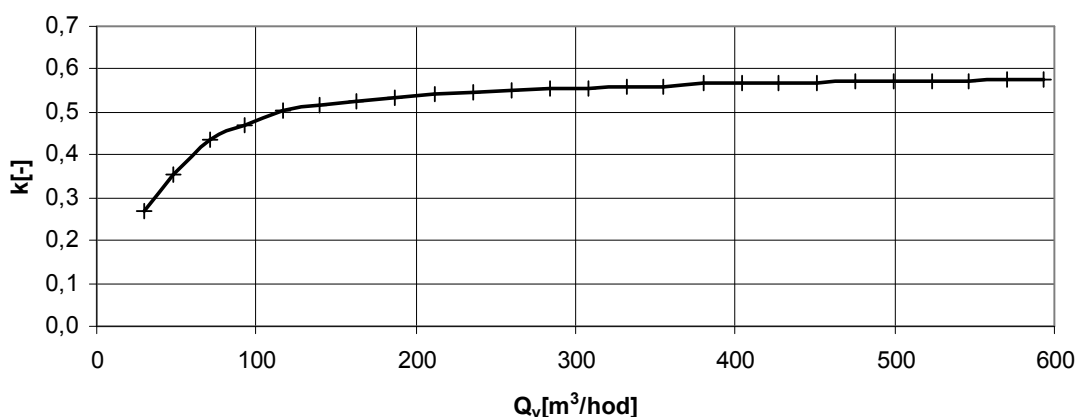
Při výpočtu koeficientu sondy Annubar 485 se používá objemový průtok vypočítaný z výstupu normalizované clony DN80. Jeho výpočet je uveden v kapitole 6.2. Vzorec pro výpočet koeficientu se odvodí z rovnice objemového průtoku (36).

$$Q_{vc} = S \cdot k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_s}{\rho}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (38)$$

Kde  $S$  je průřez potrubí [ $\text{m}^2$ ],  $\Delta p$  je diferenční tlak na výstupu sondy [Pa] a  $\rho$  hustota vzduchu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. Sonda je umístěna v úseku potrubí o průměru 100mm takže  $S = 7,854 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ . Výsledný vzorec pro výpočet koeficientu je ve tvaru:

$$k = \sqrt{\frac{Q_{vc}^2 \rho}{2S^2 \Delta p_s}} \quad [-] \quad (39)$$

Hodnota koeficientu  $k$  v závislosti na objemovém průtoku



Obrázek 10: Koeficient sondy Annubar 485

Výpočet koeficientu je silně závislý na objemovém průtoku měřeném normalizovanou clonou. Instalovaná clona má daný maximální a minimální provozní průtok 80-450 m<sup>3</sup>/hod. Z hodnot v tomto rozmezí určím hodnotu koeficientu sondy Annubar 485 jako průměr z vypočítaných hodnot koeficientu.

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n} = 0,5431 \quad (40)$$

Při měření no frekvenci měniče 25Hz je průměrná hodnota koeficientu sondy Anubar 485:

$$\bar{k} = 0,5569$$

## 6.5 Výpočet nejistoty koeficientu sondy Annubar 485 pro frekvenci ventilátoru 25 Hz

Nejistota koeficientu sondy se skládá z několika složek.

- Nejistota typu A – určí se statistickým zpracováním výsledků měření
- Nejistota typu B – tvoří je přístroje použité při měření
- Celková nejistota – určí se kombinací nejistot typu A a B
- Rozšířená nejistota – zvětšuje interval hodnot kde může ležet skutečná hodnota koeficientu

### 6.5.1 Nejistoty typu A

Pro výpočet nejistoty typu A potřebujeme alespoň 10 hodnot. Použijeme 15 hodnot naměřených při frekvenci měniče 25Hz. Nejistoty typu A budeme stanovovat pro diferenční tlak clony  $\Delta p_c$ , diferenční tlak sondy  $\Delta p_s$  a teplotu  $\Delta T$ . Standardní nejistoty typu A se určí podle vztahu (6).

Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro sondu Annubar 485 při frekvenci 25Hz

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$I_c$ [mA]	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,82	7,86	7,86	7,88	7,88	7,86	7,84	7,86	7,88
$I_s$ [mA]	8,04	8,08	8,04	8,06	8,08	8,06	8,08	8,10	8,08	8,10	8,08	8,06	8,08	8,06	8,10
$I_t$ [mA]	7,88	7,83	7,83	7,79	7,76	7,73	7,73	7,70	7,71	7,68	7,70	7,69	7,68	7,67	7,65

**Standardní nejistota typu A diferenčního tlaku  $\Delta p$  clony:**

Průměrná hodnota diferenčního tlaku clony  $\Delta p_c \bar{p}$  868,5 Pa

$$u_A(\Delta p_c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_{ci} - \Delta \bar{p}_c)^2}{n(n-1)}} = 8,78 \cdot 10^{-4} \text{ kPa} = 0,878 \text{ Pa} \quad (41)$$

**Standardní nejistota typu A diferenčního tlaku  $\Delta p$  sondy:**

Průměrná hodnota diferenčního tlaku sondy  $\Delta p_s \bar{p}$  203,67 Pa

$$u_A(\Delta p_s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_{si} - \Delta \bar{p}_s)^2}{n(n-1)}} = 2,52 \cdot 10^{-4} \text{ kPa} = 0,252 \text{ Pa} \quad (42)$$

**Standardní nejistota typu A teploty:**

Průměrná hodnota teploty  $\bar{T} = 35,02 \text{ }^\circ\text{C}$

$$u_A(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}} = 0,165 \text{ }^\circ\text{C} \quad (43)$$

Všechny naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce v příloze 2.

## 6.5.2 Nejistota typu B pro použité přístroje

Nejistota typu B bude v našem případě pocházet z přístrojů použitých při měření. Za zdroje nejistot typu B budeme považovat převodníky tlaku, dvou vodičový převodník výstupního signálu odporového čidla Pt100 a také použité multimetry.

**Nejistota typu B převodníku převádějící diferenční tlak clony na el. proud:**

Výrobce převodníku udává jeho chybu jako 0,075% z rozsahu. Převodník je v tomto případě nastaven na rozsah 0 – 3600 Pa. K výpočtu nejistoty využijeme vztah (17). Předpokládáme rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti, tudíž  $k = \sqrt{3}$ . A  $z_{max}$  představuje maximální odchylku, v našem případě:

$$z_{max} = 0,075 \cdot 10^{-2} \cdot 3600 = 2,7 \text{ Pa} \quad (44)$$

Pak nejistota typu B diferenčního převodníku tlaku bude:

$$u_B(p_c) = \frac{2,7}{\sqrt{3}} = 1,56 Pa \quad (45)$$

**Nejistota typu B převodníku převádějící diferenční tlak sondy Annubar 485 na el. proud:**

Převodník je stejný jako v předchozím případě. Jediný rozdíl je v nastaveném rozsahu. Na tomto převodníku je nastaven rozsah 0-800Pa. Postup výpočtu je analogický s předchozím případem.

$$z_{\max} = 0,075 \cdot 10^{-2} \cdot 800 = 0,6 Pa \quad (46)$$

Nejistota typu B diferenčního převodníku tlaku bude:

$$u_B(p_s) = \frac{0,6}{\sqrt{3}} = 0,35 Pa \quad (47)$$

**Nejistota typu B dvou vodičového převodníku výstupního signálu čidla Pt100:**

Tento převodník je instalován v hlavici odporového snímače teploty. Převádí výstupní signál čidla na lineární signál s teplotou. Převodník má udané meze základní chyby 0,3% a má rozsah 0-150 °C. Výpočet nejistoty typu B bude analogický jako u diferenčních převodníků.

$$z_{\max} = 0,003 \cdot 150 = 0,45 ^\circ C \quad (48)$$

Pak nejistota typu B diferenčního převodníku tlaku bude:

$$u_B(p_T) = \frac{0,45}{\sqrt{3}} = 0,26 ^\circ C \quad (49)$$

**Nejistota typu B multimetru Metex M 3890D pro měření výstupu z clony:**

Multimetr měřil proudovou smyčku na výstupu z převodníku tlaku připojeného k normalizované cloně. Průměrná naměřená hodnota při měření na frekvenci ventilátoru 25 Hz byla 7,86mA.

Výrobce udává chybu přístroje jako  $(\pm 1,2\% + 2 \text{dgts})$ . Při výpočtu vyjdeme ze vzorce (12) a (13).

$$u_B(M_{\Delta pc}) = \frac{0.012 \cdot 7,86 + 2 \cdot 0,01}{\sqrt{3}} = 0,066 \text{ mA} \quad (50)$$

Nejistotu vyjádřenou v mA musíme ještě převést na nejistotu tlaku v Pa. Rozsah převodníku je 0-3600 Pa. Výsledná nejistota v Pa tedy bude:

$$u_B(M_{\Delta pc}) = \frac{u_B(M_{\Delta pc}) \cdot rozsah}{16} = \frac{0,066 \cdot 3600}{16} = 14,85 \text{ Pa} \quad (51)$$

### **Nejistota typu B multimetru Metex M 3890D pro měření výstupu ze sondy:**

Tento multimetr měřil proudovou smyčku na výstupu z převodníku tlaku připojeného k sondě Anubar 485. Průměrná naměřená hodnota při měření na frekvenci ventilátoru 25 Hz byla 8,07mA.

Multimetr je stejného typu jako v předešlém případě, tudíž bude postup výpočtu stejný.

$$u_B(M_{\Delta ps}) = \frac{0.012 \cdot 8,07 + 2 \cdot 0,01}{\sqrt{3}} = 6,75 \cdot 10^{-2} \text{ mA} \quad (52)$$

Opět musíme nejistotu vyjádřit v Pa. Rozsah převodníku je tentokrát 0-800 Pa. Výsledná nejistota v Pa tedy bude:

$$u_B(M_{\Delta ps}) = \frac{u_B(M_{\Delta ps}) \cdot rozsah}{16} = \frac{6,75 \cdot 10^{-2} \cdot 800}{16} = 3,37 \text{ Pa} \quad (53)$$

### **Nejistota typu B multimetru Hung Chang:**

Multimetr Hung Chang jsme používali pro měření proudové smyčky na výstupu z čidla teploty PT100. Výrobce udává chybu přístroje jako ( $\pm 1,2\% + 1 \text{dgt}$ ). Průměrná měřená hodnota byla 7,74mA Výpočet maximální nejistoty typu B je analogický jako u multimetru Metex.

$$u_B(M_{HC}) = \frac{0.012 \cdot 7,74 + 1 \cdot 0,01}{\sqrt{3}} = 5,94 \cdot 10^{-2} \text{ mA} \quad (54)$$

Nejistotu převedem z mA na °C. Převodník má rozsah 0-150 °C. Nejistota ve °C tedy bude:

$$u_B(M_{HC}) = \frac{u_B(M_{HC}) \cdot rozsah}{16} = \frac{5,94 \cdot 10^{-2} \cdot 150}{16} = 0,56 \text{ °C} \quad (55)$$

### 6.5.3 Celková nejistota teploty a diferenčních tlaků clony a sondy Annubar 485

Při výpočtech celkové nejistoty vycházíme z kapitoly 3.2.3. Určuje se jako součet čtverců nejistoty typu A a nejistoty typu B podle vzorce (18). V případech kdy nejistotu typu B tvoří více složek, určíme celkovou nejistotu typu B jako součet čtverců jednotlivých nejistot.

#### Celková nejistota diferenčního tlaku clony:

Nejistota typu B diferenčního tlaku clony:

$$u_B(\Delta p_c) = \sqrt{u_B(M_{\Delta p_c})^2 + u_B(p_c)^2} = \sqrt{14,85^2 + 1,56^2} = 14,93 Pa \quad (56)$$

Celková nejistota diferenčního tlaku clony:

$$u_C(\Delta p_c) = \sqrt{u_A(\Delta p_c)^2 + u_B(\Delta p_c)^2} = \sqrt{0,878^2 + 14,93^2} = 14,96 Pa \quad (57)$$

**Tabulka 2: Bilanční tabulka nejistot pro diferenční tlak clony**

Veličina T; $\Delta p_c$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(\Delta p_c)$ ; nejistota $u_c(\Delta p_c)$
$\Delta p_c$	868,5 Pa	0,878 Pa	Rovnoměrné	1	0,878 Pa
Převodník		1,56 Pa	Rovnoměrné	1	1,56 Pa
Multimetr		14,85 Pa	Rovnoměrné	1	14,85 Pa
$\Delta p_c$	868,5 Pa				14,96 Pa

#### Celková nejistota diferenčního tlaku sondy Annubar 485:

Nejistota typu B diferenčního tlaku sondy:

$$u_B(\Delta p_s) = \sqrt{u_B(M_{\Delta p_s})^2 + u_B(p_s)^2} = \sqrt{3,37^2 + 0,35^2} = 3,39 Pa \quad (58)$$

Celková nejistota diferenčního tlaku sondy:

$$u_C(\Delta p_s) = \sqrt{u_A(\Delta p_s)^2 + u_B(\Delta p_s)^2} = \sqrt{0,252^2 + 3,39^2} = 3,40 Pa \quad (59)$$

**Tabulka 3: Bilanční tabulka nejistot pro diferenční tlak sondy Annubar 485**

Veličina $T; \Delta p_s$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(\Delta p_s)$ ; nejistota $u_c(\Delta p_s)$
$\Delta p_c$	203,7 Pa	0,252 Pa	Rovnoměrné	1	0,252 Pa
Převodník		0,35 Pa	Rovnoměrné	1	0,35 Pa
Multimetr		3,37 Pa	Rovnoměrné	1	3,37 Pa
$\Delta p_s$	203,7 Pa				3,40 Pa

**Celková nejistota teploty:**

Nejistota typu B teploty:

$$u_B(T) = \sqrt{u_B(M_{HC})^2 + u_B(p_T)^2} = \sqrt{0,56^2 + 0,26^2} = 0,62 \text{ °C} \quad (60)$$

Celková nejistota teploty:

$$u_C(T) = \sqrt{u_A(T) + u_B(T)} = \sqrt{0,165^2 + 0,62^2} = 0,64 \text{ °C} \quad (61)$$

**Tabulka 4: Bilanční tabulka nejistot pro teplotu**

Veličina $T; \Delta p_c$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(T)$ ; nejistota $u_c(T)$
T	35,02 °C	0,165 °C	Rovnoměrné	1	0,165 °C
Převodník		0,26 °C	Rovnoměrné	1	0,26 °C
Multimetr		0,56 °C	Rovnoměrné	1	0,56 °C
T	35,02 °C				0,64 °C

### 6.5.4 Celková nejistota koeficientu sondy Annubar 485

Jelikož při stanovování hustoty vzduchu a objemového průtoku vzduchu se jedná o nepřímé měření, musíme pro výpočet nejistoty použít odlišný vzorec. Při stanovování hustoty a objemového průtoku nepředpokládám žádné kovariance mezi odhady vstupních veličin. Nejistota se tedy spočítá podle vztahu (10).

**Celková nejistota hustoty:**

Hustota vzduchu se vypočítá podle vzorce (33). Zdrojem nejistoty je teplota. Koeficient citlivosti  $A_T$  určíme z derivace vztahu (33) podle  $T$ , přičemž průměrná hodnota teploty je  $T=35,02\text{°C}$ .

$$A_T = \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{p}{R} \cdot (-T^{-2}) = -\frac{p}{RT^2} = -\frac{102000}{287,13 \cdot (273,16 + 35,02)^2} = -3,74 \cdot 10^{-3} \quad (62)$$

Celková nejistota hustoty tedy bude:

$$u_c(\rho) = \sqrt{A_T^2 \cdot u_c^2(T)} = \sqrt{(-3,74 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,64^2} = 2,39 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \quad (63)$$

**Tabulka 5: Bilanční tabulka nejistot pro výpočet hustoty**

Veličina T;ρ	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(\rho)$ ; nejistota $u_c(\rho)$
T	35,02 °C	0,64 °C	Rovnoměrné	$3,74 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
ρ	1,1527 kg/m <sup>3</sup>				$2,39 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$

**Celková nejistota objemového průtoku určeného clonou  $Q_{vc}$ :**

Objemový průtok se vypočítá podle vzorce (32). Zdroji nejistot jsou hustota a diferenční tlak  $\Delta p_c$ .

Koeficient citlivosti  $A_\rho$  určíme z derivace vztahu (32) podle  $\rho$ , přičemž průměrná hodnota diferenčního tlaku clony je  $\Delta p_c = 868,5 \text{ Pa}$  a průměrná hodnota hustoty je  $\rho = 1,1527 \text{ kg/m}^3$ .

$$\begin{aligned} A_\rho &= \frac{\partial Q_v}{\partial \rho} = \frac{\partial \left( \frac{1}{\rho} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p_c \rho} \right)}{\partial \rho} = -\frac{1}{\rho^2} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{1}{2} \frac{2\Delta p_c}{\sqrt{2\Delta p_c \rho}} = \\ &= -\frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\Delta p_c}{\rho^2 \sqrt{2\Delta p_c \rho}} = \\ &= -\frac{0,6021}{\sqrt{1-0,7491^4}} \cdot 0,9947 \frac{\pi}{4} \cdot 0,06105^2 \frac{868,5}{1,1527^2 \sqrt{2 \cdot 868,5 \cdot 1,1527}} = -3,09 \cdot 10^{-2} \end{aligned} \quad (64)$$

Koeficient citlivosti  $A_{\Delta p_c}$  určíme z derivace vztahu (32) podle  $\Delta p_c$ :

$$\begin{aligned}
A_{\Delta p_c} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{\rho} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p_c \rho} \right)}{\partial \Delta p_c} = \frac{1}{\rho} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{1}{2} \frac{2\rho}{\sqrt{2\Delta p_c \rho}} = \\
&= \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{1}{\sqrt{2\Delta p_c \rho}} = \\
&= \frac{0,6021}{\sqrt{1-0,7491^4}} 0,9947 \frac{\pi}{4} 0,06105^2 \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 868,5 \cdot 1,1527}} = 4,73 \cdot 10^{-5}
\end{aligned} \tag{65}$$

Celková nejistota objemového průtoku určeného clonou tedy bude:

$$\begin{aligned}
u_c(Q_{vc}) &= \sqrt{A_p^2 \cdot u_c^2(\rho) + A_{\Delta p_c}^2 \cdot u_c^2(\Delta p_c)} = \\
&= \sqrt{(-3,09 \cdot 10^{-2})^2 \cdot (2,39 \cdot 10^{-3})^2 + (4,73 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (14,96)^2} = 7,11 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}
\end{aligned} \tag{66}$$

**Tabulka 6: Bilanční tabulka nejistot pro výpočet objemového průtoku**

Veličina $\rho, \Delta p_c, Q_{vc}$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(Q_{vc})$ ; nejistota $u_c(Q_{vc})$
$\rho$	1,1527 kg/m <sup>3</sup>	$2,39 \cdot 10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup>	Rovnoměrné	$3,09 \cdot 10^{-2}$	$7,39 \cdot 10^{-5}$ m <sup>3</sup> /s
$\Delta p_c$	868,5 Pa	14,96 Pa	Rovnoměrné	$4,73 \cdot 10^{-5}$	$7,07 \cdot 10^{-4}$ m <sup>3</sup> /s
$Q_{vc}$	0,0822 m <sup>3</sup> /s				$7,11 \cdot 10^{-4}$ m <sup>3</sup> /s

#### **Celková nejistota koeficientu sondy Annubar 485:**

Koeficient sondy Annubar se vypočítá podle vztahu (37). Zde předpokládám, že veličiny hustota a objemový průtok jsou korelované. Stupeň korelace mezi veličinami neznáme, proto určíme maximální hodnotu nejistoty podle vztahu (29). Citlivostní koeficienty jednotlivých veličin určíme podle vztahu (23). Průměrná hodnota diferenčního tlaku sondy je  $\Delta p_s=203,67$  Pa, průměrná hodnota hustoty  $\rho=1,1527$  a průměrná hodnota objemového průtoku  $Q_{vc}=0,0822\text{m}^3/\text{s}$ .

Koeficient citlivosti  $A_\rho$  určíme z derivace vztahu (37) podle  $\rho$ :

$$\begin{aligned}
A_p &= \frac{\partial \left( \sqrt{\frac{Q_{vc}^2 \rho}{2S^2 \Delta p_s}} \right)}{\partial \rho} = \frac{1}{\frac{2Q_{vc} \sqrt{\rho}}{\sqrt{2S} \sqrt{\Delta p_s}}} \frac{Q_{vc}^2}{2S^2 \Delta p_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta p_s} \cdot Q_{vc}}{4 \cdot S \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta p_s} = \\
&= \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{203,67} \cdot 0,0822}{4 \cdot 0,007854 \cdot \sqrt{1,1527} \cdot 203,67} = 0,241
\end{aligned} \tag{67}$$

Koeficient citlivosti  $A_{\Delta p_s}$  určíme z derivace vztahu (37) podle  $\Delta p_s$ :

$$\begin{aligned}
A_{\Delta p_s} &= \frac{\partial \left( \sqrt{\frac{Q_{vc}^2 \rho}{2S^2 \Delta p_s}} \right)}{\partial \Delta p_s} = \frac{1}{\frac{2Q_{vc} \sqrt{\rho}}{\sqrt{2S} \sqrt{\Delta p_s}}} \cdot \left( -\frac{Q_{vc}^2 \rho}{2S^2 \Delta p_s^2} \right) = -\frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta p_s} \cdot Q_{vc} \cdot \rho}{4 \cdot S \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta p_s^2} = \\
&= \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{203,67} \cdot 0,0822 \cdot 1,1527}{4 \cdot 0,007854 \cdot \sqrt{1,1527} \cdot 203,67^2} = -1,3 \cdot 10^{-3}
\end{aligned} \tag{68}$$

Koeficient citlivosti  $A_{Q_{vc}}$  určíme z derivace vztahu (37) podle  $Q_{vc}$ :

$$\begin{aligned}
A_{Q_{vc}} &= \frac{\partial \left( \sqrt{\frac{Q_{vc}^2 \rho}{2S^2 \Delta p_s}} \right)}{\partial Q_{vc}} = \frac{1}{\frac{2Q_{vc} \sqrt{\rho}}{\sqrt{2S} \sqrt{\Delta p_s}}} \frac{2Q_{vc} \rho}{2S^2 \Delta p_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\Delta p_s} \cdot \rho}{2 \cdot S \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta p_s} = \\
&= \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{203,67} \cdot 1,1527}{2 \cdot 0,007854 \cdot \sqrt{1,1527} \cdot 203,67} = 6,77
\end{aligned} \tag{69}$$

Maximální hodnota nejistoty koeficientu sondy Annubar 485:

$$u_c(k) = \sqrt{A_{\Delta p_s}^2 \cdot u_c^2(\Delta p_s) + A_\rho^2 \cdot u_c^2(\rho) + A_{Q_{vc}}^2 \cdot u_c^2(Q_{vc}) + 2 \cdot A_\rho \cdot A_{Q_{vc}} \cdot u_c(\rho) \cdot u_c(Q_{vc})} =$$

$$= \sqrt{(-1,37 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3,4^2 + 0,241^2 \cdot (2,39 \cdot 10^{-3})^2 + 6,77^2 \cdot (7,11 \cdot 10^{-4})^2 + 2 \cdot 0,241 \cdot 6,77 \cdot 2,39 \cdot 10^{-3} \cdot 7,11 \cdot 10^{-4}} = 7,1 \cdot 10^{-3} \quad (70)$$

**Tabulka 7: Bilanční tabulka nejistot pro výpočet koeficientu sondy Annubar 485**

Veličina $\rho, \Delta p_s, Q_{vc}; k$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(k)$ ; nejistota $u_c(k)$
$\rho$	1,1527 kg/m <sup>3</sup>	$2,39 \cdot 10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup>	Rovnoměrné	0,241	$5,712 \cdot 10^{-4}$
$\Delta p_s$	203,67 Pa	3,4 Pa	Rovnoměrné	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$4,658 \cdot 10^{-3}$
$Q_{vc}$	0,0822 m <sup>3</sup> /s	$7,11 \cdot 10^{-4}$ m <sup>3</sup> /s	Rovnoměrné	6,77	$4,813 \cdot 10^{-3}$
kovariance $2 \cdot A_\rho \cdot A_{Q_{vc}} \cdot u_c(\rho) \cdot u_c(Q_{vc})$					$5,545 \cdot 10^{-6}$
<b>k</b>	<b>0,5569</b>				<b><math>7,1 \cdot 10^{-3}</math></b>

Pozn.: Zvýrazněný řádek nepředstavuje nejistotu, ale vyjadřuje kovarianci mezi hustotou a objemovým průtokem (viz. vztah 70).

### 6.5.5 Rozšířená nejistota koeficientu sondy Annubar 485

Hodnota nejistoty koeficientu  $u_c(k) = 7,1 \cdot 10^{-3}$  zahrnuje interval kde se skutečná hodnota koeficientu nachází pouze se 68% pravděpodobností. Při požadavku alespoň 95% pravděpodobnost výskytu koeficientu v daném intervalu musíme celkovou nejistotu rozšířit koeficientem  $k_r$  podle vztahu (19). Při normálním rozdělení pravděpodobnosti bude hodnota koeficientu  $k_r=2$ . Rozšířená nejistota koeficientu sondy Annubar 485 tedy bude:

$$U = k_r \cdot u_c(k) = 2 \cdot 7,1 \cdot 10^{-3} = 0,0142 \quad (71)$$

Hodnota koeficientu sondy Annubar 485 bude při frekvenci měniče 25Hz v intervalu:

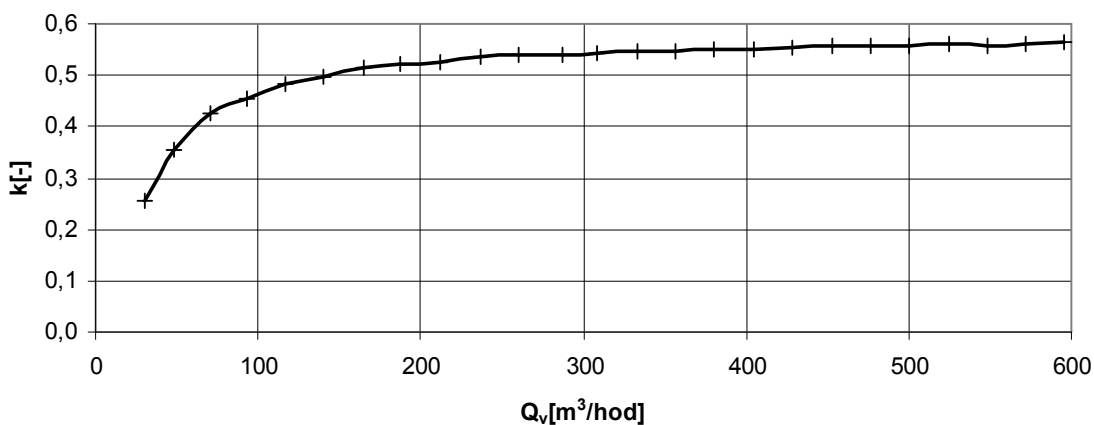
$$k = 0,5569 \pm 0,0142 \quad (72)$$

Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v přílohách 1 a 2.

## 6.6 Výpočet koeficientu upravené sondy MQS

Jelikož sonda MQS prošla několika úpravami, její koeficient má jinou hodnotu než jakou udával výrobce pro původní tvar sondy. Hodnotu koeficientu tedy vypočítáme stejným způsobem jako při výpočtu koeficientu sondy Annubar.

**Hodnota koeficientu k v závislosti na objemovém průtoku**



**Obrázek 11: Koeficient upravené sondy MQS**

Pro určení přibližné hodnoty koeficientu vezmeme v úvahu pouze hodnoty při průtoku 80-450 m<sup>3</sup>/hod. Průměrná hodnota koeficientu z těchto hodnot bude:

$$\bar{k} = 0,529 \quad (73)$$

Při měření no frekvenci měniče 25Hz je průměrná hodnota koeficientu upravené sondy MQS:

$$\bar{k} = 0,5417 \quad (74)$$

Všechny naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce v přílohách 3 a 4.

## 6.7 Výpočet nejistoty koeficientu upravené sondy MQS pro frekvenci ventilátoru 25 Hz

Upravená sonda MQS pracuje na stejném principu jako sonda Annubar 485. Výpočty koeficientu i následných nejistot jsou proto stejné jako u sondy Annubar. Jelikož je výpočet analogický jako v kapitole 6.5, budu uvádět pouze výsledné hodnoty.

### 6.7.1 Nejistota typu A

Tabulka 8: Naměřené hodnoty pro upravenou sondu MQS při frekvenci 25Hz

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$I_c$ [mA]	7,88	7,86	7,88	7,88	7,86	7,88	7,86	7,90	7,88	7,86	7,90	7,88	7,86	7,88	7,90
$I_s$ [mA]	8,30	8,36	8,32	8,34	8,30	8,28	8,30	8,32	8,34	8,36	8,32	8,34	8,32	8,34	8,34
$I_t$ [mA]	7,66	7,65	7,67	7,68	7,65	7,70	7,64	7,65	7,63	7,62	7,64	7,67	7,61	7,63	7,60

Průměrná hodnota diferenčního tlaku clony  $\Delta p_c = 872,4$  Pa. Průměrná hodnota diferenčního tlaku sondy  $\Delta p_s = 216,27$  Pa. Průměrná hodnota teploty  $\bar{T} = 34,19^\circ\text{C}$ .

$$u_A(\Delta p_c) = 0,864 \text{ Pa} \quad (75)$$

$$u_A(\Delta p_s) = 0,3 \text{ Pa} \quad (76)$$

$$u_A(T) = 0,065^\circ\text{C} \quad (77)$$

Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze 4.

### 6.7.2 Nejistota typu B pro použité přístroje

U diferenčních převodníků tlaku a dvou vodičového převodníku zjišťujeme maximální hodnotu nejistoty typu B. Maximální hodnoty nejistot převodníků budou tedy stejné jako v kapitole 6.5.2.

Hodnoty nejistot typu B u multimetrů se budou lišit z důvodu odlišných měřených hodnot.

$$u_B(M_{\Delta p_c}) = 14,88 \text{ Pa} \quad (78)$$

$$u_B(M_{\Delta p_s}) = 3,46 \text{ Pa} \quad (79)$$

$$u_B(M_{HC}) = 0,55 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (80)$$

### 6.7.3 Celkové nejistoty jednotlivých veličin a koeficientu

Pro přehlednění uvádím pouze bilanční tabulky nejistot pro jednotlivé veličiny.

#### Celková nejistota diferenčního tlaku clony:

Tabulka 9: : Bilanční tabulka nejistot pro diferenční tlak clony

Veličina $T; \Delta p_c$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(\Delta p_c)$ ; nejistota $u_c(\Delta p_c)$
$\Delta p_c$	872,4 Pa	0,864 Pa	Rovnoměrné	1	0,864 Pa
Převodník		1,56 Pa	Rovnoměrné	1	1,56 Pa
Multimetr		14,88 Pa	Rovnoměrné	1	14,88 Pa
$\Delta p_c$	872,4 Pa				14,98 Pa

#### Celková nejistota diferenčního tlaku upravené sondy MQS:

Tabulka 10: Bilanční tabulka nejistot pro diferenční tlak upravené sondy MQS

Veličina $T; \Delta p_s$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(\Delta p_s)$ ; nejistota $u_c(\Delta p_s)$
$\Delta p_c$	216,3 Pa	0,3 Pa	Rovnoměrné	1	0,3 Pa
Převodník		0,35 Pa	Rovnoměrné	1	0,35 Pa
Multimetr		3,46 Pa	Rovnoměrné	1	3,46 Pa
$\Delta p_s$	216,3 Pa				3,49 Pa

#### Celková nejistota teploty:

Tabulka 11: Bilanční tabulka nejistot pro teplotu

Veličina $T; \Delta p_c$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(T)$ ; nejistota $u_c(T)$
T	34,19 $^\circ\text{C}$	0,065 $^\circ\text{C}$	Rovnoměrné	1	0,065 $^\circ\text{C}$
Převodník		0,26 $^\circ\text{C}$	Rovnoměrné	1	0,26 $^\circ\text{C}$
Multimetr		0,55 $^\circ\text{C}$	Rovnoměrné	1	0,55 $^\circ\text{C}$
T	34,19 $^\circ\text{C}$				0,61 $^\circ\text{C}$

### Celková nejistota hustoty:

Tabulka 12: Bilanční tabulka nejistot pro výpočet hustoty

Veličina $T; \rho$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(\rho)$ ; nejistota $u_c(\rho)$
T	34,19 °C	0,61 °C	Rovnoměrné	$3,76 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
$\rho$	1,1559 $\text{kg/m}^3$				$2,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$

### Celková nejistota objemového průtoku určeného clonou $Q_{vc}$ :

Tabulka 13: Bilanční tabulka nejistot pro výpočet objemového průtoku vzduchu

Veličina $\rho, \Delta p_c; Q_{vc}$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(Q_{vc})$ ; nejistota $u_c(Q_{vc})$
$\rho$	1,1559 $\text{kg/m}^3$	$2,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Rovnoměrné	$3,08 \cdot 10^{-2}$	$7,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
$\Delta p_c$	872,4 Pa	14,98 Pa	Rovnoměrné	$4,716 \cdot 10^{-5}$	$7,06 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_{vc}$	0,0823 $\text{m}^3/\text{s}$				$7,10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

### Celková nejistota koeficientu upravené sondy MQS:

Tabulka 14: Bilanční tabulka nejistot pro výpočet koeficientu upravené sondy MQS

Veličina $\rho, \Delta p_s, Q_{vc}; k$	Odhad $x_i$	Standardní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivost $A_i$	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_i(k)$ ; nejistota $u_c(k)$
$\rho$	1,1559 $\text{kg/m}^3$	$2,29 \cdot 10^{-3}$ $\text{kg/m}^3$	Rovnoměrné	0,234	$5,359 \cdot 10^{-4}$
$\Delta p_s$	216,3 Pa	3,49 Pa	Rovnoměrné	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$4,363 \cdot 10^{-3}$
$Q_{vc}$	0,0823 $\text{m}^3/\text{s}$	$7,10 \cdot 10^{-4}$ $\text{m}^3/\text{s}$	Rovnoměrné	6,12	$4,615 \cdot 10^{-3}$
kovariance $2 \cdot A_p \cdot A_{Q_{vc}} \cdot u_c(\rho) \cdot u_c(Q_{vc})$					$4,946 \cdot 10^{-6}$
k	0,5417				$6,5 \cdot 10^{-3}$

Pozn.: Zvýrazněný řádek nepředstavuje nejistotu, ale vyjadřuje kovarianci mezi hustotou a objemovým průtokem (viz. vztah 70).

## 6.7.4 Rozšířená nejistota

Po rozšíření bude mít nejistota koeficientu upravené sondy MQS hodnotu:

$$U = k_r \cdot u_c(k) = 2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} = 0,013 \quad (81)$$

Hodnota koeficientu upravené sondy MQS bude při frekvenci měniče 25Hz v intervalu:

$$k = 0,5417 \pm 0,013 \quad (82)$$

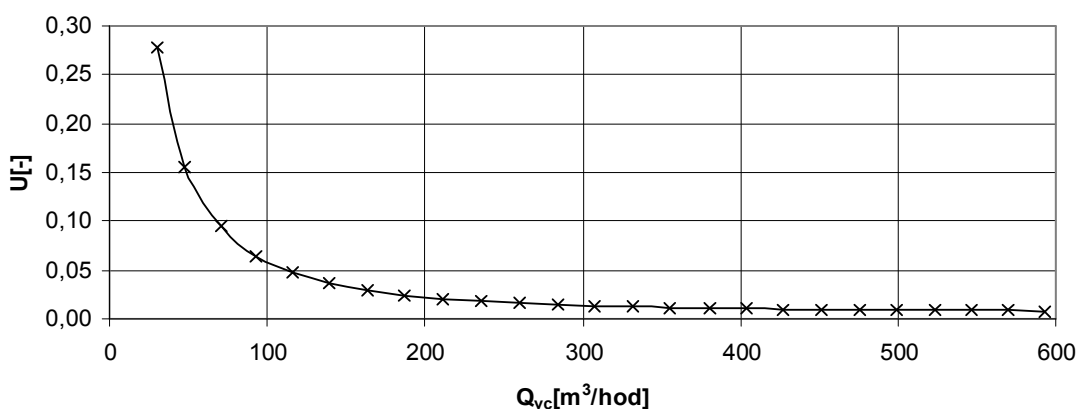
Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v přílohách 3 a 4.

## 6.8 Rozšířená nejistota v celém frekvenčním rozsahu měniče

Zjištěná rozšířená nejistota u obou sond při frekvenci měniče 25Hz nebude stejná při jiném průtoku vzduchu. Jelikož její podstatnou část tvoří nejistota typu B u multimetru, bude se její velikost měnit se změnou měřené hodnoty proudu multimetrem.

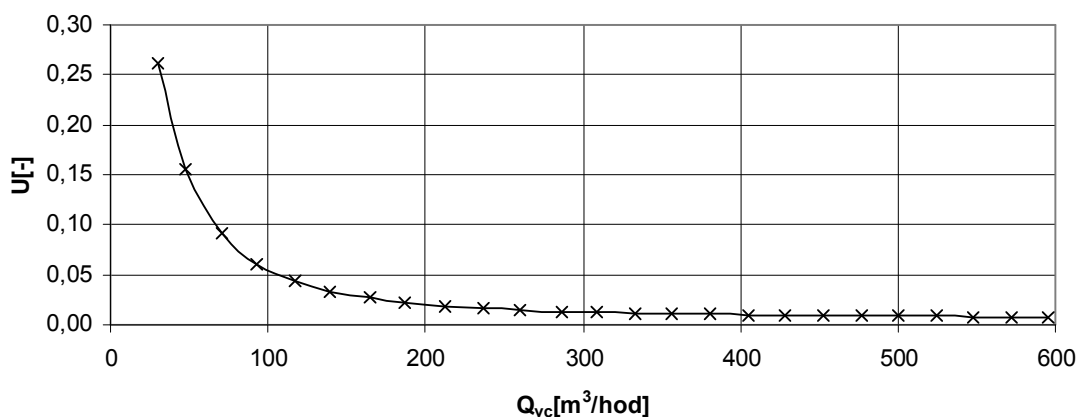
Při výpočtu nejistoty v celém frekvenčním rozsahu měniče jsem neměl k dispozici u každé hodnoty frekvence měniče 10 naměřených hodnot diferenčních tlaků a teploty, proto jsem při výpočtech nemohl počítat s nejistotou typu A. Zanedbání nejistoty typu A ale nemá na výslednou nejistotu žádný podstatný vliv. Při pohledu na výpočty celkových nejistot, které se skládají z nejistoty typu A a nejistoty typu B, zjistíme, že velikost celkové nejistoty nejistota typu A ovlivní zanedbatelným způsobem oproti nejistotě typu B. Tudíž můžeme nejistotu typu A zanedbat.

**Průběh rozšířené nejistoty koeficientu sondy Annubar 485**



**Obrázek 12: Rozšířená nejistota koeficientu sondy Annubar 485**

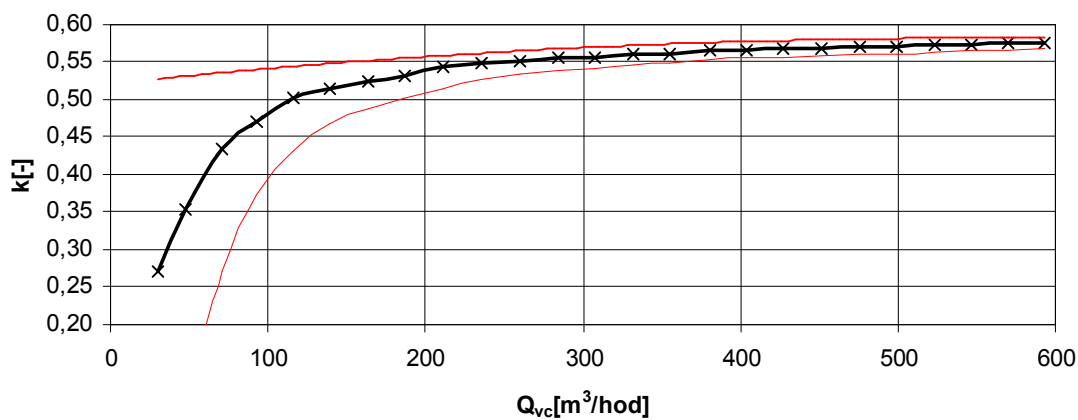
### Průběh rozšířené nejistoty koeficientu u upravené sondy MQS



Obrázek 13: Rozšířená nejistota koeficientu upravené sondy MQS

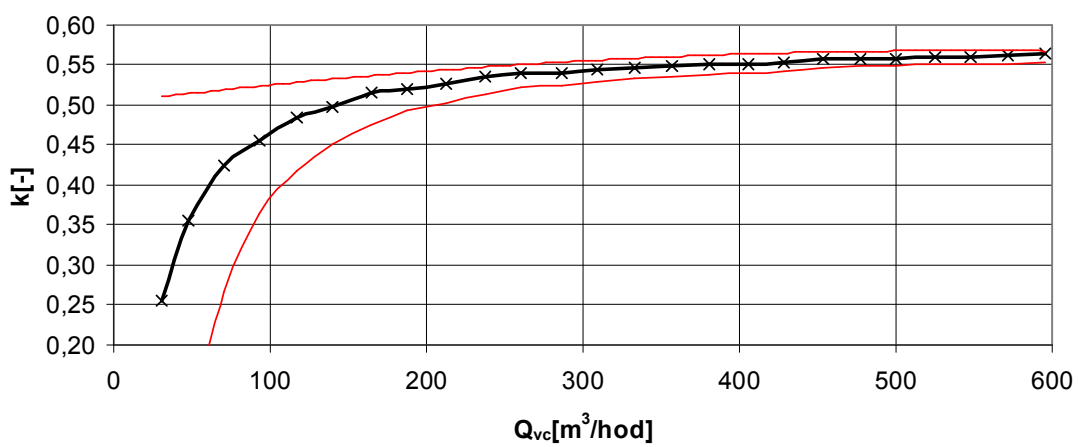
Při znalosti rozšířené nejistoty můžeme určit interval ve kterém se nachází koeficient s pravděpodobností 95%. Na níže zobrazených grafech je černou křivkou vyznačen průběh odhadu koeficientu a červenými křivkami vyhrazen interval výskytu skutečné hodnoty koeficientu s pravděpodobností 95%.

### Průběh koeficientu sondy Annubar 485 s rozšířenou nejistotou



Obrázek 14: Interval výskytu skutečné hodnoty koeficientu sondy Annubar 485

### Průběh koeficientu upravené sondy MQS s rozšířenou nejistotou



Obrázek 15: Interval výskytu skutečné hodnoty koeficientu upravené sondy MQS

## 7 ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce byly uvedeny základní informace o nejistotách měření a jejich určování (kap. 3). V kapitole 4 byl popsán princip víceotvorové rychlostní sondy. V této kapitole byly také stručně popsány sondy Anubar 485 a upravená sonda MQS, která byly použity v praktické části semestrální práce.

V praktické práci semestrální práce jsem prováděl měření na měřicí trati, při kterém jsem se zabýval určením nejistoty typu A, diferenčních tlaků a teploty. Proto jsem provedl měření 15 hodnot při frekvenci měniče 25 Hz. Kvůli přesnějšímu určení koeficientu jsem proměřil charakteristiku obou sond v závislosti na objemovém průtoku vzduchu. Zpracováním těchto hodnot jsem taky určil průběh rozšířené nejistoty koeficientu v celém rozsahu frekvence ventilátoru. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách v přílohách 1 až 4.

Obě sondy jsou si, co se týče diferenčního tlaku, hodně podobné. Větší diferenční tlak má na výstupu upravená sonda MQS, tudíž je její koeficient nižší než u sondy Anubar 485. Nicméně rozdíl mezi koeficienty obou sond je velmi malý. Při frekvenci ventilátoru 25Hz má koeficient sondy Anubar 485 hodnotu  $k = 0,5569 \pm 0,0142$  a u upravené sondy MQS má koeficient hodnotu  $k = 0,5417 \pm 0,013$ . Přesnější určení hodnoty koeficientů můžeme docílit zprůměrnováním hodnot při průtoku v intervalu provozních průtoků normalizované clony, tj. průtok  $80 - 450 \text{ m}^3/\text{hod}$ . U sondy Anubar 485 se takto určený koeficient  $k = 0,5431$  a u upravené sondy MQS se  $k = 0,5290$ .

Průběh rozšířené nejistoty koeficientů jsou uvedeny na obrázcích 12 a 13. Je z nich patrné že při malých průtocích je nejistota velmi vysoká a při narůstajícím průtoku se značně snižuje. Velkou nejistotu v nízkých průtocích ovlivňuje velká nejistota objemového průtoku a velká hodnota jejího citlivostního koeficientu. Na obrázcích 14 a 15 je uveden průběh odhadu hodnoty koeficientu a červené křivky tvoří hranice intervalu určeného rozšířenou nejistotou, kde se nachází skutečná hodnota koeficientů s pravděpodobností 95%.

U sondy Anubar 485 udává výrobce výpočet koeficientu v závislosti na velikosti sondy a průřezu potrubí. Takto vypočítaný koeficient má hodnotu  $k = 0,5424$ . Vezmeme-li v úvahu náš interval hodnot daný rozšířenou nejistotou, tak tato hodnota patří do našeho intervalu hodnot daném rozšířenou nejistotou. Naše měření a následný výpočet jsou tedy správné.

U upravené sondy MQS není možné vypočíst podle výrobce hodnotu koeficientu. Jelikož ale sonda pracuje na stejném principu jako sonda Anubar 485, tak můžeme tvrdit že skutečná hodnota koeficientu upravené sondy MQS leží v intervalu hodnot podle obrázku 15.

## 8 LITERATURA

- [1] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: *Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. AUTOMA*. 2001, 7-8, s. 50-54.
- [2] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: *Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. AUTOMA*. 2001, 10, s. 52-56.
- [3] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: *Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. AUTOMA*. 2001, 12, s. 28-33.
- [4] PALENČÁR, R. Základné postupy stanovenia neistot v meraní. In *Chybya nejistoty v měření: sborník ze semináře s mezinárodní účastí*. 1. vyd. Brno :VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky,1999. s. 17-36. ISBN 80-214-1427-8.
- [5] STEPHANIE BELL, *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*. 2. vyd. United Kingdom: NPL, 2001. ISSN 1368-6550.
- [6] RABINOVICH, S. G., *Measurement Errors and Uncertainties, Springer; 3rd edition*. New York: AIP Press, 2005. ISBN 978-0387-25368-9.
- [7] ŠEDIVÁ, S., BEJČEK, L. Zkušební měřicí trať průtoků úamť fekt vut Brno. In *Průtok 2003 : sborník ze semináře*. 1. vyd. 2003. s. 71-78. ISBN 80-86742-01-6.
- [8] TESAŘ, J., PRAŽÁK, D. Metrologické zajištění měření plynu v ČR. In *Průtok 2003 : sborník ze semináře*. 1. vyd. 2003. s. 79-86. ISBN 80-86742-01-6.
- [9] ROSEMOUNT. Rosemount 485 Annubar Flow Handbook [online]. Poslední revise 18.5.2006 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z: <<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20documents/00809-0100-1191.pdf>>
- [10] VDOLEČEK, F. *Nejistoty měření a současná legislativa. AUTOMA*. 2005, 7.
- [11] ŠEDIVÁ, S. *Několikaotvorové rychlostní sondy k měření průtoků. AUTOMA*. 2003, 12.

## Seznam příloh

- Příloha 1. Naměřené a vypočtené hodnoty pro sondu Annubar 485 v celém rozsahu výkonu ventilátoru
- Příloha 2. Naměřené a vypočtené hodnoty pro sondu Annubar 485 při frekvenci měniče 25Hz
- Příloha 3. Naměřené a vypočtené hodnoty pro upravenou sondu MQS v celém rozsahu výkonu ventilátoru
- Příloha 4. Naměřené a vypočtené hodnoty pro upravenou sondu MQS při frekvenci měniče 25Hz
- Příloha 5. Parametry normalizované clony
- Příloha 6. CD s vlastním textem práce

# 1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro sondu Annubar 485 v celém rozsahu výkonu ventilátoru

f[Hz]	I <sub>s</sub> [mA]	I <sub>c</sub> [mA]	I <sub>i</sub> [mA]	Δp <sub>s</sub> [Pa]	Δp <sub>c</sub> [Pa]	T[°C]	ρ <sub>v</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Q <sub>mc</sub> [kg/s]	Q <sub>vc</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>vc</sub> [m <sup>3</sup> /hod]	k[-]	U [-]
2	4,18	4,04	7,70	9,00	9,00	34,69	1,1540	0,0097	0,0084	30,1148	0,2697	0,2778
4	4,26	4,10	7,71	13,00	22,50	34,78	1,1536	0,0153	0,0132	47,6230	0,3548	0,1548
6	4,38	4,22	7,52	19,00	49,50	33,00	1,1603	0,0227	0,0196	70,4317	0,4353	0,0953
8	4,56	4,38	7,61	28,00	85,50	33,84	1,1572	0,0298	0,0257	92,6929	0,4713	0,0643
10	4,78	4,60	7,57	39,00	135,00	33,47	1,1586	0,0375	0,0323	116,4032	0,5017	0,0470
12	5,06	4,86	7,61	53,00	193,50	33,84	1,1572	0,0448	0,0387	139,4453	0,5153	0,0358
14	5,40	5,18	7,53	70,00	265,50	33,09	1,1600	0,0526	0,0453	163,1415	0,5252	0,0284
16	5,78	5,54	7,55	89,00	346,50	33,28	1,1593	0,0600	0,0518	186,4304	0,5321	0,0235
18	6,20	5,98	7,56	110,00	445,50	33,38	1,1589	0,0681	0,0587	211,4245	0,5427	0,0201
20	6,68	6,46	7,51	134,00	553,50	32,91	1,1607	0,0759	0,0654	235,4822	0,5481	0,0175
22	7,22	7,00	7,50	161,00	675,00	32,81	1,1611	0,0839	0,0722	260,0067	0,5522	0,0156
24	7,80	7,58	7,50	190,00	805,50	32,81	1,1611	0,0916	0,0789	284,0308	0,5553	0,0141
26	8,44	8,20	7,52	222,00	945,00	33,00	1,1603	0,0992	0,0855	307,7383	0,5564	0,0129
28	9,10	8,90	7,52	255,00	1102,50	33,00	1,1603	0,1071	0,0923	332,3954	0,5608	0,0120
30	9,82	9,60	7,53	291,00	1260,00	33,09	1,1600	0,1145	0,0987	355,4000	0,5612	0,0112
32	10,52	10,40	7,56	326,00	1440,00	33,38	1,1589	0,1224	0,1056	380,1130	0,5668	0,0107
34	11,38	11,22	7,57	369,00	1624,50	33,47	1,1586	0,1300	0,1122	403,7921	0,5658	0,0101
36	12,24	12,10	7,56	412,00	1822,50	33,38	1,1589	0,1377	0,1188	427,6272	0,5672	0,0097
38	13,16	13,02	7,58	458,00	2029,50	33,56	1,1582	0,1452	0,1254	451,3972	0,5677	0,0093
40	14,06	14,00	7,59	503,00	2250,00	33,66	1,1579	0,1529	0,1320	475,3592	0,5704	0,0091
42	15,10	15,02	7,62	555,00	2479,50	33,94	1,1568	0,1604	0,1387	499,2427	0,5700	0,0088
44	16,04	16,10	7,63	602,00	2722,50	34,03	1,1565	0,1681	0,1453	523,2146	0,5735	0,0086
46	17,12	17,20	7,66	656,00	2970,00	34,31	1,1554	0,1755	0,1519	546,7300	0,5738	0,0084
48	18,14	18,36	7,66	707,00	3231,00	34,31	1,1554	0,1830	0,1584	570,2472	0,5765	0,0083
50	19,32	19,54	7,67	766,00	3496,50	34,41	1,1550	0,1904	0,1648	593,3045	0,5762	0,0081

Průměr k[-]

0,5431

## 2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro sondu Annubar 485 při frekvenci měniče 25Hz

n	$I_c$ [mA]	$I_s$ [mA]	$I_t$ [mA]	T[°C]	$\Delta p_s$ [Pa]	$\Delta p_c$ [Pa]	$\rho_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Q_{mc}$ [kg/s]	$Q_{vc}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{vc}$ [m <sup>3</sup> /hod]	k[-]
1	7,86	8,04	7,88	36,38	202,00	868,50	1,1477	0,0946	0,0824	296,6411	0,5592
2	7,86	8,08	7,83	35,91	204,00	868,50	1,1494	0,0946	0,0823	296,4164	0,5564
3	7,86	8,04	7,83	35,91	202,00	868,50	1,1494	0,0946	0,0823	296,4164	0,5592
4	7,86	8,06	7,79	35,53	203,00	868,50	1,1508	0,0947	0,0823	296,2365	0,5578
5	7,86	8,08	7,76	35,25	204,00	868,50	1,1519	0,0947	0,0823	296,1015	0,5564
6	7,86	8,06	7,73	34,97	203,00	868,50	1,1529	0,0948	0,0822	295,9665	0,5578
7	7,82	8,08	7,73	34,97	204,00	859,50	1,1529	0,0943	0,0818	294,4290	0,5536
8	7,86	8,10	7,70	34,69	205,00	868,50	1,1540	0,0948	0,0822	295,8314	0,5551
9	7,86	8,08	7,71	34,78	204,00	868,50	1,1536	0,0948	0,0822	295,8764	0,5564
10	7,88	8,10	7,68	34,50	205,00	873,00	1,1547	0,0951	0,0824	296,5065	0,5565
11	7,88	8,08	7,70	34,69	204,00	873,00	1,1540	0,0951	0,0824	296,5968	0,5579
12	7,86	8,06	7,69	34,59	203,00	868,50	1,1543	0,0948	0,0822	295,7863	0,5578
13	7,84	8,08	7,68	34,50	204,00	864,00	1,1547	0,0946	0,0819	294,9741	0,5550
14	7,86	8,06	7,67	34,41	203,00	868,50	1,1550	0,0949	0,0821	295,6962	0,5578
15	7,88	8,10	7,65	34,22	205,00	873,00	1,1557	0,0951	0,0823	296,3709	0,5565
	průměr			35,02	203,67	868,50	1,1527		0,0822		0,5569
	Nejistota typu A			0,165	0,252	0,878					

### 3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro upravenou sondu MQS v celém rozsahu výkonu ventilátoru

f[Hz]	I <sub>s</sub> [mA]	I <sub>c</sub> [mA]	I <sub>i</sub> [mA]	Δp <sub>s</sub> [Pa]	Δp <sub>c</sub> [Pa]	T[°C]	ρ <sub>v</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Q <sub>mc</sub> [kg/s]	Q <sub>vc</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>vc</sub> [m <sup>3</sup> /hod]	k[-]		U[-]
2	4,20	4,04	7,86	10,00	9,00	36,19	1,1484	0,0096	0,0084	30,1881	0,2558		0,2623
4	4,26	4,10	7,82	13,00	22,50	35,81	1,1498	0,0152	0,0133	47,7027	0,3548		0,1548
6	4,40	4,22	7,74	20,00	49,50	35,06	1,1526	0,0226	0,0196	70,6686	0,4243	Průměr k[-]	0,0918
8	4,60	4,38	7,70	30,00	85,50	34,69	1,1540	0,0298	0,0258	92,8202	0,4553		0,0609
10	4,84	4,60	7,73	42,00	135,00	34,97	1,1529	0,0374	0,0324	116,6876	0,4835		0,0442
12	5,14	4,86	7,75	57,00	193,50	35,16	1,1522	0,0447	0,0388	139,7431	0,4969		0,0337
14	5,48	5,20	7,82	74,00	270,00	35,81	1,1498	0,0528	0,0459	165,2469	0,5151		0,0271
16	5,86	5,54	7,84	93,00	346,50	36,00	1,1491	0,0598	0,0520	187,2556	0,5205		0,0227
18	6,34	5,98	7,87	117,00	445,50	36,28	1,1480	0,0677	0,0590	212,4245	0,5262		0,0191
20	6,80	6,46	7,95	140,00	553,50	37,03	1,1453	0,0754	0,0659	237,0638	0,5362		0,0169
22	7,32	6,96	7,98	166,00	666,00	37,31	1,1442	0,0827	0,0723	260,1598	0,5402	0,5290	0,0152
24	7,98	7,54	8,50	199,00	796,50	42,19	1,1265	0,0897	0,0796	286,7341	0,5395		0,0136
26	8,60	8,16	8,08	230,00	936,00	38,25	1,1408	0,0979	0,0858	308,8843	0,5440		0,0125
28	9,30	8,82	8,12	265,00	1084,50	38,63	1,1394	0,1053	0,0924	332,6856	0,5456		0,0116
30	10,04	9,54	8,08	302,00	1246,50	38,25	1,1408	0,1130	0,0990	356,4544	0,5479		0,0109
32	10,82	10,32	8,05	341,00	1422,00	37,97	1,1418	0,1207	0,1057	380,5498	0,5507		0,0104
34	11,70	11,16	8,07	385,00	1611,00	38,16	1,1411	0,1284	0,1125	405,1728	0,5517		0,0098
36	12,58	12,02	8,06	429,00	1804,50	38,06	1,1415	0,1359	0,1191	428,7514	0,5531		0,0094
38	13,46	12,96	8,05	473,00	2016,00	37,97	1,1418	0,1437	0,1259	453,1134	0,5568		0,0091
40	14,46	13,92	8,06	523,00	2232,00	38,06	1,1415	0,1512	0,1325	476,8417	0,5571		0,0088
42	15,50	14,94	8,03	575,00	2461,50	37,78	1,1425	0,1588	0,1390	500,5307	0,5580		0,0086
44	16,54	16,02	8,04	627,00	2704,50	37,88	1,1422	0,1665	0,1458	524,7346	0,5601		0,0084
46	17,74	17,12	8,04	687,00	2952,00	37,88	1,1422	0,1739	0,1523	548,2194	0,5590		0,0082
48	18,84	18,28	8,05	742,00	3213,00	37,97	1,1418	0,1814	0,1589	572,0277	0,5612		0,0080
50	19,92	19,44	8,07	796,00	3474,00	38,16	1,1411	0,1886	0,1653	594,9869	0,5634		0,0079

## 4 Naměřené a vypočtené hodnoty pro upravenou sondu MQS při frekvenci měniče 25Hz

n	$I_c$ [mA]	$I_s$ [mA]	$I_t$ [mA]	T[°C]	$\Delta p_s$ [Pa]	$\Delta p_c$ [Pa]	$\rho_v$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Q_{mc}$ [kg/s]	$Q_{vc}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{vc}$ [m <sup>3</sup> /hod]	k
1	7,88	8,30	7,66	34,31	215,00	873,00	1,1554	0,0951	0,0823	296,4161	0,5434
2	7,86	8,36	7,65	34,22	218,00	868,50	1,1557	0,0949	0,0821	295,6061	0,5383
3	7,88	8,32	7,67	34,41	216,00	873,00	1,1550	0,0951	0,0824	296,4613	0,5422
4	7,88	8,34	7,68	34,50	217,00	873,00	1,1547	0,0951	0,0824	296,5065	0,5409
5	7,86	8,30	7,65	34,22	215,00	868,50	1,1557	0,0949	0,0821	295,6061	0,5420
6	7,88	8,28	7,70	34,69	214,00	873,00	1,1540	0,0951	0,0824	296,5968	0,5447
7	7,86	8,30	7,64	34,13	215,00	868,50	1,1561	0,0949	0,0821	295,5610	0,5420
8	7,90	8,32	7,65	34,22	216,00	877,50	1,1557	0,0954	0,0825	297,1338	0,5436
9	7,88	8,34	7,63	34,03	217,00	873,00	1,1565	0,0952	0,0823	296,2805	0,5409
10	7,86	8,36	7,62	33,94	218,00	868,50	1,1568	0,0949	0,0821	295,4708	0,5383
11	7,90	8,32	7,64	34,13	216,00	877,50	1,1561	0,0954	0,0825	297,0884	0,5436
12	7,88	8,34	7,67	34,41	217,00	873,00	1,1550	0,0951	0,0824	296,4613	0,5409
13	7,86	8,32	7,61	33,84	216,00	868,50	1,1572	0,0950	0,0821	295,4257	0,5408
14	7,88	8,34	7,63	34,03	217,00	873,00	1,1565	0,0952	0,0823	296,2805	0,5409
15	7,90	8,34	7,60	33,75	217,00	877,50	1,1575	0,0955	0,0825	296,9071	0,5423
	Průměr:			34,19	216,27	872,40	1,1559		0,0823		0,5417
	Nejistota typu A:			0,065	0,300	0,864					

## 5 Parametry normalizované clony

ISO5167C verze 1.0

(C) JSP, s.r.o. Nová Paka

VAVRA s.r.o Božetěchova 79 BRNO

24.5.2000

Osvědčení o výpočtu clony dle ČSN ISO 5167-1 č.: 501622

Popis: Měřicí trať VUT

Z a d a n é h o d n o t y :

Tekutina	:	Vzduch suchý
Absolutní tlak	[Pa] :	102000
Teplota provozní	[°C] :	20.00
Měrná hmotnost	1[kg/m <sup>3</sup> ] :	1.212665
Dynamická viskozita	[1E-6 Pa.s] :	18.07064
Izentropický exponent Cp/Cv	:	1.410
Průměr potrubí při 20°C	[mm] :	81.500
Průtok provozní	N[m <sup>3</sup> /h] :	350.00
Průtok maximální	N[m <sup>3</sup> /h] :	450.00
Průtok minimální - zadáný	N[m <sup>3</sup> /h] :	80.00
Diferenční tlak maximální	[Pa] :	2400
Materiál clony dle ČSN	:	17 021
Materiál potrubí dle ČSN	:	11 373

M e z i v ý s l e d k y :

Průměr potrubí při provozních podm.	[mm] :	81.500
Reynoldsovo číslo při provozním průtoku	:	108662
Rychlost při provozním průtoku	[m/s] :	19.87
Reynoldsovo číslo při maximálním průtoku	:	139708
Rychlost při maximálním průtoku	[m/s] :	25.54
Reynoldsovo číslo při minimálním průtoku	:	24837

V ý s l e d n é h o d n o t y

Součinitel průtoku C	:	0.6021
Součinitel expanze Eps	:	0.9947
Poměr průměrů Beta=d/D při prov. podm.	:	0.7491
Průměr otvoru clony d při prov. podm.	[mm] :	61.050
Průměr otvoru clony d při 20°C	[mm] :	61.050

Přímé délky před clonou:

Jednoduché koleno nebo T kus	:	28.0D
Přímá délka za clonou do nejbližší tvarovky:	:	7.0D

Tlaková ztráta při maximálním průtoku [Pa]	:	1009
Reynoldsovo číslo minimální povolené	:	10000

Nejistoty: C - součinitel průtoku	[%] :	0.75
Eps - součinitel expanze	[%] :	0.06
D - průměr potrubí	[%] :	0.40
d - průměr clony	[%] :	0.07
dP - tlaková diference	[%] :	0.200 0.33
Ro - měrná hmotnost	[%] :	1.00
Nejistota provozního průtoku	[%] :	1.01